

Estudio de aplicabilidad de humedales artificiales para la mejora de la calidad de las aguas en los meandros abandonados del río Segura



Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

Junio de 2016

Alumno: **José Luis Soto Fuster**

Tutor: **D. Miguel Martín Monerri**

Co-Tutora: **Dña. Carmen Hernández Crespo**

ETSICCP



Universitat Politècnica de València



Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 El río Segura.....	5
1.2 La Vega Baja del Segura.....	6
1.3 Corredor verde de la Vega Baja del Segura	8
1.4 Humedales artificiales	8
1.5 Características hidrológicas básicas de los humedales.....	9
1.6 Caracterización ecológica de los humedales	10
1.7 Mecanismos de eliminación de los contaminantes.....	11
1.8 Tipos de humedales artificiales	13
1.9 Humedales artificiales con macrofitas flotantes.....	15
1.9.1 Ventajas de los humedales artificiales con macrofitas flotantes	17
1.9.2 Limitaciones de los humedales artificiales con macrofitas flotantes.....	17
1.9.3 Aplicaciones de los humedales artificiales con macrofitas flotantes.....	18
1.10 Humedales artificiales de flujo subsuperficial	19
1.10.1 Humedales subsuperficiales de flujo horizontal	19
1.11 Especies de plantas macrofitas utilizadas en fitodepuración.....	20
1.12 Metodología de cálculo y diseño de humedales artificiales	22
1.12.1 Dimensionamiento biológico.....	22
1.12.2 Dimensionamiento hidráulico	24
1.13 Ejemplos reales de humedales artificiales	27
1.13.1 La laguna del molino de la ciudad.....	27
1.13.2 Macrofitas en flotación.....	29
2. ANTECEDENTES.....	38
3. OBJETIVOS.....	45
4. DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	46
4.1 Meandro “Las Norias”.....	52
4.1.1 Dimensionamiento hidráulico	52
4.1.2 Calidad del agua	56
4.2 Meandro “Jacarilla”.....	58
4.2.1 Dimensionamiento hidráulico	58
4.2.2 Calidad del agua	60

4.3 Meandro “Algorfa”	62
4.3.1 Dimensionamiento hidráulico	62
4.3.2 Calidad del agua	64
4.4 Mantenimiento y operación.....	66
4.4.1 Plantación de especies vegetales	66
4.4.2 Gestión de la vegetación.....	70
5. CONCLUSIONES.....	71
6. BIBLIOGRAFÍA.....	72
Anexo I Valores Físico-Químicos de los Puntos de Muestreo.....	74

Índice de figuras

Figura 1 Localización de la Vega Baja del Segura.....	6
Figura 2 Mecanismos de eliminación de los contaminantes en humedales artificiales.....	13
Figura 3 Tipos de humedales artificiales.....	13
Figura 4 Esquema de funcionamiento de un humedal subsuperficial de flujo vertical.....	14
Figura 5 Esquema de funcionamiento de un humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	15
Figura 6 Vista general “Thypa spp” y “Phragmites Australis”	21
Figura 7 Depuradora de macrofitas en Tábara	32
Figura 8 Depuradora de macrofitas en Lantarón.....	33
Figura 9 Depuradora de macrofitas combinada con convencional infradimensionada.....	34
Figura 10 Depuradora de macrofitas en San Andrés y Sauces.....	34
Figura 11 Depuradora combinada de macrofitas y biodiscos.....	35
Figura 12 Depuradora de macrofitas para vivienda en Torrelodones	36
Figura 13 Depuradora de macrofitas en Parque Rivas-Ecópolis.....	36
Figura 14 Depuradora de macrofitas para 1500 habitantes en Cantalpino.....	37
Figura 15 Meandros eliminados tramo Contraparada-Murcia	39
Figura 16 Localización general de los meandros	40
Figura 17 Localización del meandro "Las Norias"	40
Figura 18 Azud presa hinchable Beniel.....	41
Figura 19 Vista general noria “Moquita” y vista general “Azud de las Norias”.....	42
Figura 20 Localización meandro "Jacarilla"	42
Figura 21 Vista general meandro "Jacarilla".....	43
Figura 22 Desembocadura del desagüe de la pedrera en el meandro de "Jacarilla".....	43
Figura 23 Vista aérea meandro "Algorfa"	44
Figura 24 Mapa de situación, ortofoto y foto del entorno punto de muestreo Beniel	48
Figura 25 Mapa de situación, ortofoto y mapa de localización.....	49
Figura 26 Mapa de situación, ortofoto, mapa de localización y foto del entorno	50
Figura 27 Punto de aforo de caudal “Beniel”	52
Figura 28 Perfil transversal humedal macrofitas flotantes	54
Figura 29 Esquema de funcionamiento humedal del meandro “Algorfa”.....	62
Figura 30 Perfil transversal humedal artificial meandro Algorfa.....	65
Figura 31 Vista general "Scirpus Lacustris" y "Scirpus Holoschenus".....	67
Figura 32 Vista general "Iris Pseudoacorus”.....	68
Figura 33 Soporte de macrofitas flotantes ESE®.....	69
Figura 34 Tamiz estructural AQ3M	70

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El río Segura

El río Segura es un importante río del sureste de la península ibérica. Nace en la sierra de Segura a 5 kilómetros de “Pontón Bajo”, en una pequeña aldea llamada “Fuente Segura”, en el municipio de “Santiago-Pontones” (Jaén). Desemboca en el mar Mediterráneo, en Guardamar del Segura (Alicante), tras un recorrido de 325 km.

Es uno de los ríos con mayor aprovechamiento hidrológico y su cuenca hidrográfica, probablemente por ser la más deficitaria de España, es la mejor regulada de Europa. Es conocido también por su irregularidad causante de grandes inundaciones alternadas con periodos largos de sequía y hasta la última década tristemente famoso por los graves problemas de contaminación de sus aguas, sobre todo en su curso bajo, aunque de forma reciente se ha apreciado una considerable mejora tras importantes inversiones en depuración y recuperación ambiental.

La demarcación hidrográfica del Segura ocupa una superficie de 19.025 km², si sólo se tiene en cuenta la parte continental, excluyendo las aguas costeras. Dicha superficie engloba 132 municipios, cuyos territorios se encuentran repartidos entre cuatro comunidades autónomas españolas: Región de Murcia, Andalucía (provincias de Jaén, Granada y Almería), Castilla-La Mancha (provincia de Albacete) y Comunidad Valenciana (provincia de Alicante).

El número de habitantes en la misma, ha experimentado un crecimiento notable durante los últimos años, alcanzando una población de 1.964.636 habitantes en el año 2015, distribuida entre las diferentes comunidades autónomas cuyo territorio forma parte de la demarcación.

La demarcación del Segura se encuentra casi en su totalidad dentro del dominio geológico de las Cordilleras Béticas. Sólo en su parte norte se encuentran materiales de la cobertera tabular que ocultan los terrenos más antiguos del zócalo herciniano de la Meseta, los cuales constituyen, a su vez, la base del conjunto Bético. Las Cordilleras Béticas corresponden al conjunto de la cadena montañosa generada por plegamiento alpino que se extiende a través de Andalucía, Murcia y Sur de Valencia.¹

Topográficamente es un territorio de una gran variedad orográfica, distinguiendo las zonas de cabecera con montañas con cotas máximas por encima de los 2.000 m de altitud y las zonas cercanas a la costa, con extensas llanuras.¹

Hidrogeológicamente esta complejidad da lugar a la existencia de numerosos acuíferos de mediana y pequeña extensión, con estructuras geológicas frecuentemente complejas y atormentadas que contribuyen apreciablemente al sostenimiento de los caudales naturales de los ríos.

¹ Confederación Hidrográfica del Segura

1.2 La Vega Baja del Segura

Una vez que el río Segura cruza la población de Beniel y entra en la provincia de Alicante dejando atrás la Región de Murcia, comienza el último tramo del mismo, la denominada “Vega Baja del Segura”.

La vega baja del Segura es una de las 34 comarcas que componen la Comunidad Valenciana. Se encuentra en el extremo meridional de la provincia de Alicante, limitando por un lado con el Mar Mediterráneo y por el otro con la Región de Murcia. Ocupa una extensión aproximada de 958 km², el 4% del total de la Comunidad Valenciana. Alberga un total de 27 municipios, siendo la capital de comarca el municipio de Orihuela. Pertenece íntegramente a la cuenca del río Segura, administrada por la Confederación Hidrográfica del Segura.

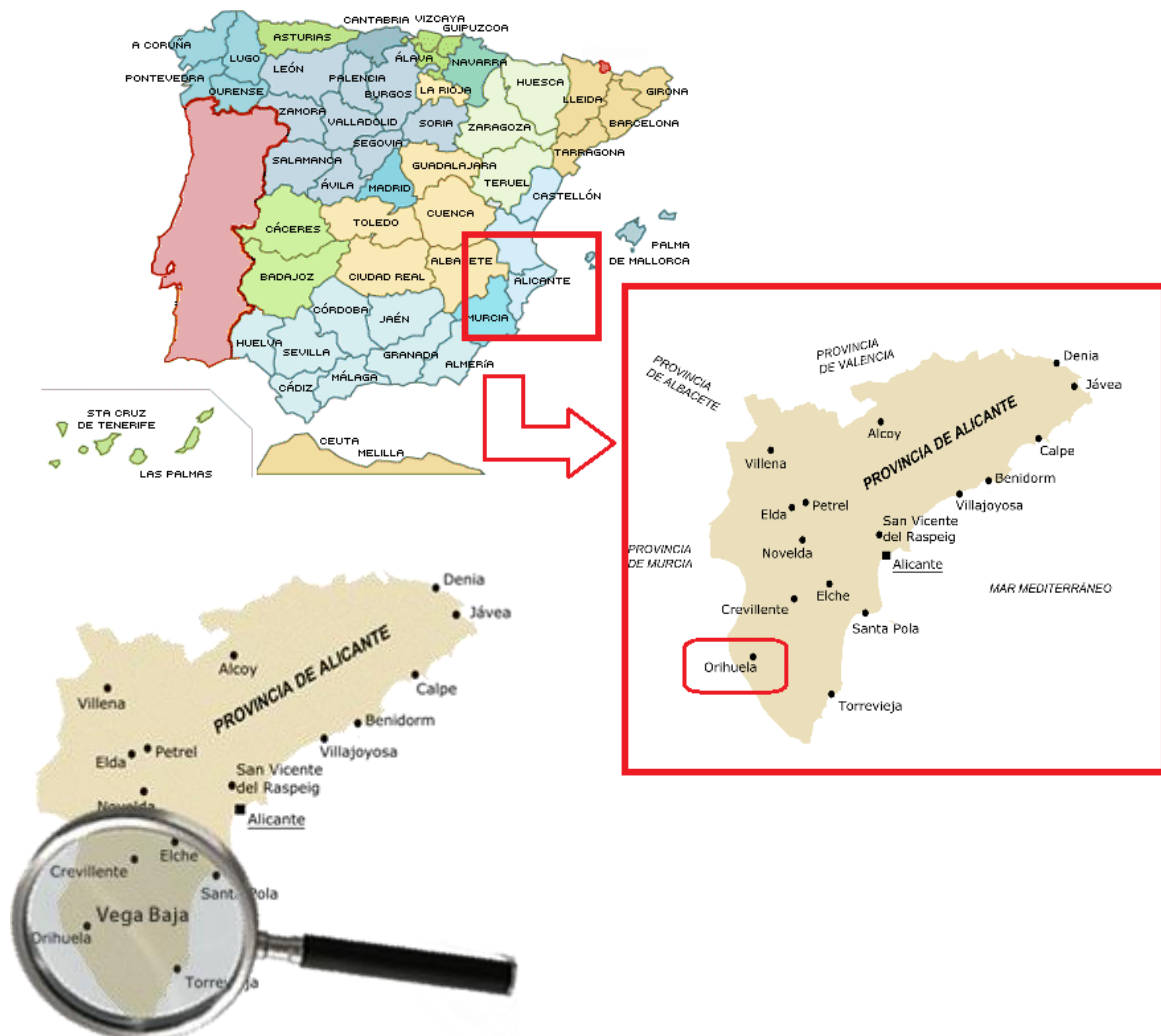


Figura 1 Localización de la Vega Baja del Segura

La comarca de la Vega Baja se corresponde con la zona geográfica de la huerta de Orihuela, la zona de regadío más importante de la provincia de Alicante, y que debe su riqueza a las aguas del río Segura que fertilizan la huerta oriolana.

El clima del sector en el que se incluye la Vega Baja, es el más árido de la Comunidad Valenciana. La sequía estival se prolonga desde la primavera hasta el otoño. El volumen de precipitación media anual en el municipio de Orihuela es de 290 mm/año.

La vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas es muy alta en las lagunas de La Mata, Torrevieja, y el embalse de La Pedrera, debido a que el poder auto-depurador del suelo es nulo; no existe zona no saturada, y cualquier vertido de sustancias contaminantes afecta directamente al agua. La vulnerabilidad del agua subterránea se considera como media en aquellas áreas en las que afloran materiales detríticos permeables o materiales calizos también permeables. En la llanura aluvial del río, que ocupa la mayor parte de la zona, la vulnerabilidad se considera baja ante la mala calidad natural del agua que presenta elevados contenidos en sales.

El área de la Vega Baja ha pasado de tener una economía tradicional sustentada en el sector primario fundamentalmente agrario, a consolidar una base productiva mucho más diversificada, en la que la industria, el turismo y la construcción adquieren gran protagonismo. Con la llegada de los tiempos modernos y los cambios producidos en la segunda mitad del siglo XX, el río Segura fue perdiendo su función de eje vertebrador de las tierras alicantinas que riega para transformarse en una infraestructura hidráulica más, sin interés medioambiental ni, por supuesto, para el uso de la ciudadanía.² Sus gentes fueron volviendo la espalda al río que les había dado la vida y la personalidad convirtiéndolo en una cloaca que acabó logrando el dudoso honor de ser considerado el río más contaminado de Europa.³

La gran masa de agua superficial se encontraba afectada por procesos de eutrofización que degradaban el agua y generaban malos olores. El estancamiento de las aguas, acrecentado por la sequía y las escasas precipitaciones, y la abundancia de nutrientes, propio de una zona con un uso del suelo predominantemente agrario, favorecen el crecimiento de algas y otros microorganismos que, cuando mueren, van al fondo y, en su putrefacción, consumen el oxígeno del agua. Por tanto, las medidas encaminadas a la oxigenación permanente de las aguas y a la inhibición del crecimiento de algas constituyen un complemento esencial para su recuperación ambiental.

Desde el punto de vista ambiental, la contaminación de las aguas no sólo elimina una buena parte de la vegetación y fauna autóctona acuática, sino que también ocasiona desequilibrios generalizados a todo el ecosistema terrestre que de estas masas de agua depende. El exceso de materias orgánicas y nutrientes en el agua (nitrógeno y fósforo) conduce a la eutrofización, agotando el oxígeno disponible de la masa de agua y produciendo la muerte de la mayoría de los seres vivos que habitan en ella.

² García Antón, J.R. (2009).

³ Fuentes Zorita, J.S. (2009).

1.3 Corredor verde de la Vega Baja del Segura

Desde Abril del año 2004, la Confederación Hidrográfica del Segura ha defendido entre sus objetivos prioritarios, el de aprovechar al máximo los fondos europeos destinados a la cuenca, dada la importante oportunidad de inversión en un ámbito muy degradado medioambientalmente y con la necesidad de aprovechar al máximo sus escasos recursos hídricos. Por ello, la propia confederación lleva a cabo un proyecto de actuaciones para el establecimiento de un corredor verde en las riberas de la vega baja del río Segura, con un coste total de 22,3 millones de euros, cofinanciado a través de fondos europeos FEDER (70% de la inversión) y por la Generalitat Valenciana (30% restante). Los objetivos principales de esta actuación han sido la restauración de las funciones geomorfológicas, hidrológicas y ecológicas de los sistemas fluviales degradados y la recuperación paisajística y medioambiental de las riberas del río Segura para facilitar el uso y disfrute de estos espacios por parte de los ciudadanos.

Con el proyecto del «Corredor Verde de la Vega Baja del Segura» se ha logrado devolver el río a los ciudadanos, recobrando su complicidad para no regresar jamás a lamentables situaciones pasadas. Este proyecto, no se ha limitado a realzar su enorme riqueza natural y ambiental, sino también valores culturales y etnográficos que, a lo largo del tiempo, contribuyeron a definir la idiosincrasia de esta hermosa comarca.

Las actuaciones consistieron básicamente en revegetaciones de los sotos con especies de ribera, arbóreas y arbustivas; construcción de infraestructuras hidráulicas de riego para el mantenimiento de vegetación; regeneración de zonas verdes de uso público; ordenación y adecuación de los caminos de servicio; construcción de infraestructuras científicas y didácticas; construcción de infraestructuras turísticas y recreativas; señalización informativa; recuperación e integración de los bienes etnográficos y patrimoniales. Se han creado sendas y caminos con una longitud de 29.567 metros lineales, permitiendo la conexión entre las diferentes áreas recreativas y espacios naturales fluviales, así como 5.226 metros lineales de carril bici. El área de intervención afecta a 28,6 km². El plazo de ejecución total del corredor verde fue de 57 meses, finalizando la última de las obras en julio de 2008.

1.4 Humedales artificiales

Según el Convenio Ramsar, un humedal es una zona de la superficie terrestre que está temporal o permanentemente inundada, regulada por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan. En ellos existe una vegetación acuática denominada “plantas macrofitas”, perfectamente adaptada a tener todos o parte de sus órganos sumergidos en el medio acuoso.

En los humedales crecen y se desarrollan diferentes tipos de vegetales, animales y microorganismos adaptados a estas condiciones de inundaciones. En este tipo de ecosistemas se desarrollan también determinados procesos físicos y químicos capaces de depurar de

manera natural el agua eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo e incluso productos tóxicos como los metales pesados.

Los humedales pueden ser artificiales o naturales en función de si su régimen hidrológico está influenciado o no por la mano del hombre respectivamente. Básicamente, los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales. El estudio de estos procesos y su correcta monitorización y modelación mediante ecuaciones matemáticas, permite la utilización de los humedales artificiales, para depurar las aguas residuales en núcleos de población aislados donde los métodos de depuración convencionales no son una alternativa económica viable.

Los humedales artificiales son tecnologías de tratamiento de aguas residuales simples de operar, con baja producción de lodos residuales y sin consumo energético. No requieren de la adición de reactivos químicos ni de energía externa para airear el agua o recircularla. La infraestructura necesaria para su construcción es muy simple y asequible, su mantenimiento es relativamente fácil y económico. Es una tecnología muy adecuada para ser aplicada en proyectos de restauración ambiental dado que no genera dependencia tecnológica.

Están constituidos por canales poco profundos de menos de 1m, plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre la lámina de agua, el sustrato sólido, los microorganismos y la vegetación. Permiten la oxigenación permanente del agua, la reducción de sólidos en suspensión y de la parte orgánica asociada a ellos, rebajar la DBO y la DQO solubles, disminuir el contenido de fósforo, eliminar microorganismos patógenos y completar el ciclo de eliminación biológica del nitrógeno. Con ello se consigue un nuevo equilibrio ecológico donde el crecimiento de algas y fitoplancton está controlado por la flora y fauna del humedal. Esta tecnología permite combinar un sistema de filtrado biológico natural, con la generación de áreas verdes sobre la superficie del filtro desarrollándose ambas en perfecta armonía.

1.5 Características hidrológicas básicas de los humedales

Desde el punto de vista hidrológico, la característica fundamental de los humedales es que el agua es el medio esencial, aparte del sustrato, de la que, en principio, están saturados. La mayoría de las zonas húmedas tienen el límite superior del suelo saturado por las aguas subterráneas en la misma superficie o muy cerca de ella. La proximidad del nivel piezométrico a la superficie permite el desarrollo de vegetación típica de ambientes húmedos.

Sus características topográficas casi siempre corresponden a zonas de descarga de los sistemas de flujo de las aguas subterráneas del área afectada o de otra de mayor amplitud. La superficie suele ser plana o casi plana con permeabilidad suficiente de las formas geológicas sobre las que se sitúan, de manera que existe un flujo apreciable de las aguas subterráneas hacia los mismos.

Cuando se produce una tormenta o un aguacero, los humedales pueden verse afectados tanto por el aporte directo de agua procedente de la precipitación, como por las avenidas subsiguientes. Se pueden producir los siguientes efectos primarios:

- La subida del nivel de la lámina de agua de un humedal como consecuencia de un aguacero, provoca un aumento temporal de la superficie del humedal, produciendo el encharcamiento de zonas que están secas el resto del año, la inmersión de especies acuáticas que son parcialmente de superficie, el aporte de productos disueltos y la sedimentación de los arrastres.
- En los humedales de ribera, la erosión puede ser muy elevada si la corriente de agua del río que se genera es importante. Los sedimentos arrastrados pueden llegar a modificar las características del sustrato si constituyen una gran masa.
- Por lo que se refiere a las sales disueltas, el aporte será más o menos importante según sean la intensidad de la precipitación, la de la corriente líquida que se genera y las características del suelo en cuanto a la capacidad de disolución de sus componentes.

1.6 Caracterización ecológica de los humedales

Desde el punto de vista ecológico, los humedales son lugares de extraordinario valor ambiental. Su protección está reconocida a nivel nacional e internacional, siendo el hito más significativo el denominado Convenio de Ramsar, surgido a raíz de la Conferencia Internacional sobre la Conservación de las Zonas Húmedas y de las Aves acuáticas celebrada en Ramsar (Irán) en 1971.

La importancia de los humedales radica tanto en sus peculiaridades biológicas, vegetación y fauna especializada, como en las funciones que desempeñan en el ciclo del agua y de la materia orgánica, reciclado de nutrientes, mantenimiento de redes tróficas y estabilización de sedimentos. Tienen un importante papel como depuradoras naturales, contribuyendo al mantenimiento de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales en sistemas de aguas naturales.

En general, un humedal tiene casi siempre sus aguas en condiciones lénticas, en la que la velocidad de desplazamiento del agua es lenta, lo que permite que se realice una serie de procesos físicos (sedimentación), químicos (reducción) y biológicos (fotosíntesis y crecimiento de las plantas) que en aguas lólicas serían inviables.

La profundidad de la capa externa de agua es un factor condicionante de otros muchos, pues el pH tiende a subir a medida que nos acercamos a la superficie. El valor de la temperatura, la luminosidad y la presión de O₂ son más elevados en la superficie. La tensión de CO₂ tiende a subir a medida que nos acercamos al fondo. Los sedimentos orgánicos e inorgánicos tienden a incrementarse al acercarnos al fondo favoreciendo la aparición de una zona anaerobia en el lecho del humedal, necesaria para determinados procesos biológicos tales como la transformación de los nitratos en nitrógeno gas que se escapa a la atmósfera en el proceso de desnitrificación.

Las macrofitas de un humedal constituyen un gran depósito de carbono y nutrientes. Esta situación condiciona a su vez la existencia y las características de las biocenosis existentes, pues aquí participan los factores como la disponibilidad de alimento, que hace que cierta fauna sea más abundante a medida que nos acercamos al fondo, aunque este hecho está influido a su vez por el hábitat y por el biotopo (color, sombra, viento, sustrato básico, pendientes y material de las orillas, etc.).

La luz es un factor limitante de las especies vegetales fotosintéticas, por lo que la profundidad condiciona la existencia de estas a partir del momento en que no puedan aprovechar la luz que necesitan.

Los humedales artificiales no solo permiten mejorar la calidad de las aguas sino que ayudan a producir nuevos ecosistemas naturales que sirven de hábitat para una rica diversidad de organismos vertebrados e invertebrados. Los organismos invertebrados tales como insectos y gusanos contribuyen al proceso de tratamiento, fragmentando y aireando el detritus y consumiendo la materia orgánica. Las larvas de algunos insectos son acuáticas y consumen significativas cantidades de materia durante su crecimiento. Los insectos juegan un papel incuestionable en la cadena trófica, y son alimento de otros organismos superiores, como aves y peces.

Aunque los invertebrados son los organismos más importantes desde el punto de vista del proceso de tratamiento del agua, los humedales artificiales también atraen una gran variedad de anfibios, tortugas, pájaros y mamíferos. El aspecto natural de los humedales artificiales y la disponibilidad de agua y alimento atraen a aves silvestres, que utilizan la vegetación como refugio, redundando en la integración del sistema en el entorno.

1.7 Mecanismos de eliminación de los contaminantes

Los principales mecanismos de eliminación de contaminantes en los humedales son:

- **Eliminación de los sólidos suspendidos:** aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos son eliminados en algún tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, completando la eliminación de los mismos. Las raíces de las macrofitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del lecho del humedal.
- **Eliminación de la materia orgánica:** la eliminación de la materia orgánica tiene lugar principalmente mediante la biodegradación aerobia y anaerobia. Una pequeña porción también es eliminada por procesos físicos como la sedimentación y la filtración cuando la materia orgánica está fijada en los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos. Todos los microorganismos involucrados en este proceso requieren una fuente de energía y

carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. De acuerdo a su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono. En la degradación aerobia, los organismos heterótrofos oxidan los compuestos orgánicos liberando amonio y los autótrofos oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato en el proceso de nitrificación. Debido a la tasa de metabolismo más alta, los heterótrofos son principalmente responsables en la eliminación de la materia orgánica, por lo que, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante.

- **Eliminación de nitrógeno:** la mayor parte del nitrógeno presente en el influente de los humedales artificiales está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de eliminación de nitrógeno en humedales artificiales son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la hidrólisis, seguido por la nitrificación y finalmente la desnitrificación. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibitorias.
- **Eliminación de fósforo:** el fósforo está presente de tres maneras distintas, como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. Los dos últimos requieren una descomposición previa a una forma de ortofosfato más asimilable, y que esté disponible para el metabolismo biológico inmediato. La remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción.
- **Eliminación de patógenos:** la remoción de estos microorganismos se basa en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen la predación y ataque por bacteriófagos y protozoos y también la muerte. Los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas.
- **Eliminación de metales pesados:** los mecanismos para la remoción de metales pesados incluyen adsorción, sedimentación, precipitación química y su asimilación por parte de las plantas. Los metales pueden liberarse durante ciertas épocas del año, generalmente en respuesta a cambios en los potenciales de oxidación-reducción dentro del sistema.

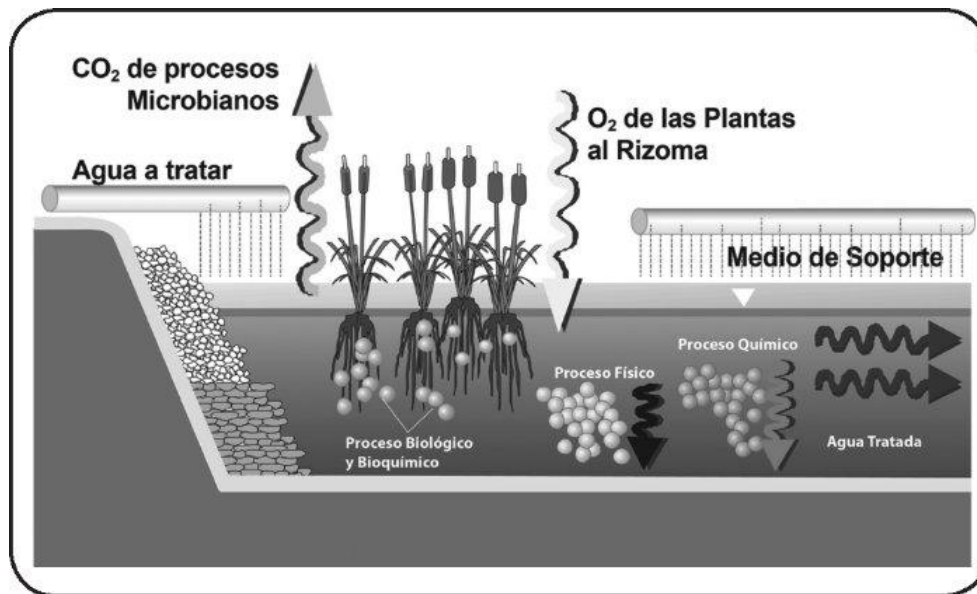


Figura 2 Mecanismos de eliminación de los contaminantes en humedales artificiales

1.8 Tipos de humedales artificiales

Existen diferentes tipos de humedales artificiales en función del sentido de circulación del flujo de agua:

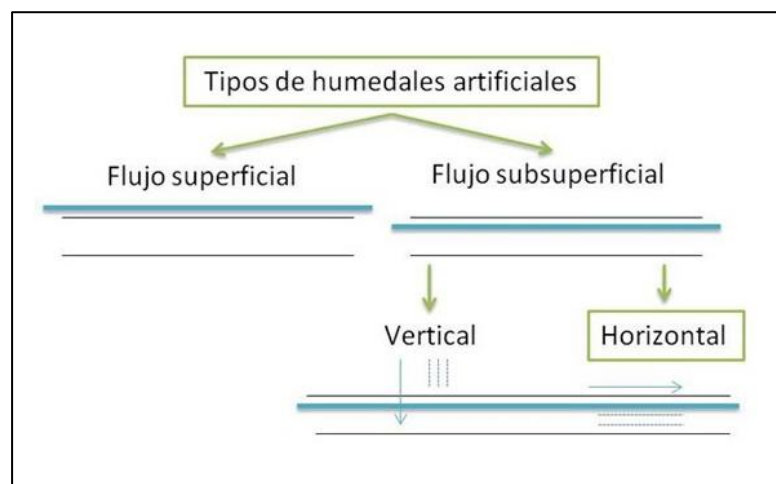


Figura 3 Tipos de humedales artificiales

- **Humedales artificiales de flujo libre o superficial:** el agua circula por encima del sustrato a través de los tallos de las plantas de manera continua. Se favorecen las condiciones aerobias al estar el agua directamente expuesta a la atmósfera. Este tipo

de humedales son una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tiene menor profundidad, no más de 0,6 m, y disponen de vegetación. Se emplean para tratar efluentes procedentes de tratamientos secundarios y para crear o restaurar ecosistemas acuáticos. En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen.

- **Humedales artificiales de flujo subsuperficial:** el agua circula a través del sustrato, con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación emergente se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y las raíces de las plantas. En la mayoría de los casos se usan para el tratamiento de aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2000 habitantes. En función del sentido del flujo de agua, pueden ser horizontales o verticales.
- **Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical:** el agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en el lecho son seguidas de periodos de semisaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La vegetación emergente se planta también en dicho medio granular. Se suelen incluir chimeneas de aireación para favorecer las condiciones aerobias, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. Se suelen desarrollar procesos de nitrificación entre otros. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava en profundidad.

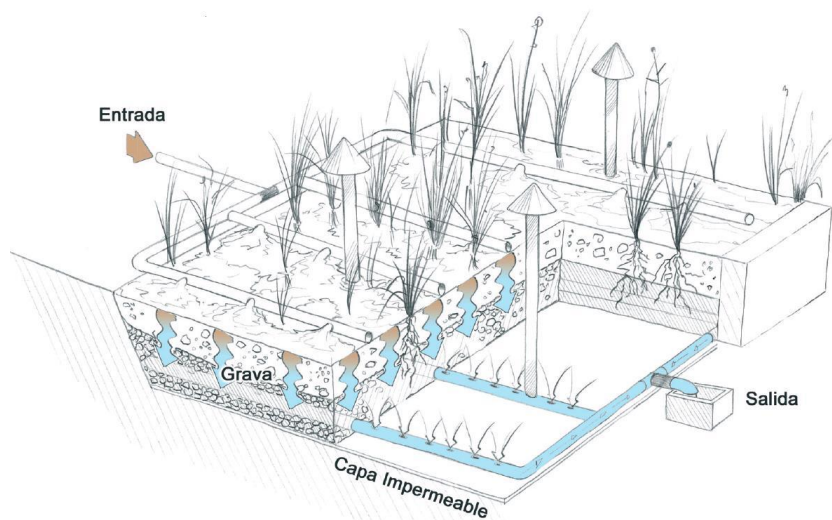


Figura 4 Esquema de funcionamiento de un humedal subsuperficial de flujo vertical

- **Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal:** el agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua. Son los sistemas más utilizados en Europa. El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrofitas acuáticas. Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo. El agua es aplicada permanentemente en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, de entre 3 mm a 32 mm. Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento.



Figura 5 Esquema de funcionamiento de un humedal subsuperficial de flujo horizontal

1.9 Humedales artificiales con macrofitas flotantes

Los humedales artificiales con macrofitas flotantes pertenecen al grupo de los humedales de flujo libre o superficial. Las macrofitas flotantes son especies de plantas típicas de humedales naturales que no soportan sus raíces sobre un sustrato fijo sino que mantienen sus órganos asimiladores flotando sobre la superficie del agua.

Han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia orgánica y sustancias tóxicas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y

mercurio, a través de los diferentes procesos de fitoremediación. De acuerdo con los procesos que tienen lugar para la depuración de contaminantes con macrofitas flotantes se dan a través de tres mecanismos primarios:

- Eliminación de sólidos en suspensión gracias a los fenómenos de filtración y sedimentación de sólidos que tienen lugar entre el sustrato y las raíces.
- Incorporación de nutrientes en plantas y su posterior cosechado.
- Degradación de la materia orgánica por un conjunto de microorganismos facultativos asociados a las raíces de las plantas; y en los detritos del fondo de la laguna.
- Eliminación de patógenos mediante la adsorción sobre partículas del sustrato, la toxicidad producida por las raíces de las plantas y la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

Durante la etapa de crecimiento, las macrofitas absorben e incorporan los nutrientes en su propia estructura a través de las raíces y funcionan como sustrato para los microorganismos que promueven la asimilación de estos nutrientes a través de transformaciones químicas, incluyendo nitrificación y desnitrificación. La densidad y profundidad del medio filtrante (raíces) depende en gran medida de factores como la calidad del agua, temperatura, régimen de cosecha, tareas de mantenimiento, etc.

Los sistemas de macrofitas flotantes, reducen significativamente el paso de la luz solar y restringen la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua. Como consecuencia estos sistemas tienden a permanecer libres de algas y en condiciones anaerobias en el lecho del humedal.

Señalar que la eficiencia en remoción de contaminantes aumenta significativamente en sistemas con aireación y circulación, es decir, en sistemas que operan bajo condiciones aerobias. En este caso, la oxigenación del agua se realiza con el oxígeno que se trasiega por las plantas macrofitas desde sus hojas a las raíces y de éstas al agua. El proceso se inicia, tras el contacto de las hojas con el oxígeno del aire, éste pasa de la superficie de las hojas a los tubos, que están en contacto con ella, en esa zona y de éstos a otros tubos situados a continuación en la dirección descendente, iniciándose de esta manera el descenso del oxígeno de forma continua hasta sus raíces y rizomas.

Tanto la superficie de los tubos como la de las hojas, está formada por una membrana especializada en dejar pasar, de una cara de la superficie a la otra, solamente el oxígeno que contiene el aire. La estructura de la membrana vegetal que han desarrollado es estable y funciona tanto si las hojas están seca, por parada vegetativa en invierno o verdes, dado que la transmisión del oxígeno se realiza por la diferencia de presión isostática de oxígeno entre la superficie de las membranas que constituyen las paredes de los tubos y la superficie de las hojas.

La principal ventaja que ofrecen estos sistemas es la gran superficie de contacto que tienen sus raíces con el agua residual, ya que ésta las baña por completo, lo que permite una gran

actividad depuradora de la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos a dicha superficie o por las raíces directamente. No obstante, la acumulación de bacterias en las raíces de las macrofitas, puede convertir la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso de la cosecha y el mantenimiento.

Las macrofitas emergentes en general tienen un cierto desarrollo en altura y una densidad menor que la unidad, por lo que para lograr la flotación y el desarrollo de este tipo de plantas hay que conseguir que la parte sumergida forme una base de suficiente consistencia y extensión en superficie del agua, según su altura natural, evitando la tendencia al vuelco que tendría una planta aislada. Se utilizan principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos.

1.9.1 Ventajas de los humedales artificiales con macrofitas flotantes

Entre las ventajas específicas de estos sistemas sobre los sistemas de depuración que utilizan macrofitas emergentes enraizadas en un suelo o sustrato son:

- Mayor economía en la construcción, ya que no lleva ningún tipo de relleno de gravas ni sustrato.
- Mayor economía en la implantación y mantenimiento ya que se puede hacer sobre el propio meandro sin tener que vaciarlo.
- Mejor funcionamiento hidráulico por no existir resistencia al paso del agua por colmatación del lecho. Los sólidos suspendidos, una vez retenidos por las raíces de las macrofitas tienden a sumergirse por gravedad, depositándose en el fondo del humedal.
- Mayor economía en el mantenimiento, ya que no existe colmatación y por lo tanto no es necesaria la retirada periódica del lecho de grava junto con las raíces y rizomas causantes de la colmatación.
- Mayor capacidad de depuración por estar todo el sistema radicular bañado por el agua.
- Facilidad de cosechar la totalidad de la biomasa formada (incluidas las raíces y rizomas) en los casos en que se quiera eliminar elementos minerales fijados por las plantas o aprovechar la biomasa formada para fines energéticos o industriales.

1.9.2 Limitaciones de los humedales artificiales con macrofitas flotantes

Generalmente requieren grandes superficies de terreno respecto a los sistemas de depuración convencional. Estos sistemas pueden ser relativamente económicos comparado con otras opciones solo y cuando se disponga de una superficie disponible y asequible para su adquisición.

Las actuaciones pueden ser menos consistentes y de menor rendimiento que los tratamientos convencionales. La eficiencia en los procesos de depuración tiene una sensibilidad muy alta en función de las condiciones ambientales, incluyendo las fuertes lluvias o la sequía.

Los componentes biológicos del proceso son muy sensibles frente a los posibles vertidos ilegales de sustancias tóxicas, como altas cantidades de amonio o pesticidas propios de las zonas agrícolas.

Puesto que las macrofitas flotantes se sitúan sobre la lámina de agua necesitan un caudal ecológico de agua mínimo para sobrevivir. Mientras que los humedales son capaces de tolerar variaciones temporales de los caudales de agua que los atraviesan no son capaces de sobrevivir en condiciones de completa sequía.

Estos sistemas pueden ser un foco emisor de crecimiento de mosquitos, dado que la lámina de agua está por encima del sustrato. Para evitarlo, se recurre a diseños específicos de la configuración del humedal y a predadores naturales de mosquitos.

Finalmente, la capacidad limitada de acumular biomasa obliga a hacer retiros periódicos de las mismas para permitir el crecimiento de las plantas emergentes, y optimizar la captura de algunos componentes del agua residual. Es muy importante controlar la densidad de las raíces de las macrofitas para evitar que con el tiempo, la conductividad hidráulica del canal se vea reducida, modificando las condiciones hidráulicas de diseño inicial respecto al caudal diario depurado. Un manejo inadecuado de la biomasa cosechada puede representar un problema. La acumulación de bacterias en las raíces de las macrofitas, puede convertir la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso de la cosecha.

1.9.3 Aplicaciones de los humedales artificiales con macrofitas flotantes

El filtro de macrofitas en flotación” fue patentado en España con el número P9700706, fecha de antigüedad 4 de abril de 1997, y número de publicación internacional WO 98/45213 con el nombre de: “Procedimiento de depuración de aguas residuales y vertidos contaminantes en base a cultivos de macrofitas emergentes convertidas en flotantes”.

El sistema fue desarrollado por el profesor Doctor Jesús Fernández González, responsable del grupo de agroenergética del departamento de producción vegetal. Dicho departamento pertenece a la E.T.S.I. Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Tras el éxito de los ensayos realizados en el aeropuerto de Barajas, la Universidad Politécnica de Madrid cede en exclusiva los derechos de utilización de la patente en aeropuertos a la empresa AENA y la comercialización para el resto de las aplicaciones a la empresa española Macrofitas S.L. con sede en Madrid. Entre los numerosos campos de aplicación de esta tecnología se encuentra:

- Depuración biológica y terciaria de aguas residuales urbanas.
- Aplicable a ciudades, municipios, pedanías, urbanizaciones, casas rurales, viviendas unifamiliares, industrias, etc.
- Depuración de Lixiviados y Tratamientos de purines.

- Recuperación de Humedales mediante regeneración de ríos y embalses contaminados con eliminación de metales pesados y de sustancias eutrificantes.
- Naturalización de depuradoras de aireación prolongada por Tratamiento terciario “in Situ” de los Vasos (ahorro de energía de hasta el 50%).
- Recuperación de filtros verdes de flujo subsuperficial colmatados.
- Reconversión de los sistemas por lagunaje, a lagunas de aguas naturalizadas.

1.10 Humedales artificiales de flujo subsuperficial

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial, la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0,3 y 0,9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular y a las raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua.

Las principales diferencias de los sistemas de flujo superficial respecto a los superficiales son: admiten mayor carga orgánica, bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos, y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible. Se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales y verticales:

1.10.1 Humedales subsuperficiales de flujo horizontal

En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6gDBO/m²*día. Están compuestos por los siguientes elementos:

Estructuras de entrada y salida: los humedales son sistemas que requieren una buena repartición y recogida de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de entrada y salida deben estar muy bien diseñadas y construidas.

El agua residual procedente de los tratamientos previos se hace llegar hasta una arqueta donde el caudal se divide equitativamente y mediante diversas tuberías se vierte al lecho. Alternativamente se puede hacer llegar el agua hasta un canal con vertedero que la distribuye de forma homogénea en todo el ancho del sistema.

La recogida del agua efluente se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal. Esta tubería conecta con otra en forma de “L” invertida y cuya altura es regulable. Dicha estructura permite modificar el nivel del agua y a su vez drenar el humedal durante operaciones de mantenimiento.

Por lo que respecta al medio granular, en las zonas de entrada y salida se colocan piedras que permiten diferenciar estas zonas de lo que es el medio granular principal. El conjunto medio granular/biopelícula/plantas debe ser considerado como el principal constituyente de los humedales.

El medio granular debe ser limpio (exento de finos), homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. Además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. Diámetros medios de alrededor de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados. Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él. Durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo.

Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento.

1.11 Especies de plantas macrofitas utilizadas en fitodepuración

La adecuada selección de la vegetación en humedales artificiales es parte esencial para el logro de un alto rendimiento en los sistemas de tratamiento. Las especies de plantas usadas variaran según el diseño y los propósitos del humedal y de la calidad del efluente que se requiere tratar, de allí que comprender las necesidades de crecimiento y las características ecológicas de la vegetación a implantar es esencial para el diseño y la operación de los humedales artificiales.

El espectro de especies de plantas macrofitas que se utilizan en fitodepuración no es muy extenso, y en general se restringe a especies típicamente helófitas debido a que los sistemas más extendidos son los de flujo superficial y flujo subsuperficial. En estos sistemas, las especies de plantas más utilizadas son macrofitos emergentes o helófitas, como las enneas (*Thypha* spp.) y el carrizo (*Phragmites australis*) e higrófitos como los juncos (*Scirpus* spp.) típicos de las zonas húmedas. En sistemas estrictamente acuáticos de tratamiento de aguas se utilizan plantas flotantes de flotación libre, como son el Jacinto de agua (*Eichcornia crassipes*) y las lentejas de agua (*Lemna* spp.). En Europa la planta más utilizada es el carrizo, con densidades de plantación de 3 ejemplares por metro cuadrado.



Figura 6 Vista general “Typha spp” y “Phragmites Australis”

La resistencia de la Typha a medios anóxicos y con altos grados de contaminación ha ampliado sus aplicaciones al campo de la fitorremediación, en particular en sistemas de depuración de aguas residuales como los humedales artificiales y sistemas de filtros de macrofitas en flotación. También se estudia su uso como fitoacumulador de metales pesados. Todas estas plantas presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados. Sus tejidos internos disponen de espacios que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas. Sus rizomas tienen una gran capacidad colonizadora. Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son:

Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula. La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación.

Cuando las plantas están desarrolladas reducen la luz incidente sobre el medio granular evitándose así grandes gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar al proceso de depuración amortiguando las variaciones ambientales.

La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, así como las siguientes recomendaciones:

1. Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
2. Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima eliminación de nutrientes.
3. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
4. Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.

5. Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado y que sean propias de la flora local.
6. Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas a tratar.

El crecimiento de las plantas está directamente afectado por altos niveles de cloruro de sodio y otras sales. La absorción de estos compuestos, requieren de un ajuste osmótico de las células en la planta, lo que puede resultar en toxicidad y un desequilibrio en la toma de nutrientes en las mismas. Afecta también la nutrición mineral, interfiere con la toma de cationes esenciales como potasio y calcio, afecta notablemente la germinación de las semillas y la actividad enzimática. La salinidad acumulada se puede transformar en un factor limitante de la distribución y productividad de las plantas. Las altas concentraciones de sal generan alteraciones en el crecimiento vertical y horizontal de la planta lo que está dado por el cierre de los estomas y la subsecuente reducción de la toma de CO₂, lo que se traduce en la inadecuada fotosíntesis y problemas en la captura de iones, evapotranspiración y síntesis de proteínas. Por ello, la selección de plantas con resistencia a la salinidad de alta importancia, puesto que por su naturaleza estos sistemas tienden con el paso del tiempo, a acumular compuestos salinos en el medio de soporte.

1.12 Metodología de cálculo y diseño de humedales artificiales

El dimensionamiento de los humedales artificiales se realiza en dos etapas. En la primera se determina la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico) y en la segunda se establecen las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico).

1.12.1 Dimensionamiento biológico

Para la obtención de las ecuaciones del dimensionamiento biológico se asume un flujo de agua en condiciones uniformes y que los humedales se comportan como reactores biológicos de flujo ideal en pistón en los cuales los contaminantes se degradan siguiendo modelos cinéticos de primer orden.⁴ Por tanto, el balance de masa para un contaminante es:

$$(1) \quad \frac{dC}{dt} = -K_v * C$$

Siendo,

C la concentración del contaminante en mg/L.

K_v la constante cinética de degradación de primer orden, en días⁻¹. El signo negativo en la expresión indica que la concentración de contaminante disminuye a lo largo del tiempo.

⁴ Brix, H. (1994).

Si se integra esta ecuación entre la concentración inicial de contaminante o afluente (C_0 para $t=0$) y la final o efluente (C_1 para $t=t$, siendo este el tiempo de retención hidráulico, en días) se obtiene:

$$(2) \quad \frac{C_1}{C_0} = \exp(-Kv * t)$$

El tiempo medio de retención hidráulico es:

$$(3) \quad TRH = \frac{V}{Q} = \frac{\epsilon * S * h}{Q}$$

Siendo,

V el volumen del humedal, en m^3 .

Q el caudal medio, en $m^3/día$.

ϵ la porosidad, en tanto por uno.

S la superficie del humedal en m^2 .

h la profundidad media del humedal, en m.

Sustituyendo t en las dos ecuaciones anteriores y definiendo una nueva constante cinética de primer orden (Ka , en m/d):

$$(4) \quad Ka = Kv * \epsilon * h$$

$$(5) \quad \frac{C_1}{C_0} = \exp\left(-Ka * \frac{S}{Q}\right)$$

Despejando S:

$$(6) \quad S = \frac{Q}{Ka} * \ln\left(\frac{C_0}{C_1}\right)$$

Esta es la ecuación de diseño recomendada para dimensionar la superficie de los humedales artificiales. Los valores de Q y C_0 se determinan a partir de los estudios de caracterización del afluente y el de C_1 se define a partir de los límites de vertido o los objetivos de calidad ambiental que se pretenden conseguir. El valor de K_a varía según el contaminante. Para eliminar la DBO_5 es adecuado un valor de 0,08 m/d.⁵

⁵ García J., Aguirre P., Mujeriego R., Huang Y., Ortiz L. y Bayona, J.M. (2004).

Si el sistema se dimensiona para eliminar DBO_5 , a la vez también se va a reducir la materia en suspensión de forma suficiente, ya que estos sistemas son más eficaces para eliminar la materia en suspensión que la DBO_5 . Para estimar qué concentración de nitrógeno o de fósforo total va a haber en el efluente se puede utilizar un valor de K_a de 0,025m/d.

Los anteriores valores de K_a son válidos para aguas que llegan al humedal con una marca media o baja con un valor de $DBO_5 \leq 250$ mg/l. Para cargas más elevadas es conveniente reducir el valor de K_a en un 20%.

Para llevar a cabo un buen dimensionamiento es importante plantearse diferentes escenarios en cuanto a caudales y concentraciones, y observar si para la superficie de diseño determinada se cumple con los valores límite de vertido esperados.

Una característica notable de los humedales artificiales es su poca sensibilidad a los cambios de temperatura para eliminar DBO. Numerosos estudios han demostrado que la eficiencia de eliminación de la DBO de los humedales no mejora en verano ni empeora en invierno de forma significativa.⁶ Es por ello que no se propone realizar una corrección para la temperatura mediante la expresión de Arrhenius de los valores de las constantes cinéticas de primer orden.

1.12.2 Dimensionamiento hidráulico

El dimensionamiento hidráulico sirve para determinar las dimensiones del sistema (anchura y longitud) una vez conocida la superficie de tratamiento. El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de la depuración. Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal de flujo de pistón es muy importante realizar un cuidadoso diseño y los métodos constructivos apropiados.

El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales. La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable.

El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la ley de Darcy, que describe el régimen de flujo en un medio poroso, mediante la siguiente ecuación:

$$(7) \quad Q = K_s * A_s * s$$

Siendo,

Q el caudal, en $m^3/día$.

K_s es la conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, en $m^3/m^2*día$.

⁶ Kadlec, R.H. y Knight, R.L. (1996).

As es la sección del humedal, perpendicular a la dirección del flujo, en m².

s es el gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL), en m/m.

La conductividad hidráulica varía en función de la cantidad y del tamaño de los huecos del medio granular utilizado. La conductividad hidráulica con el paso del tiempo se va reduciendo por retención de sólidos y crecimiento de biofilm, especialmente en la zona de entrada. En la siguiente tabla se muestran órdenes de magnitud estimados de la conductividad hidráulica (K_s) para algunos materiales granulares limpios que podrían utilizarse como substrato de estos sistemas.

Tipo de Substrato	Tamaño Efectivo D ₁₀ (mm)	Porosidad (%)	Conductividad Hidráulica K _s (m ³ /m ² *día)
Arenas Graduadas	2	28-32	100-1.000
Arenas Gravasas	8	30-35	500-5.000
Gravas Finas	16	35-38	1.000-10.000
Gravas Medianas	32	36-40	10.000-50.000
Rocas Pequeñas	128	38-45	50.000-250.000

Fuente: Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995).

Los valores de la pendiente que se suelen utilizar varían en el rango de 0,01 a 0,02 m/m.⁷ Valores superiores a 0,02 m/m encarecen los costes de excavación.

La sección del humedal se determina entonces como:

$$(8) \quad A_s = \frac{Q}{K_s * s}$$

El ancho del humedal se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel del agua a tratar:

$$(9) \quad B = \frac{A_s}{h}$$

El largo del humedal se determina en función del ancho y la superficie de tratamiento:

$$(10) \quad L = \frac{S}{B}$$

Siendo,

L la longitud del humedal, en m.

S la superficie del humedal, en m².

B el ancho del humedal, en m.

⁷ Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. y Shutes, R.B.E. (1996).

Fórmula de Manning

En el caso del diseño de los humedales de flujo libre con macrofitas flotantes, el perfil transversal del humedal se compone de dos partes. Una parte superficial, que comprende las macrofitas flotantes y el sistema radicular de las mismas que baña el agua para la remoción de los contaminantes y un hueco libre en profundidad desde dicha plantación hasta el lecho del humedal por donde el agua fluye libremente. Para averiguar el caudal de agua que fluye libremente por esta zona del humedal se calcula primero la velocidad del agua con la fórmula de Manning y posteriormente conociendo la sección del humedal es posible calcular el caudal.

La fórmula de Manning es una evolución de la fórmula de Chézy para el cálculo de la velocidad del agua en canales abiertos y tuberías, propuesta por el ingeniero irlandés Robert Manning, en 1889:

$$V(h) = \left(\frac{1}{n}\right) * Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Siendo,

V(h) = Velocidad media del agua en el canal, en m/sg.

n= Coeficiente de rugosidad de Manning, en tanto por uno.

Rh= Radio Hidráulico, en m.

S= Pendiente de la línea de agua en el canal, en m/m.

El valor del coeficiente de rugosidad es más alto cuanto más rugosidad presenta la superficie de contacto de la corriente de agua. En la siguiente tabla se muestran algunos valores para dicho coeficiente:

Canales Naturales		Llanuras de Inundación	
Limpios y Rectos	0,030	Pasto, Campo	0,035
Fangosos con Piscinas	0,040	Matorrales B. Densidad	0,050
Ríos	0,035	Matorrales A. Densidad	0,075
Meandros	0,035	Árboles	0,150

Fuente: Ven Te Chow, Hidráulica de los Canales Abiertos (1959).

El Radio Hidráulico se calcula en función del área mojada y el perímetro mojado:

$$Rh = \frac{A(h)}{P(h)} = \frac{B * h}{B + 2 * h}$$

Siendo,

$A(h)$ = Área de la Sección del Flujo de Agua, en m^2 .

$P(h)$ = Perímetro Mojado, en m.

B = Anchura del Canal, en m.

h = Profundidad del Canal, en m.

1.13 Ejemplos reales de humedales artificiales

1.13.1 La laguna del molino de la ciudad

El encauzamiento del río Segura provocó la corta de diversos meandros dando lugar a una serie de sotos que, en su mayor parte, fueron revegetados con especies alóctonas a los ecosistemas de ribera o a la vegetación tradicional de las vegas. Este hecho, unido a la profundidad del nivel freático de la superficie, provocó la desaparición de buena parte de la vegetación plantada en su momento y el pobre desarrollo de la que ha persistido, así como la proliferación de plantas ruderales y arvenses.

El primer soto aguas abajo de los tubos del trasvase Tajo–Segura es el conocido como molino de la ciudad, por estar aquí ubicado un molino hidráulico que en su día proporcionó energía eléctrica a la ciudad de Orihuela. En este paraje existe una laguna de aguas permanentes y taludes estabilizados de forma artificial conocida como “La laguna del molino de la ciudad”.

La laguna del molino de la ciudad tiene una superficie aproximada de $5.000 m^2$. Anteriormente de la llegada del proyecto del corredor verde, dicha laguna se encontraba afectada por procesos de eutrofización que degradan el agua y generan malos olores. El estancamiento de las aguas y la abundancia de nutrientes favorecen el crecimiento de algas.

Las medidas propuestas para la recuperación ambiental de la masa de agua superficial de la laguna, consistían en aumentar de manera natural la concentración de oxígeno disuelto en el agua de inhibir el crecimiento de algas y fitoplancton reduciendo la cantidad de sólidos en suspensión y de la parte orgánica asociada a ellos. Por ello, como medida de restauración se instaló un humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.

La zona de filtración de este proceso está constituida por un lecho de gravas, de 100 cm de espesor, que se aísla del terreno mediante la correspondiente base impermeable.

El agua residual se aplica por medio de una red de goteros subterráneos, colocados en el interior de tuberías ranuradas, sobre las gravas, para provocar su percolación a través de las mismas. Una vez alcanzada la base impermeable, el agua residual, ya filtrada, discurre por gravedad hacia los puntos de vertido, almacenamiento o bombeo, para su reutilización en otras superficies.

En todo momento, el lecho de gravas se mantiene no saturado de agua, nunca encharcado, y con aire en continua renovación de oxígeno, lo cual posibilita que las aguas residuales se filtren en condiciones aerobias.

El proceso de renovación del oxígeno del lecho tiene lugar en dos etapas básicas:

- Consumo del O₂, por los microorganismos aerobios, por debajo de los goteros.
- Difusión del O₂ existente por encima de los goteros hacia la zona inferior para equilibrar concentraciones. Se trata de dos zonas en presencia de aire y perfectamente interconectadas.

Este proceso se ve favorecido por:

- El flujo descendente del agua a través del lecho.
- La alta permeabilidad del substrato superior (arenas), que favorece la entrada de aire y la respiración de las raíces del cultivo simbiótico.
- El formato capilar del agua a filtrar. En este sistema no hay que oxigenar una masa de agua, sino una fina película que envuelve los granos de grava, lo cual posibilita un fenómeno de transferencia de oxígeno similar al que tiene lugar en la superficie de la laguna.

La zona de cultivo se sitúa sobre la de filtración descrita y está formada por un substrato arenoso, de unos 30-50 cm de espesor, según la capacidad radicular del cultivo que se desee implantar. Esta zona proporciona un gran valor económico a los terrenos del propio filtro y contribuye de manera eficiente a su rendimiento, ya que:

- Evita la evaporación del agua aplicada.
- Impide la generación de algas.
- Protege a los operarios y usuarios del contacto directo con el agua.
- Absorbe, por capilaridad, una pequeña parte de la humedad generada por la zona inferior para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos implantados.
- Por último y más importante, esta zona de cultivo favorece que el sistema de filtración sea en todo momento aerobio y por ello no presente ninguno de los problemas de fangos o malos olores característicos del tratamiento anaerobio.

Características de la Instalación

La toma de agua del filtro no aprovecha la salida actual de la laguna para evitar su enfangado en las crecidas del río. Esta se ha realizado, junto a la mencionada salida, mediante un pozo de bombeo que conectará con la laguna a una cota 30 cm inferior a la actual salida, siendo protegida mediante grava y la plantación de cañas y carrizo, que actuarán de filtro natural. En este pozo hay instalada una reja, de limpieza manual, y la aspiración la realiza una bomba centrífuga horizontal que constituye la impulsión al pre-tratamiento.

El grupo de bombeo conecta la red de impulsión que transporta el agua desde la toma hasta el pre-tratamiento mediante 160 m de tubería de polietileno de 110 mm y 10 atm.

El pretratamiento se realiza en función de los requerimientos de los goteros que aplican el agua al lecho. Este consiste en un filtro automático de malla, con soporte en acero inoxidable y carcasa en acero al carbono, que proporciona un grado de filtración preciso y fiable, el cual se caracteriza por la eficacia del autolavado de la malla, el bajo consumo de agua, la limpieza con agua filtrada por el propio filtro y el bajo requerimiento de presión.

El lecho simbiótico se sitúa, junto al puente de acceso al molino, en un sector que constituyó la entrada natural de la laguna antes de las obras de encauzamiento del Segura. Se configura, sobre el terreno no excavado, entre paredes de bloques macizos y enlucidos a ambas caras, con mallazo de hierro.

El desagüe se localiza en el lateral norte del lecho, mediante arqueta de obra, que queda dentro la zona impermeabilizada y al pie del muro perimetral del lecho. Esta arqueta conecta, en su extremo meridional con una tubería de polietileno que transporta, por gravedad, el agua tratada hacia la laguna.

1.13.2 Macrofitas en flotación

1.13.2.1 “Macrofitas en flotación en el aeropuerto Madrid-Barajas”

Los primeros ensayos experimentales con macrofitas en flotación se realizó al nivel de demostración, en una plantación de 1.500 m² efectuada en el aeropuerto de Madrid-Barajas, bajo el patrocinio de AENA, con un caudal diario de agua de unos 200 m³, una carga de contaminación media de 700 habitantes-equivalentes y un tiempo medio de retención hidráulica de 6 días. Los valores típicos de depuración de las variables químicas obtenidos a lo largo del año 2001 se reflejan en la Tabla I, y las correspondientes a las variables biológicas en la Tabla II.

Según se puede apreciar, la reducción conseguida, sin ningún tipo de tratamiento previo (excepto un tamizado), fue muy aceptable y cumplió las condiciones de vertido durante todo el año para la DQO y para la DBO₅ durante la primavera y el verano.

En cuanto al nitrógeno y fósforo, si bien sufrieron una reducción considerable, en las condiciones ensayadas no se llegó a la reducción completa de dichos elementos. En cuanto a los microorganismos patógenos, la reducción fue muy aceptable en todas las épocas.

El filtro de macrofitas de Barajas funcionó durante 3 años consecutivos en régimen normal (1999-2002), mostrando una gran eficacia en la eliminación de los contaminantes orgánicos, sólidos en suspensión y microorganismos patógenos, así como la posibilidad de depurar las aguas con glicoles y las aguas de sentinas, siempre que éstas se llevaran previamente a una dilución adecuada.

La reducción media, y las máximas y mínimas mensuales de las distintas variables durante los 3 años que duró la experiencia se indican en la Tabla III.

En cuanto a la reducción media de los microorganismos más importantes de las aguas residuales fue la siguiente:

- Microorganismos Totales: 94,53%
- Coliformes Totales: 93,62%
- Coliformes Fecales: 96,14%

Fecha	Variables Químicas (mg/l)	Influyente	Efluente	Reducción (%)
04/01/01	DQO	260	130	50
	DBO ₅	180	40	78
	Nitrógeno Total	73	32	56
	Fósforo Total	8	4	50
17/05/01	DQO	350	120	66
	DBO ₅	170	25	85
	Nitrógeno Total	54	33	39
	Fósforo Total	7	5	29
30/07/01	DQO	310	90	71
	DBO ₅	175	16	91
	Nitrógeno Total	62	29	53
	Fósforo Total	7	5	29
19/11/01	DQO	287	112	61
	DBO ₅	175	48	73
	Nitrógeno Total	67	39	42
	Fósforo Total	15	8	47

Tabla 1 Valores típicos de la variación de las variables químicas de una EDAR experimental, instalada en Barajas, tras la depuración por el sistema de filtros de macrofitas en flotación. Datos obtenidos durante el año 2011.

Fecha	Cantidad de microorganismos (millones por litro)	Influyente	Efluente	Reducción (%)
21/02/01	Totales	158	6	96.2
	Coliformes totales	62	4	93.5
	Coliformes fecales	41	2	95.1
19/04/01	Totales	146	3.7	97.5
	Coliformes Totales	27	2.5	90.7
	Coliformes fecales	20	0.5	97.5
30/07/01	Totales	283	19	93.2
	Coliformes totales	268	17	93.6
	Coliformes fecales	55	1	98.1
26/11/01	Totales	158	6.1	96.1
	Coliformes totales	92	3	96.7
	Coliformes fecales	69	2.4	96.5

Tabla 2 Valores típicos de la variación de las variables biológicas de una EDAR experimental de macrofitas instalada en Barajas, tras la depuración por el sistema de filtros con macrofitas en flotación

Variables	Reducción media	Reducción máxima		Reducción mínima	
	(%)	(%)	Mes	(%)	Mes
DQO	65.68	88.44	Agosto 01	33.33	Septiembre 02
DBO ₅	80.60	95.47	Junio 01	52.63	Febrero 02
SS	66.40	97.15	Diciembre 01	50	Mayo 02
N-Total	35.85	77.04	Junio 02	12	Febrero 02
P-Total	27.11	53.58	Enero 01	6.27	Mayo 01

Tabla 3 Reducción media, y valores máximos y mínimos mensuales de los distintas variables de depuración obtenidos en la EDAR de macrofitas del Aeropuerto de Barajas durante los 3 años que duró la experiencia

1.13.2.2 Hidrolution FMF®

La empresa Macrofitas S.L. propietaria de la marca HIDROLUTION FMF®, fue constituida en el año 1999 con el fin de implementar, tanto en España, como en el extranjero, el denominado filtro de macrofitas en flotación, comercializado como “Sistema HIDROLUTION FMF®”.

Su estructura de soporte patentado, asegura la total flotabilidad y el perfecto crecimiento de las plantas jóvenes antes de formar completamente el filtro. Las plantas adultas, al tener menor densidad que el agua, flotan sin dificultad cuando los sistemas radiculares de todas las plantas se entrelazan tejiendo una alfombra flotante de raíces sobre el agua.

Los rendimientos alcanzados por esta tecnología son:

Parámetro	Rendimientos Alcanzados
DBO	75-95%
DQO	70-90%
SS	90-95%
Nt	30-70%
Pt	20-60%
Coliformes fecales	2 ud. Log

Los ejemplos más importantes de aplicación de la tecnología Hidrolution en ciudades españolas que se presentan en la siguiente tabla se describen a continuación de la misma:

Ubicación	Provincia	Superficie de instalación
Tábara	Zamora	1950 m ²
Cantalpino	Salamanca	1750 m ²
Polígono Industrial de Lantaron	Álava	400 m ²
Ciudalcampo	Madrid	245 m ²
San Andrés y Sauces	La Palma	200 m ²
Rivas-Ecópolis	Madrid	175 m ²
Langa del Duero	Soria	90 m ²
Torrelodones	Madrid	50 m ²

- Depuradora de macrofitas para población de 2000 habitantes en Tábara

El pueblo de Tábara, se encuentra situado a 44 km de Zamora, a una altitud media de 744 m y abarcando una superficie de unos 112,86 km². La instalación está diseñada para una población objetivo de 2.000 habitantes, un caudal de 400 m³/día y consta de un pretratamiento, compuesto por un pozo de desbaste y un equipo compacto, que realiza las funciones de desarenado, desengrasado y tamizado, tras el que se ejecutó una laguna anaerobia y dos lagunas con sistema de macrofitas flotantes con una superficie total de 1.900 m².



Figura 7 Depuradora de macrofitas en Tábara

- Depuradora de aguas residuales en polígono Industrial de Lantarón

El polígono industrial de Lantarón se encuentra ubicado en la provincia de Álava. En la actualidad, están instauradas trece empresas en esta área industrial de 823.786 m² de superficie. La depuradora de macrofitas flotantes se localiza en la parcela nº 24 de dicho polígono y está diseñada para tratar las aguas residuales sanitarias generadas por las empresas que prestan actividad en esta zona. Para garantizar que en todo momento las aguas residuales que llegan a la instalación sean las consideradas en el diseño técnico de la E.D.A.R y se puedan detectar vertidos incontrolados, la depuradora presenta una serie de equipos electromecánicos como sondas para el control del pH y la conductividad.

La línea de agua está compuesta por un pretratamiento que integra un pozo de desbaste, seguido de un tamizado y un desarenado-desengrasado. Posterior a este tratamiento previo, el agua es derivada hacia un conjunto de balsas de diferente profundidad con 400 m² de superficie total, donde se llevan a cabo los procesos de depuración y descontaminación del agua. El agua tratada es vertida al río Ebro. El caudal de diseño es de 75 m³/día, correspondientes a un total de 375 habitantes, con un volumen de total de agua depurada al año de 27.375 m³/año.



Figura 8 Depuradora de macrofitas en Lantarón

- Depuradora de macrofitas combinada con convencional infradimensionada

Ciudalcampo es una urbanización ubicada dentro del Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares, en los municipios de San Sebastián de los Reyes y Colmenar Viejo. Se encuentra situado a unos 30 km de la capital.

La E.D.A.R de Ciudalcampo fue diseñada y ejecutada en 2008 mediante tecnología convencional, consistente en un pretratamiento, tras el cual el influente es sometido a un tratamiento de aireación prolongada y decantación, con posterior eliminación de nutrientes. Dado el incremento poblacional que esta urbanización sufrió en los años posteriores a la ejecución de la depuradora, comenzó a presentar fuertes deficiencias durante su explotación, generándose incumplimiento de los parámetros de vertido, generación excesiva de fangos y malos olores, elevado consumo energético, entre otros.

Tras 5 años con la implantación de la tecnología de macrofitas flotantes, se ha conseguido mejorar los parámetros de vertido a eliminar, eliminar los malos olores, reducir el consumo energético en al menos el 50% y reducir la generación de fangos.

El nuevo diseño se realizó en 2010 para una población de 5.000 habitantes, consistente en un pretratamiento, seguido por un reactor biológico aireado sobre el que ha sido instalada la tecnología Hidrolution en un total de 244 m² y dos clarificadores. El volumen total de agua depurada es de 598.600 m³/año.



Figura 9 Depuradora de macrofitas combinada con convencional infradimensionada

- Depuradora de macrofitas para 250 habitantes en San Andrés y Saucés

En el año 2015 se ejecuta en el actual municipio de San Andrés y Saucés una depuradora para una población de unos 250 habitantes equivalentes, consistente en un pretratamiento y una balsa de 200 m² de macrofitas en flotación. El volumen de agua depurada al año es de 18.250 m³/año.

Esta depuradora es un claro ejemplo de la versatilidad del sistema y de su adaptación y perfecta armonía con el medio. Para su implantación se emplearon una variedad de planta existente en la isla, cumpliendo así con los requisitos medioambientales necesarios y el respeto a la ecología del lugar.

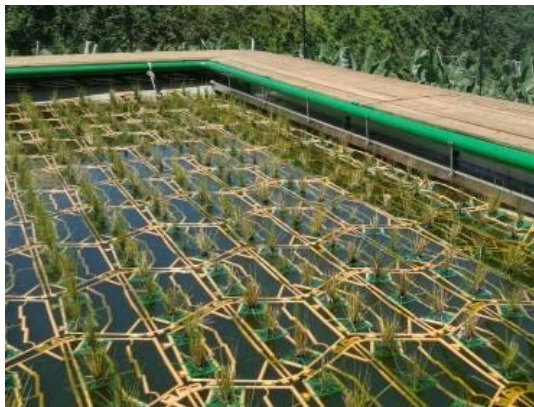


Figura 10 Depuradora de macrofitas en San Andrés y Saucés

- Depuradora combinada de macrofitas en flotación y biodiscos

El término municipal de Langa de Duero está situado al suroeste de la provincia de Soria, lindando con Burgos y Segovia. Esta depuradora se ha ejecutado combinando la tecnología de los biodiscos y las macrofitas en flotación. El sistema Hidrolution sirve de tratamiento primario, tras haber pasado por las rejillas y el tornillo tamiz previo. Posteriormente pasa a los CBR y de ahí a unos clarificadores estáticos desde los que se recircula al tanque Imhoff los fangos generados ya que las plantas macrofitas tienen la propiedad de digerirlos.



Figura 11 Depuradora combinada de macrofitas y biodiscos

- Depuradora de macrofitas en Torrelodones, Madrid

En una finca de la localidad de Torrelodones en Madrid se ha ejecutado una depuradora de macrofitas en flotación en el año 2016 para una vivienda unifamiliar de unos 10 habitantes de ocupación con un volumen de agua depurada de 1.365 m³/año. Los residuos orgánicos generados en los casi 1.000 m² construidos en la finca, serán completamente depurados dentro de los límites de ésta, mediante la tecnología Hidrolution FMF®, el cual se integra en la ornamentación paisajística de la finca, y que estará en conexión directa con el lago artificial que se construirá en la misma, de modo que la propiedad no verterá ningún tipo de residuo fuera de sus límites, reciclándose toda la masa orgánica en materia viva y el agua.



Figura 12 Depuradora de macrofitas para vivienda en Torrelodones

- Depuradora en Parque Rivas Ecópolis

Rivas-Vaciamadrid es un municipio de la Comunidad de Madrid, situado junto a la confluencia de los ríos Jarama y Manzanares, al este de la provincia. El proyecto inaugurado en 2010 en Rivas, bajo el nombre Parque Ecópolis, alberga una escuela infantil. Todos los emplazamientos se disponen en torno a una plaza pública de mucho tránsito, contribuyendo a una planificación urbanística sostenible, con elementos arquitectónicos que permiten el ahorro energético y tecnología que permitan alcanzar en un futuro el objetivo de construir una ciudad con nulas emisiones de CO₂. A este respecto, la depuradora, con la tecnología de macrofitas flotantes en una superficie de 175 m², contribuye positivamente para lograr una ciudad más sostenible, tratando las aguas sanitarias procedentes de la escuela infantil. El agua, una vez depurada, se almacena en una balsa de gravas, que actúa como depósito de riego para las zonas ajardinadas de la plaza. La depuradora trata un volumen total de agua en el entorno de 15 m³/día procedentes de hasta 150 personas, la ocupación media de la escuela infantil.



Figura 13 Depuradora de macrofitas en Parque Rivas-Ecópolis

- Depuradora realizada en 2010 para 1.500 habitantes en Cantalpino

Cantalpino es una localidad ubicada a 3 km de Salamanca, provincia a la que pertenece. El término municipal tiene 81,36 km², limita con la provincia de Zamora y está próximo a las provincias de Valladolid y Ávila.

En 2010, se ejecutó la E.D.A.R actual que procesa un caudal de 270 m³/día. El agua entra en la depuradora pasando primero por un pretratamiento consistente en una reja de gruesos y un tornillo tamiz, desde el cual se bombean las aguas hasta un tanque Imhoff que distribuye la entrada a la balsa de macrofitas en flotación de 1.750 m² de superficie. En momentos puntuales de entrada de agua a la estación depuradora muy contaminada se activa la recirculación del agua depurada en la laguna de macrofitas.



Figura 14 Depuradora de macrofitas para 1500 habitantes en Cantalpino

2. ANTECEDENTES

Uno de los aspectos que puede llamar la atención en la huerta de Murcia es el nombre que tienen en común algunas pedanías. Ese nombre es el de “Rincón”: Rincón de Seca, Rincón de Beniscornia, Rincón de Illanes, Rincón de los Ortuños, de los Mancheños, del Velarde...etc, y así hasta unos diez más en la zona de la huerta de Murcia. El topónimo “Rincón” hace referencia a los antiguos meandros del río Segura. Pues bien, lo curioso es que en algunos de esos rincones no se observa ningún meandro del río, son meandros abandonados, pero abandonados artificialmente.⁸

Esto se debe a las importantes obras hidráulicas del “Encauzamiento del río Segura” realizadas entre los años 1990-1994 en la región de Murcia y en la comarca de la Vega Baja del Segura. Estas obras, responden a un plan elaborado tras una serie de inundaciones entre los años 1986 y 1989 debido al fenómeno de la “gota fría” conocido como “Plan de Defensa contra Avenidas en la cuenca del río Segura”. Los aguaceros producidos por este fenómeno meteorológico producían el desbordamiento del cauce existente, con capacidad para 120 m³/segundo, destruyendo parte de las motas e inundando cultivos, arbolados y poblaciones. El nuevo cauce se diseñó para un caudal de 400 m³/segundo y un período de retorno de 50 años.

Para darnos cuenta de la magnitud de este encauzamiento, señalar que el acortamiento de la longitud del río Segura desde la Contraparada en Murcia hasta su desembocadura en Guardamar de Segura (Alicante) se ha recortado en casi un 29%, pasando de 88 a 63 kilómetros.

El encauzamiento del río Segura provocó el aislamiento de diversos meandros que quedaron abandonados, dando lugar a una serie de sotos que, en su mayor parte, fueron revegetados con especies alóctonas a los ecosistemas de ribera o a la vegetación tradicional de las vegas. Este hecho, unido a la profundidad del nivel freático de la superficie y la permeabilidad de los materiales del cauce, que hacen que dicho tramo de río sea perdedor, provocó la desaparición de buena parte de la vegetación plantada en su momento y el pobre desarrollo de la que ha persistido, así como la proliferación de plantas ruderales y arvenses.

Previo al nuevo encauzamiento, la población de la Vega Baja vivía de espaldas al río por temor a las crecidas, pero enseguida las obras suscitaron curiosidad y una espontánea adhesión, y propiciaron que el urbanismo de ciudades como Orihuela y Rojales se dieran literalmente la vuelta: las nuevas edificaciones aledañas valoraron como fachada principal la que diese al río, cosa impensable en tiempos anteriores. Tan pronto como se iniciaron las obras, su propia dinámica y el interés mismo que despertaban en la gente evidenciaron a la Confederación Hidrográfica del Segura que este proyecto debía ser complementado con proyectos de recuperación ambiental del propio río, lo que tras algunos años, estos ideales serían el origen del corredor verde.

⁸ Sánchez Gómez, G. (2011)

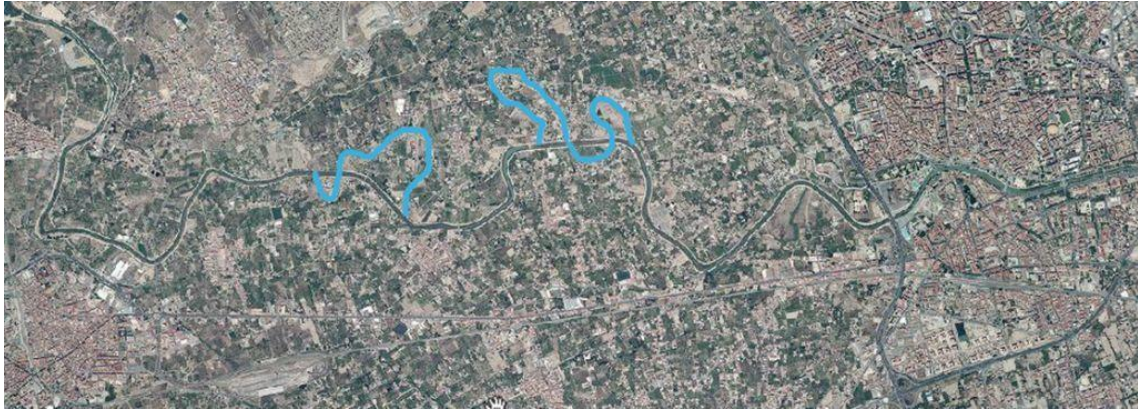


Figura 15 Meandros eliminados tramo Contraparada-Murcia

Entre los numerosos meandros que quedaron abandonados tras el nuevo encauzamiento del río, solo tres de ellos, situados en la provincia de Alicante, preservaron durante algunos años parte de la lámina de agua del río que anteriormente los atravesaba.

En Junio del año 2002, la Generalitat Valencia los incluye en el “Catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valenciana” de la Consellería de Medio Ambiente, en el grupo de ambientes fluviales y litorales asociados. Para preservar estos humedales naturales, el terreno donde se encuentran se declara con una clasificación urbanística predominante de “Suelo no Urbanizable Protegido”.

Sus nombres son meandro “Las Norias”, meandro de “Jacarilla” y meandro de “Algorfa”. Están situados en los términos municipales de Orihuela, Jacarilla y Algorfa respectivamente, ocupando una extensión total de 9,1 ha. Los tres meandros tienen un modo de alimentación epigénico, es decir, que ocurre cerca de la superficie de la tierra.

Los tres meandros se encuentran dentro de la influencia de un mismo acuífero que recorre toda la llanura aluvial del Segura desde Murcia hasta su desembocadura, conocido como acuífero de la vega media y baja del Segura.

En régimen natural, la alimentación de estas zonas húmedas sería subterránea aunque desde hace varios años el meandro de “Las Norias” y el meandro de “Jacarilla” han vuelto a ser conectados al río mediante un azud y una presa flotante. Esto permite en época de lluvias torrenciales desviar parte del caudal circulante del meandro por el actual cauce evitando así desbordamientos.

Únicamente el meandro de “Algorfa” se ha quedado seco dada la permeabilidad de los materiales del suelo adyacentes que ha hecho que sea un tramo de río perdedor y la descarga por evapotranspiración.

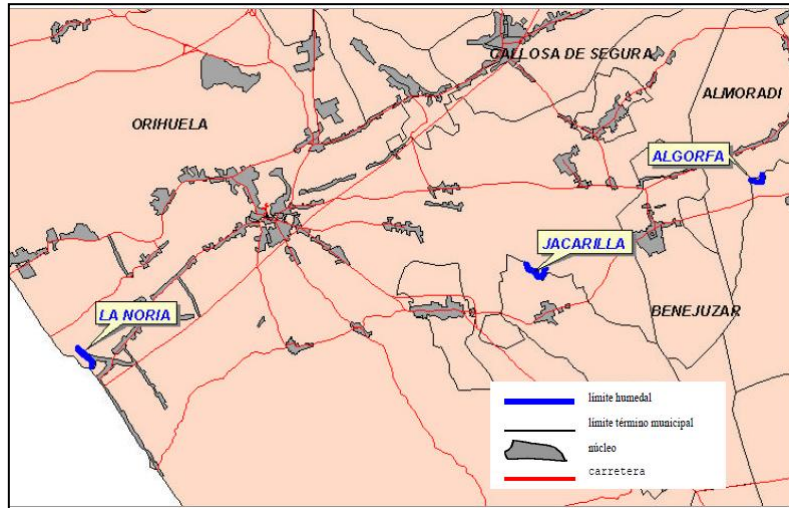


Figura 16 Localización general de los meandros

Meandro “Las Norias”

El meandro “Las Norias” tiene una longitud total de 1450 m y está localizado próximo a la localidad de Beniel. Se encuentra ubicado en la frontera limítrofe de Murcia con la Comunidad Valenciana. La primera mitad del meandro pertenece a la región de Murcia y la otra mitad a la provincia de Alicante.



Figura 17 Localización del meandro "Las Norias"

En Diciembre de 2006 comienzan las actuaciones del corredor verde en el mismo. Se llevan a cabo tareas de control de la vegetación existente, con eliminación de aquellos pies de especies invasoras e indeseables especialmente cañota y la realización de una plantación para la recuperación ambiental del entorno. En los sotos del entorno se ha incrementado la plantación ya existente con especies autóctonas y se ha dotado de un sistema de riego automático que asegure la permanencia del parque con el menor gasto posible de mantenimiento.

En el tramo final del meandro está ubicado “El Azud de las Norias”. Tras el encauzamiento y rectificación del río, este azud quedaba dispuesto de forma paralela al eje longitudinal del río y fuera del mismo. Para que el azud pudiera seguir funcionando se realizó un bypass. Se conservó el actual meandro de la Norias, donde se quedaban el azud y la toma de las acequias, y se conectó por sus dos extremos al nuevo cauce.

En el actual cauce del río, entre las conexiones de entrada y de salida del meandro se dispuso una presa hinchable, que provoca la elevación de la cota del agua desviándola del cauce nuevo hacia el meandro, pasando por el azud y devolviéndola nuevamente al cauce nuevo. Así, los caudales pequeños habituales son derivados por el meandro y las avenidas mayores pueden proseguir su curso río abajo sin pasar por aquél.



Figura 18 Azud presa hinchable Beniel

En los dos laterales del azud se sitúan dos antiguas norias denominadas “Moquita y Pando”. Moquita está documentada desde el siglo XIV y se le supone un origen islámico. Al siglo XVIII se remonta la construcción del azud actual y las obras de sillería que sostiene a las dos norias. De madera en origen, fueron sustituidas en el siglo XIX por otras de hierro. Las norias gemelas constituyen la primera toma de aguas del sistema de riegos de la Vega Baja del Segura, beneficiándose gracias a ellas más de dos mil tahullas, aunque en la actualidad han sido sustituidas por motobombas. Están compuestas por dos ruedas de tracción hidráulica de casi 9 m de diámetro. Sirven para la elevación del agua a dos importantes acequias que toman las agua en el azud que hay instalado en las mismas. Estas son las acequias de la Alquibla y de la Molina.



Figura 19 Vista general noria “Moquita” y vista general “Azud de las Norias”

Meandro “Jacarilla”

El meandro de “Jacarilla”, con los sotos que lo componen y otros terrenos anexos, ocupa una extensión de más de 120.000 m². Tiene una longitud a lo largo de su cauce de 800 m. Actualmente tiene una conexión de entrada de agua directamente del río Segura mediante un azud, además de alimentarse de los excedentes de agua procedentes del “Desagüe de la Pedrera”, que aporta agua para los cultivos agrícolas de la zona.

Esta zona, de gran influencia humana, acusaba un gran deterioro ambiental, pues en años pasados estaba siendo utilizada como escombrera. Las labores principales realizadas en el antiguo meando del río se iniciaron en Enero de 2007 y han sido de limpieza, acondicionamiento y revegetación. Se eliminó la vegetación alóctona y se hicieron plantaciones lineales en las motas del cauce. Se ha creado un humedal artificial y se ha rehabilitado el azud que hay en la entrada al propio meandro. Se ha integrado una pasarela que permite la conexión y el disfrute ciudadano de los sotos rehabilitados a una y otra margen del río además de llevar a cabo un protocolo de balizamiento y señalización de la zona.



Figura 20 Localización meandro "Jacarilla"



Figura 21 Vista general meandro "Jacarilla"

En mitad del meandro, desemboca en el mismo una importante acequia de la zona conocida como “Acequia del Derramador” o “Desagüe de la Pedrera”. Esta acequia comenzó a usarse en el año 1997. Conecta el embalse de la Pedrera con el río Segura. La cuenca receptora de sus aguas para su posterior utilización como agua de riego es de 64 km². Es propiedad del estado español y contiene una estación de aforos en su tramo final antes de verter al meandro. Dado que la acequia vierte sus aguas de manera perpendicular al flujo del agua en el meandro, el talud que hay enfrente de la entrada de agua al meandro se ha reforzado con hormigón para evitar su erosión.



Figura 22 Desembocadura del desagüe de la pedrera en el meandro de "Jacarilla"

Meandro “Algorfa”

El meandro de “Algorfa” está situado en el término municipal de Algorfa limitando con los de Almoradí, Benejúzar, Benijófar, Los Montesinos, Orihuela y Rojales. Su desconexión del cauce actual del río Segura y la presencia de materiales muy permeables en la zona anexa al mismo, han contribuido a que este antiguo tramo de río sea perdedor y que con el paso de los años haya llegado a secarse completamente. A día de hoy, en el soto que forma el meandro con el propio río está ubicada la depuradora de Algorfa propiedad de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales.

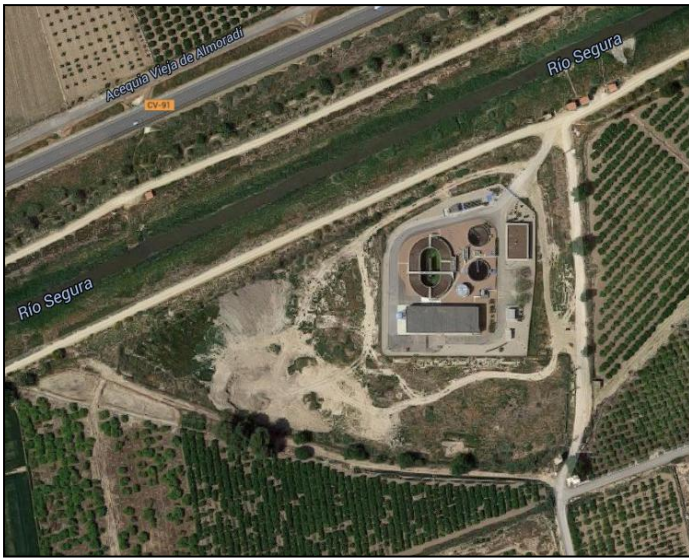


Figura 23 Vista aérea meandro "Algorfa"

3. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo final de máster, es mejorar la calidad de las aguas del río Segura a su paso por la comarca de la Vega Baja, mediante la aplicación de los humedales artificiales, en los antiguos meandros del río Segura.

Nuestro objeto de estudio son tres antiguos meandros del río Segura que fueron desconectados del cauce actual debido a las obras de encauzamiento realizadas entre los años 1990 y 1994.

Con el fin de alcanzar el objetivo propuesto, se han realizado una serie de actividades:

1. Recopilación de información acerca de los diferentes tipos de humedales artificiales existentes y sus diversas aplicaciones.
2. Recopilación de información relacionada con los antiguos meandros del río Segura, sus antecedentes y su situación actual.
3. Búsqueda de datos de caudales y concentraciones de contaminantes orgánicos en el agua del río Segura en diversos puntos de aforo y control físico-químicos de la Confederación Hidrográfica del Segura.
4. Búsqueda de información acerca de las especies vegetales macrofitas utilizadas en fitodepuración y de sus respectivos rendimientos en la remoción de contaminantes.
5. Diseño de los humedales en base a una metodología de cálculo expuesta en la introducción.
6. Finalmente, en base a todo lo anterior, el establecimiento de unas conclusiones del trabajo realizado.

4. DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Las tareas llevadas a cabo para el diseño de los humedales se describen a continuación:

- Selección del emplazamiento

Seleccionar el lugar apropiado para la localización de los humedales puede reducir significativamente los costes energéticos de los bombeos. La localización de los meandros en la propia ribera del río Segura, lo más cercano posible a la masa de agua a tratar y dada su topografía, con una ligera pendiente del 0,5%, permite que el agua circule por gravedad, evitando el consumo energético de bombeos auxiliares y vertiendo el efluente directamente de nuevo al cauce.

La exposición del humedal a la luz solar es total, mejorando el rendimiento del crecimiento de las plantas del humedal y del proceso de fotosíntesis. El acceso a la zona de tratamiento es el adecuado para posteriores labores de mantenimiento o limpieza del humedal y está conectado con las poblaciones cercanas al meandro.

- Estimación del caudal de agua a tratar

Para poder realizar un buen dimensionamiento y diseño de cualquier sistema de depuración, es necesario disponer de datos de cantidad y calidad de las aguas a tratar. Es muy importante hacer una campaña de búsqueda de puntos de aforo y de control del río Segura que estén localizados cerca de los meandros y de posibles acequias o canales que viertan sus aguas en los mismos.

El objetivo de ello, es la medición aproximada de cuál será el caudal a tratar por los humedales y la caracterización físico-química del agua derivada de las analíticas realizadas en un laboratorio. Los caudales y las concentraciones determinan las cargas contaminantes para los que se debe diseñar los humedales.

- Estimación de la carga contaminante

La Confederación Hidrográfica del Segura empezó a realizar el control de la calidad de las aguas en el año 1979. Desde entonces, las redes de control de calidad de las aguas han ido evolucionando notablemente, aumentando progresivamente los puntos de control y el número de variables analizadas para dar respuesta a las necesidades que van surgiendo y adaptarlas a la normativa en vigor.

En diciembre del año 2000 se aprueba la Directiva Marco del Agua, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. De esta manera, se establecieron los principios básicos de una política de aguas sostenible en la Unión Europea, contribuyendo así a alcanzar los objetivos de conservación, mejora y protección de la calidad del medio ambiente, a la utilización prudente y

racional de los recursos naturales y basándose en el principio de cautela y de "quien contamina, paga".

Uno de los cambios más destacados y recientes, ha sido la adaptación de las redes de control existentes a las obligaciones de la Directiva Marco del Agua, a lo recogido en su artículo 8, en el que figura el establecimiento de programas de seguimiento y control del estado de las masas de agua superficiales, subterráneas y de las zonas protegidas en cada demarcación hidrográfica antes del año 2007.

Con el objetivo de controlar la calidad de las aguas en la cuenca del río Segura, la confederación dispone de un total de 251 puntos de control que se integran en las diferentes redes de seguimiento. De estos 251 puntos de control se han seleccionado tres de ellos cercanos a los meandros. En ellos se realizan analíticas de tipo físico-químico tomando muestras integradas de agua en el cauce del río Segura. Los tres pertenecen al grupo "Encauzamiento río Segura, desde Reguerón a desembocadura" con el código de masa de agua superficial "ES0702080116".

Las series históricas de los datos físico-químicos obtenidos de la confederación están comprendidos en un intervalo de duración de 5 años desde el año 2011 hasta 2016. Todos los valores de las analíticas se encuentran presentados en el anexo I ordenados desde la fecha de mayor antigüedad a los valores más recientes. Las variables sobre las cuales se ha buscado información son: DQO, DBO₅, fósforo total, amonio, nitratos, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, conductividad y temperatura del agua.

Los valores medios de dichas variables analizadas en los tres puntos de muestreo son:

DQO	16-17 mgO ₂ /l	Nitratos	2,34-4,70 mgN/l
DBO₅	8 mgO ₂ /l	Sólidos Suspendidos	73-81 mg/l
Fósforo Total	0,63-0,72 mgP/l	Oxígeno Disuelto	5,84-7,62 mgO ₂ /l
Amonio	0,98-1,47 mgP/l	Conductividad	1698-2269 μS/cm

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura

De estos datos se deduce que el principal problema contaminante a solventar de las aguas del río Segura a su paso por la Vega Baja es la gran cantidad de nutrientes principalmente en forma de amonio y de fósforo total y los sólidos suspendidos.

En cada uno de los apartados de diseño de los humedales se muestra una tabla resumen de cuál es el valor medio estimado de cada parámetro como valor representativo de la carga contaminante del agua influente en el humedal. La información acerca de estos puntos de muestreo se muestra a continuación:

Punto de Muestreo “Beniel”	
Código	SE0913A064
Municipio	Beniel
Provincia	Murcia
Coordenadas UTM	X-675.043 Y-4.213.244 Huso 30- Datum ED50



Figura 24 Mapa de situación, ortofoto y foto del entorno punto de muestreo Beniel

Punto de Muestreo “Puente Benezúzar”	
Código	SE0914A068
Municipio	Benezúzar
Provincia	Alicante
Coordenadas UTM	X-689.654 Y-4.217.561 Huso 30- Datum ED50

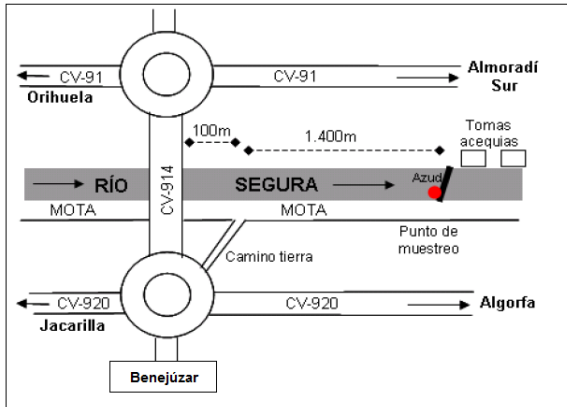


Figura 25 Mapa de situación, ortofoto y mapa de localización

Punto de muestreo “Presa Alfeitamí”	
Municipio	Benejúzar
Provincia	Alicante
Coordenadas UTM	X-690.981 Y-4.217.905 Huso 30-Datum ED50

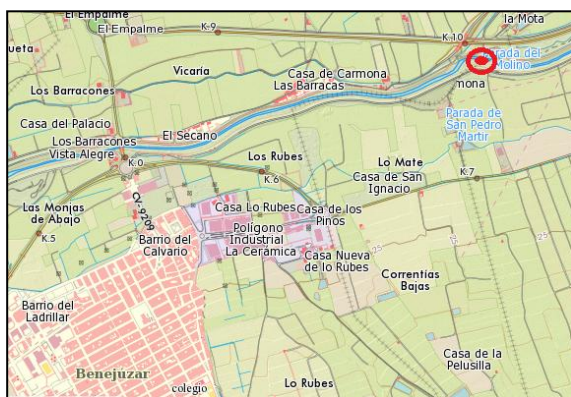
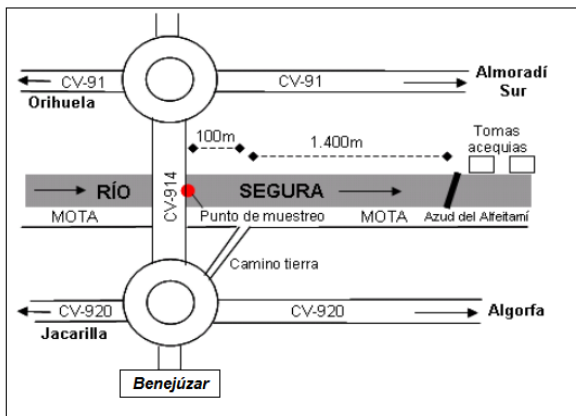


Figura 26 Mapa de situación, ortofoto, mapa de localización y foto del entorno

Dimensionamiento

El dimensionamiento de los humedales artificiales que se muestra en los siguientes apartados lo he realizado siguiendo la metodología de cálculo y diseño que se expone en el apartado 1.11 de la Introducción. Generalmente, primero se calcula la superficie de tratamiento necesaria conocido un determinado caudal a tratar y el porcentaje de remoción de los contaminantes esperado y posteriormente se realiza el dimensionamiento hidráulico para determinar las dimensiones geométricas del sistema.

Sin embargo en este caso, el dato de partida es la superficie de tratamiento disponible, que viene condicionada por las dimensiones geométricas del meandro donde se va a instalar el humedal. Por lo tanto, sólo debe realizarse el dimensionamiento biológico para estudiar en dicho humedal de dimensiones ya predefinidas, qué porcentaje de remoción de los contaminantes se producirá. El caudal a tratar en el humedal vendrá también condicionado por las dimensiones geométricas disponibles en el humedal, la conductividad hidráulica de las raíces de las macrofitas y la pendiente del meandro.

En los meandros de la Vega Baja del río Segura, la gran cantidad de los depósitos fluviales y el trabajo agrícola han determinado una llanura casi total, con una pendiente media al 0,5 por mil.

En cuanto a la conductividad hidráulica, a día de hoy no he encontrado ningún estudio científico que valore la conductividad del agua a través de las raíces de las macrofitas flotantes por lo que he decidido adoptar un valor de $10.000 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$. Relacionando este valor con los valores de conductividad hidráulica usados en las gravas de los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial correspondería a una porosidad del 36 al 40% por lo que he optado por considerar como valor de diseño una porosidad del 38%. Para mantener este valor de conductividad y evitar que el humedal se colmate se debe realizar un correcto mantenimiento y cosechado las raíces del humedal.

Finalmente, debe de tenerse en cuenta que el tipo de aguas que se van a tratar en estos humedales artificiales, no son aguas residuales urbanas propiamente dichas, sino aguas naturales de un río, por lo que puede existir una cierta variabilidad en los valores de los coeficientes de degradación de primer orden (K_a) de los diferentes contaminantes que suelen usarse para las anteriores.

4.1 Meandro “Las Norias”

4.1.1 Dimensionamiento hidráulico

El meandro de “Las Norias” tiene la función de servir como canal de desvío de las aguas del río Segura de su cauce actual hasta el Azud de las Norias. El funcionamiento hidráulico de las Norias “Moquita y Pando” que hay actualmente instaladas en dicho azud, se ha substituido por motobombas instaladas en la margen derecha del meandro aguas arriba del azud para elevar el agua a las Acequias de la Alquibla y de la Molina para su uso posterior en las huertas de regadío. Por lo tanto, en primera instancia, el diseño hidráulico del humedal debe ser tal que permita que el tratamiento biológico sea compatible con las actuales necesidades de riego que demanden los regantes de la zona, evitando así problemas sociales con los regantes.

Para la estimación del caudal de agua demandado por los regantes se ha seleccionado una estación de aforos de la Confederación Hidrográfica del Segura, ubicada en el cauce del río cerca de la localidad de Beniel, situada inmediatamente aguas arriba del meandro. No he encontrado datos reales relativos al caudal de agua demandado por los regantes. Por esta razón he decidido estimar el caudal de riego en un 60% del caudal medio diario que atraviesa dicha estación de aforo. De esta manera, en las épocas de regadío, el diseño del humedal sería el suficiente para la remoción de los contaminantes y en la situación contraria o en caso de avenidas, la presa flotante permite regular el caudal que entra el meandro dejando pasar el caudal excedente por el cauce habitual del río, sin desbordar el humedal.

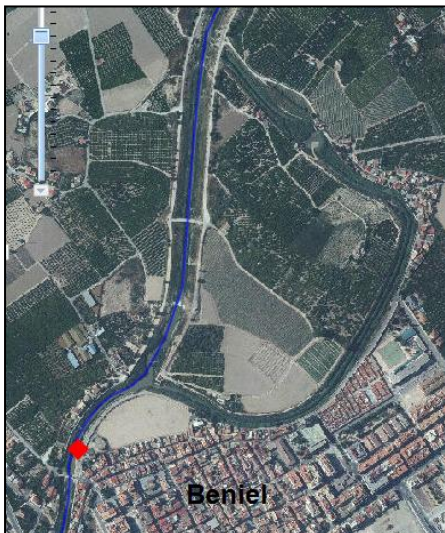


Figura 27 Punto de aforo de caudal “Beniel”

Para la serie de datos históricos de caudales he tomado un intervalo de tiempo de 5 años. La fecha de comienzo es el 1 de Abril de 2011 y la fecha de fin el 1 de Abril de 2016. Se han tomado mediciones de caudales diarios durante los 5 años. La extensa base de datos que conforma la serie histórica, la hace inadecuada para su presentación en tablas por lo que se adjunta una tabla con un resumen del valor medio anual de cada uno de los años:

Fecha	Valor Medio	Unidades
2011	376.770	m ³ /día
2012	257.135	m ³ /día
2013	329.274	m ³ /día
2014	273.365	m ³ /día
2015	304.262	m ³ /día
2016	244.656	m ³ /día
Media Histórica	297.577	m ³ /día

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura

Alternativa 1

El caudal de riego que atraviesa el meandro será por tanto:

$$Q_{riego} = Q_{histórico} * 0,6 = 297.577 * 0,6 = 178.546 \text{ m}^3/\text{día}$$

El caudal restante que circulará por el cauce actual será por tanto:

$$Q_{cauce} = Q_{histórico} - Q_{riego} = 297.577 - 178.546 = 119.031 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 1,377 \frac{\text{m}^3}{\text{sg}}$$

Después de calcular el caudal re-direccionado por el meandro, debe comprobarse que el desvío del agua por el mismo no tenga consecuencias medioambientales para el tramo del actual cauce del río Segura del cual se ha privado dicho caudal de agua. Para ello se utiliza un indicador de caudales ecológicos.

De acuerdo con la instrucción de planificación hidrológica, el régimen de caudales ambientales se establecerá de modo que permita mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición. Durante la elaboración del plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Segura 2009-2015 se ha llevado a cabo un procedimiento para la definición de un caudal ambiental en cada una de las masas estratégicas definidas en el ámbito territorial de la cuenca. El meandro de las Norias se corresponde con la siguiente masa de agua superficial:

Masa		Régimen de Caudales Mínimos (m ³ /sg)				
Código	Nombre	Oct-Dic	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sep	Media
ES0702080116	Encauzamiento río Segura, desde Reguerón a desembocadura. Tramo Beniel-San Antonio	1,1	1,2	1,1	0,6	1

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura

Como el caudal de diseño del humedal, tiene que ser el mismo durante todos los meses del año para conseguir unas condiciones homogéneas, escogemos como valor de caudal ecológico mínimo el más restrictivo de ellos, es decir $1,2 \text{ m}^3/\text{sg}$.

De esta manera, se comprueba que el diseño de reparto de caudales es correcto.

$$Q_{cauce} \geq Q_{ecologico} = 1,377 \frac{\text{m}^3}{\text{sg}} \geq \frac{1,2 \text{ m}^3}{\text{sg}}$$

El perfil transversal de los humedales con macrofitas flotantes se compone de dos partes, una parte superficial de 0,6 m que comprende el sistema radicular de las macrofitas flotantes que baña el agua para la remoción de los contaminantes y un hueco libre de 0,45 m de profundidad hasta el lecho del meandro por donde el agua fluye libremente. La profundidad de las raíces de las macrofitas flotantes viene condicionada por la especie de vegetación que se va a implantar. En cuanto a las dimensiones geométricas del meandro, la superficie de tratamiento disponible es de 4500 m^2 , siendo la longitud del humedal de 1000 m y el ancho de 4,5 m.

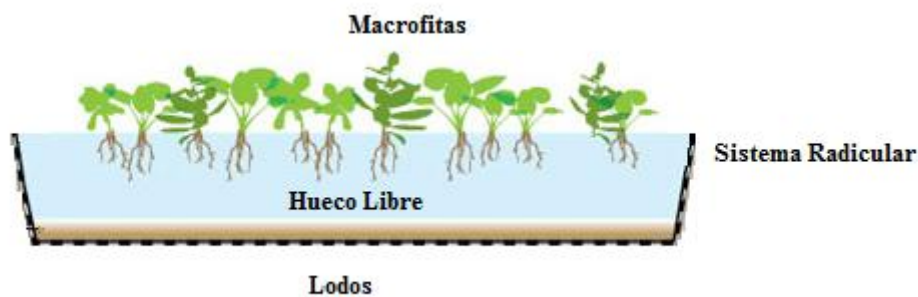


Figura 28 Perfil transversal humedal macrofitas flotantes

Por esta razón el cálculo de los caudales que atraviesa el humedal debe realizarse en dos etapas. La primera es calcular el caudal de agua que fluye libremente bajo la superficie de las macrofitas a través del hueco libre y en una segunda etapa el caudal de agua que atravesará el sistema radicular de las macrofitas flotantes. Únicamente este último volumen de agua es el que será tratado por el humedal, siendo el anterior un instrumento hidráulico para que las macrofitas floten y no enraícen en el lecho del humedal.

1º Fase

Conociendo las dimensiones geométricas del meandro, la pendiente del humedal en cuestión y el coeficiente de rugosidad, aplicando la fórmula de Manning obtenemos una velocidad del agua de $1,051 \text{ m}/\text{sg}$. Los datos de cálculo se muestran en la tabla:

n=0,035	Rh=0,375 m	Am=2,025 m ²	Pm=5,4 m
s=0,005	h=0,45 m	B=4,5 m	

El caudal de agua que fluye libremente bajo la superficie de las macrofitas es de:

$$Q_{libre} = V(h) * A(h) = 1,051 \frac{m}{sg} * 2,025 m^2 = 183.813 m^3/día$$

Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico medio del agua será:

$$TRH = \frac{A(h) * L}{Q} = \frac{2,025 m^2 * 1000 m}{183.813 \frac{m^3}{día}} = 0,011 días = 15,9 minutos$$

2º Fase

Conociendo el ancho del humedal (B), la profundidad (h), la conductividad hidráulica del sistema radicular de las macrofitas flotantes (K_s), el gradiente hidráulico del meandro (s), y la porosidad de las raíces (ϕ), aplicando la ley de Darcy que gobierna el movimiento del agua en un medio poroso podemos obtener el caudal de agua que será tratado por el humedal:

$$Q_{tratamiento} = K_s * s * A_s = 10.000 \frac{m}{día} * 0,005 \frac{m}{m} * 2,7 m^2 = 135 m^3/día$$

Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico medio del agua será:

$$TRH = \frac{A(h) * L * \phi}{Q} = \frac{2,7 m^2 * 1000 m * 0,38}{135 \frac{m^3}{día}} = 7,6 días$$

Alternativa 2

El diseño hidráulico en la alternativa 1 contempla la necesidad de compatibilizar la acción depuradora del humedal artificial junto con la correcta provisión de agua de regadío para los regantes en el Azud de las Norias. Sin embargo, la velocidad de la lámina de agua que fluye por debajo de las macrofitas flotantes con un valor de 1,051 m/sg y un TRH de 15,9 minutos, penaliza gravemente el efecto de filtración y sedimentación de los sólidos suspendidos de agua influente.

La tipología de sólidos suspendidos presentes en las aguas del río Segura a tratar, es fundamentalmente fitoplancton, por lo que la velocidad del agua en el interior del humedal no debe de ser superior a 0,3 m/sg. Éste es el valor típico de diseño usado en tratamientos primarios para la eliminación de arenas como los desarenadores sin que sedimenten los SS.

Si aplicamos de nuevo la fórmula de Manning variando la profundidad de la lámina de agua libre de vegetación siguiendo este criterio de velocidad, obtenemos que para una profundidad de 6 cm la velocidad es de 0,3 m/sg. Siendo los datos de cálculo:

n=0,035	Rh=0,058 m	Am=0,27 m ²	Pm=4,62 m
s=0,005 m/m	h=0,06 m	B=4,5 m	

El caudal de agua que fluye libremente bajo la superficie de las macrofitas es de:

$$Q_{libre} = V(h) * A(h) = 0,3 \frac{m}{sg} * 0,27 m^2 = 0,082 \frac{m^3}{sg} = 7.098 m^3/día$$

Por lo tanto, el caudal total que atraviesa el meandro es:

$$Q_{total} = Q_{libre} + Q_{tratamiento} = 7.098 \frac{m^3}{día} + 135 \frac{m^3}{día} = 7233 m^3/día$$

4.1.2 Calidad del agua

La estimación de la carga contaminante en el meandro “Las Norias” se fija con la media histórica de los valores de las analíticas de la Confederación Hidrográfica del Segura en el punto de control superficial “Beniel”. Los valores resumen se muestran en la siguiente tabla:

DQO	17 mgO ₂ /l	Sólidos Suspendidos	81 mg/l
DBO₅	8 mgO ₂ /l	Oxígeno Disuelto	7,62 mgO ₂ /l
Fósforo Total	0,72 mgP/l	Conductividad	1698 μS/cm
Amonio	1,47 mgN/l	T° Invierno	15,4 C°
Nitratos	2,34 mgN/l	T° Verano	22,7 C°

Teniendo en cuenta que el caudal de tratamiento son 135 m³/día, las cargas contaminantes del agua en dicho meandro en kg/día son:

DQO	2,3 kgO ₂ /día	Amonio	0,198 kgN/día
DBO₅	1,08 kgO ₂ /día	Nitratos	0,316 kgN/día
Fósforo Total	0,097 kgP/día	Sólidos Suspendidos	10,94 kgSS/día

Conociendo el caudal de agua a tratar (Q), la constante cinética de degradación de primer orden (K_a), la superficie de tratamiento (S) y la concentración orgánica contaminante (C₁), podemos estimar la calidad del efluente de salida (C₀) en cuanto a las variables de DBO₅, Amonio, y Fósforo:

VARIABLES	K_a	C₀	C₁	% Reducción
DBO ₅	0,08 m/día	8 mgO ₂ /l	0,556 mg/l	93,05 %
Amonio	0,025 m/día	1,47 mgN/l	0,639 mg/l	56,53 %
Fósforo	0,020 m/día	0,72 mgN/l	0,370 mg/l	48,68 %

Haciendo el mismo cálculo anterior pero en base a la carga contaminante obtenemos:

VARIABLES	K_a	Carga C. Inicial	Carga C. Final	% Reducción
DBO ₅	0,08 m/día	1,08 kgO ₂ /día	0,08 kgO ₂ /día	93,05 %
Amonio	0,025 m/día	0,198 kgN/día	0,086 kgN/día	56,53 %
Fósforo	0,020 m/día	0,097 kgP/día	0,05 kgP/día	48,68 %

Teniendo en cuenta que el caudal medio diario histórico del actual cauce del río Segura a su paso por la población de Beniel donde se encuentra el meandro de “Las Norias” es de 297.577 m³/día y que el caudal de tratamiento del humedal es de 135 m³/día con una concentración menor de contaminantes, la concentración esperada en el río será la mezcla de concentraciones de ambas:

VARIABLES	Concentración Inicial	Concentración Final
DBO ₅	8 mg/l	7,997 mg/l
Amonio	1,47 mg/l	1,4696 mg/l
Fósforo	0,72 mg/l	0,7198 mg/l

Haciendo el mismo cálculo anterior pero en base a la carga contaminante obtenemos:

VARIABLES	Carga Contaminante Inicial	Carga Contaminante Final
DBO ₅	2380,62 kgO ₂ /día	2379,54 kgO ₂ /día
Amonio	437,44 kgN/día	437,24 kgN/día
Fósforo	214,26 kgP/día	214,16 kgP/día

4.2 Meandro “Jacarilla”

4.2.1 Dimensionamiento hidráulico

Para la estimación del caudal de agua que atraviesa el meandro de “Jacarilla” se ha seleccionado una estación de aforos de la Confederación Hidrográfica del Segura, ubicada en la desembocadura de la acequia del derramador en el meandro. Se han tomado mediciones diarias de caudal en m^3 en un intervalo de tiempo de 5 años desde el 1 de Abril de 2011 hasta el 1 de Abril de 2016. La extensa base de datos que conforma la serie histórica, la hace inadecuada para su presentación en tablas en el anexo por lo que se adjunta una tabla con un resumen del valor medio anual de cada uno de los años:

Fecha	Valor Medio	Unidades
2011	219.840	$m^3/día$
2012	184.635	$m^3/día$
2013	232.215	$m^3/día$
2014	212.389	$m^3/día$
2015	199.362	$m^3/día$
2016	178.324	$m^3/día$
Media Histórica	204.461	$m^3/día$

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura

Alternativa 1

En la alternativa 1, el humedal se diseñará de tal manera que permita acoger toda el agua que la acequia del derramador vierte en el meandro de “Jacarilla”.

Al igual que en el caso del meandro “Las Norias”, el perfil transversal del humedal tiene dos partes, una parte superficial de 60 cm que comprende las macrofitas flotantes y el sistema radicular de las mismas que baña el agua para la remoción de los contaminantes y un hueco libre de 0,45 m de profundidad hasta el lecho del meandro por donde el agua fluye libremente. En cuanto a las dimensiones geométricas del meandro, la superficie de tratamiento disponible es de $4000 m^2$, siendo la longitud del humedal de 800 m y el ancho de 5 m.

1º Fase

Conociendo las dimensiones geométricas del meandro, la pendiente del humedal en cuestión y el coeficiente de rugosidad, aplicando la fórmula de Manning obtenemos una velocidad del agua de 1,062 m/sg. Los datos de cálculo se muestran en la tabla:

n=0,035	Rh=0,381 m	Am=2,25 m^2	Pm=5,9 m
s=0,005	h=0,45 m	B=5 m	

El caudal de agua que fluye libremente bajo la superficie de las macrofitas es de:

$$Q = V(h) * A(h) = 1,062 \frac{m}{sg} * 2,25 m^2 = 206.538 m^3/día$$

Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico medio del agua será:

$$TRH = \frac{A(h) * L}{Q} = \frac{2,25 m^2 * 800 m}{206.538 \frac{m^3}{día}} = 0,009 días = 12,5 minutos$$

2º Fase

Conociendo el ancho del humedal (B), la profundidad (h), la conductividad hidráulica del sistema radicular de las macrofitas flotantes (K_s), el gradiente hidráulico del meandro (s), y la porosidad de las raíces (ϕ), aplicando la ley de Darcy que gobierna el movimiento del agua en un medio poroso podemos obtener el caudal de agua que será tratado por el humedal:

$$Q_{tratamiento} = K_s * s * A_s = 10.000 \frac{m}{día} * 0,005 \frac{m}{m} * 3 m^2 = 150 m^3/día$$

Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico medio del agua será:

$$TRH = \frac{A(h) * L * \phi}{Q} = \frac{3 m^2 * 1000 m * 0,38}{150 \frac{m^3}{día}} = 6,1 días$$

Alternativa 2

Como en el caso del meandro de “Las Norias”, una velocidad de la lámina de agua que fluye por debajo de las macrofitas flotantes con un valor de 1,062 m/sg y un TRH de 12,5 minutos, penaliza gravemente el efecto de filtración y sedimentación de los sólidos suspendidos de agua influente.

Si aplicamos de nuevo la fórmula de Manning variando la profundidad de la lámina de agua libre de vegetación siguiendo el criterio de velocidad de la lámina de agua no superior a 0,3 m/sg, obtenemos que para una profundidad de 6 cm la velocidad es de 0,3 m/sg. Siendo los datos de cálculo:

n=0,035	Rh=0,059 m	Am=0,3 m ²	Pm=5,12 m
s=0,005 m/m	h=0,06 m	B=5 m	

El caudal de agua que fluye libremente bajo la superficie de las macrofitas es de:

$$Q_{libre} = V(h) * A(h) = 0,305 \frac{m}{sg} * 0,3 m^2 = 0,091 \frac{m^3}{sg} = 7900 m^3/día$$

Por lo tanto, el caudal total que atraviesa el meandro es:

$$Q_{total} = Q_{libre} + Q_{tratamiento} = 7900 \frac{m^3}{día} + 150 \frac{m^3}{día} = 8050 m^3/día$$

4.2.2 Calidad del agua

La estimación de la carga contaminante en el meandro “Jacarilla” se fija con la media histórica de los valores sacados de las analíticas de la Confederación Hidrográfica del Segura en los puntos de control superficial “Puente Benejúzar” y “Presa Alfeitami”. Dichos puntos de muestreo se ubican entre los meandros de “Jacarilla” y “Algorfa” por lo que la carga contaminante estimada podrá ser utilizada indistintamente para el diseño de los dos humedales. La media de cada uno de las variables se ha realizado con los datos conjuntos de los dos puntos de muestreo:

DQO	16 mgO ₂ /l	Sólidos Suspendidos	73 mg/l
DBO₅	8 mgO ₂ /l	Conductividad	2269 µS/cm
Fósforo Total	0,63 mgP/l	Oxígeno Disuelto	5,84 mg/l
Amonio	0,98 mgN/l	T° Invierno	14,9 C°
Nitratos	4,70 mgN/l	T° Verano	22,4 C°

Teniendo en cuenta que el caudal de tratamiento son 150 m³/día, las cargas contaminantes de dicho meandro en kg/día son:

DQO	2,16 kgO ₂ /día	Amonio	0,13 kgN/día
DBO₅	1,08 kgO ₂ /día	Nitratos	0,63 kgN/día
Fósforo Total	0,09 kgP/día	Sólidos Suspendidos	9,86 kgSS/día

Conociendo el caudal de agua a tratar ($Q_{tratamiento}$), la constante cinética de degradación de primer orden (K_a), la superficie de tratamiento (S) y la carga orgánica contaminante (C_1), podemos estimar la calidad del efluente de salida (C_0) en cuanto a las variables de DBO₅, Amonio, y Fósforo.

Variabes	K_a	C₀	C₁	% Reducción
DBO ₅	0,08 m/día	8 mg/l	0,948 mg/l	88,15 %
Amonio	0,025 m/día	0,98 mg/l	0,503 mg/l	48,70 %
Fósforo	0,02 m/día	0,63 mg/l	0,37 mg/l	41,35 %

Haciendo el mismo cálculo anterior pero en base a la carga contaminante obtenemos:

Variables	K_a	Carga C. Inicial	Carga C. Final	% Reducción
DBO ₅	0,08 m/día	1,08 kgO ₂ /día	0,128 kgO ₂ /día	88,15 %
Amonio	0,025 m/día	0,13 kgN/día	0,067 kgN/día	48,70 %
Fósforo	0,020 m/día	0,09 kgP/día	0,053 kgP/día	41,35 %

Dado que no he encontrado un punto de aforo de caudal del actual cauce del río Segura cercano al meandro de Jacarilla, he decidido adoptar que el caudal de tratamiento de 150 m³/día con una concentración menor de contaminantes se mezcla con el caudal de agua que vierte la acequia del derramador en el propio meandro que son 204.461 m³/día. La concentración esperada en el río será la mezcla de concentraciones de ambas:

Variables	Concentración Inicial	Concentración Final
DBO ₅	8 mg/l	7,994 mg/l
Amonio	0,98 mg/l	0,979 mg/l
Fósforo	0,63 mg/l	0,629 mg/l

Haciendo el mismo cálculo anterior pero en base a la carga contaminante obtenemos:

Variables	Carga Contaminante Inicial	Carga Contaminante Final
DBO ₅	1635,70 kgO ₂ /día	1634,95 kgO ₂ /día
Amonio	200,37 kgN/día	200,28 kgN/día
Fósforo	128,81 kgP/día	128,75 kgP/día

4.3 Meandro “Algorfa”

A día de hoy, el meandro de Algorfa no tiene una lámina de agua existente a la vista, por lo que el uso de un humedal de flujo libre con macrofitas flotantes no es una opción viable. Por esta razón he decidido instalar un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. Al contrario que en los dos meandros anteriores, el efluente ya tratado por el humedal no verterá sus aguas directamente al río Segura sino que servirá para recuperar una antigua cantera de áridos, transformándola en una laguna artificial en el interior del soto que forma el meandro con el propio río, que constará también pero en menor medida que los anteriores, de la plantación de macrofitas flotantes con el objetivo de darle también en esta zona una belleza paisajística y una lámina de agua accesible que no proporciona el propio humedal subsuperficial.

El ciclo hidrológico de este sistema termina con la descarga del agua de la laguna en el río por filtración en los materiales permeables sobre los que se sitúa y la pérdida por evaporación de la misma permitiendo la renovación del agua de la laguna que fluye a través del humedal subsuperficial.

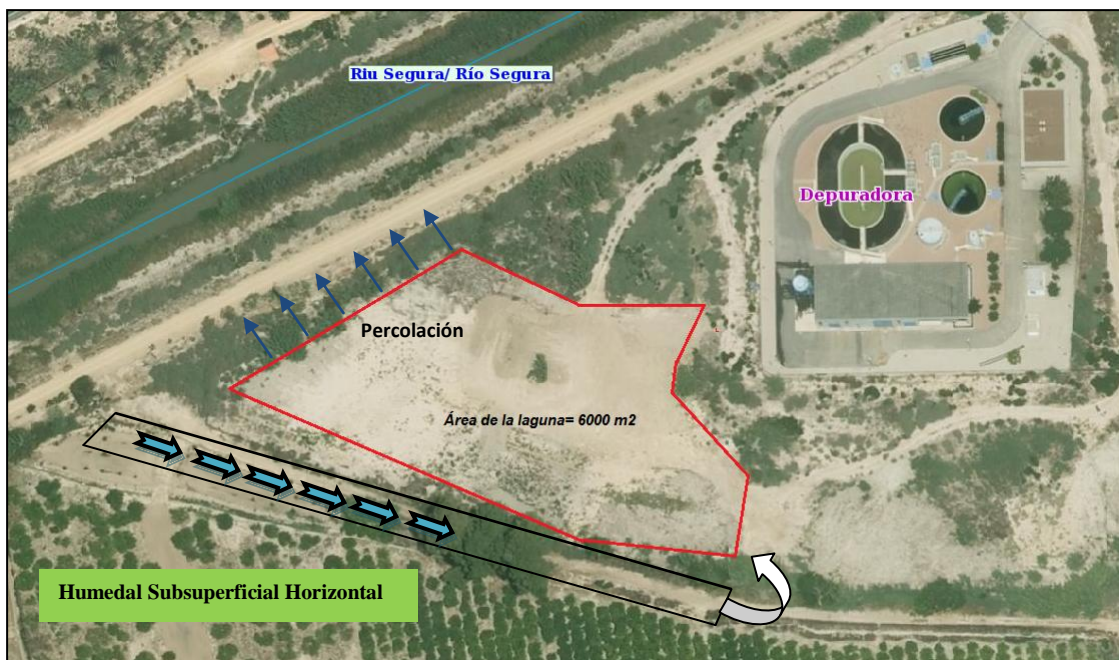


Figura 29 Esquema de funcionamiento humedal del meandro “Algorfa”

4.3.1 Dimensionamiento hidráulico

La laguna artificial tendrá aproximadamente una superficie inundada de agua de 6.000 m². El terreno donde se ubicará la laguna está formado por rocas detríticas del cuaternario con una permeabilidad alta en torno a unos valores de permeabilidad del suelo de 10 a 100 m/día. La permeabilidad de dichos materiales permite que el agua de la laguna artificial percole en el

terreno hasta volver de nuevo al río. La pendiente entre dicha superficie y el río es muy pequeña por lo que se adoptará un valor del 1 por mil.

Por tanto, la selección del caudal de agua a tratar en el humedal artificial, debe ser tal que permita mantener la laguna con un determinado nivel de agua pero sin desbordarse. Para ello debe realizarse un cálculo hidrológico de que caudal de agua se filtra hacia el río en la superficie que ocupa la laguna.

El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{max} = K_s * A_s * S = 100 \frac{m}{día} * 6000 m^2 * 0,001 \frac{m}{m} = 600 \frac{m^3}{día}$$

$$Q_{min} = \frac{10m}{día} * 6000 m^2 * \frac{0,001m}{m} = 60 m^3/día$$

Siendo,

Q_{max}, Q_{min} el caudal máximo y mínimo filtrado respectivamente, en m³/día.

K_s la conductividad hidráulica del suelo en el que se ubica la laguna en m/día.

A_s la sección de la laguna perpendicular a la dirección del flujo, en m².

S el gradiente hidráulico (dH/dL), en m/m.

El caudal que filtrará hacia el río en la superficie de la laguna comprende un intervalo entre 60 y 600 m³/día, por lo tanto, el caudal a tratar por el humedal tiene que estar comprendido dentro de este intervalo.

La superficie de tratamiento disponible es de 1800 m², con una longitud de humedal de 180 m y un ancho de 10 m. La profundidad de las raíces de las macrofitas es de 0,6 m y viene condicionada por la especie de vegetación que se va a implantar. En cuanto a la conductividad hidráulica he decidido escoger el valor de 5000 m³/m²*día que se corresponde con las gravas finas con una porosidad del 0,35.

Conociendo el ancho del humedal (B), la profundidad (h), la conductividad hidráulica del sistema radicular de las macrofitas flotantes (K_s), el gradiente hidráulico del meandro (s), y la porosidad de las raíces (ϕ), aplicando la ley de Darcy que gobierna el movimiento del agua en un medio poroso podemos obtener el caudal de agua que será tratado por el humedal:

$$Q_{tratamiento} = K_s * s * A_s = 5000 \frac{m}{día} * 0,005 \frac{m}{m} * 6 m^2 = 150 m^3/día$$

Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico medio del agua será:

$$TRH = \frac{A(h) * L * \phi}{Q} = \frac{6 \text{ m}^2 * 180 \text{ m} * 0,35}{150 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 2,52 \text{ días}$$

El desnivel entre la cota de entrada del agua en el río y la salida a la laguna artificial es:

$$\text{Desnivel (m)} = s * L = 0,005 \frac{\text{m}}{\text{m}} * 180\text{m} = 0,9 \text{ m}$$

Siendo,

s es el gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL), en m/m.

L la longitud del humedal, en m.

4.3.2 Calidad del agua

Los valores de la concentración de contaminantes en el agua del río Segura que atravesará el meandro de “Algorfa” son los mismos que para el meandro de “Jacarilla”, dado que ambos comparten los mismos puntos de muestro. Los valores se presentan en la siguiente tabla:

DQO	16 mgO ₂ /l	Sólidos Suspendidos	73 mg/l
DBO₅	8 mgO ₂ /l	Conductividad	2269 μS/cm
Fósforo Total	0,63 mgP/l	Oxígeno Disuelto	5,84 mg/l
Amonio	0,98 mgN/l	T° Invierno	14,9 C°
Nitratos	4,70 mgN/l	T° Verano	22,4 C°

Teniendo en cuenta que el caudal de tratamiento son 150 m³/día, las cargas contaminantes de dicho meandro en kg/día son:

DQO	2,16 kgO ₂ /día	Amonio	0,13 kgN/día
DBO₅	1,08 kgO ₂ /día	Nitratos	0,63 kgN/día
Fósforo Total	0,09 kgP/día	Sólidos Suspendidos	9,86 kgSS/día

Conociendo el caudal de agua a tratar (Q), la constante cinética de degradación de primer orden (K_a), la superficie de tratamiento (S) y la carga orgánica contaminante (C₁), podemos estimar la calidad del efluente de salida (C₀) en cuanto a las variables de DBO₅, Amonio, y Fósforo:

Variables	K_a	C_0	C_1	% Reducción
DBO ₅	0,08 m/día	8 mg/l	3,063 mg/l	61,71 %
Amonio	0,025 m/día	0,98 mg/l	0,726 mg/l	25,92 %
Fósforo	0,020 m/día	0,63 mg/l	0,4956 mg/l	21,3 %

Haciendo el mismo cálculo pero en base a la carga contaminante en kg/día obtenemos:

Variables	K_a	Carga C. Inicial	Carga C. Final	% Reducción
DBO ₅	0,08 m/día	1,08 kgO ₂ /día	0,415 kgO ₂ /día	61,71 %
Amonio	0,025 m/día	0,13 kgN/día	0,096 kgN/día	25,92 %
Fósforo	0,020 m/día	0,09 kgP/día	0,071 kgP/día	21,3 %

Perfil transversal

El agua residual que ingresa al sistema debe mantenerse en un nivel inferior a la superficie (5cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento. Esta primera capa está formada por sustrato orgánico que sirve para separar la fase acuosa del exterior. De esta forma, el perfil tranversal del humedal quedaría de la siguiente manera:

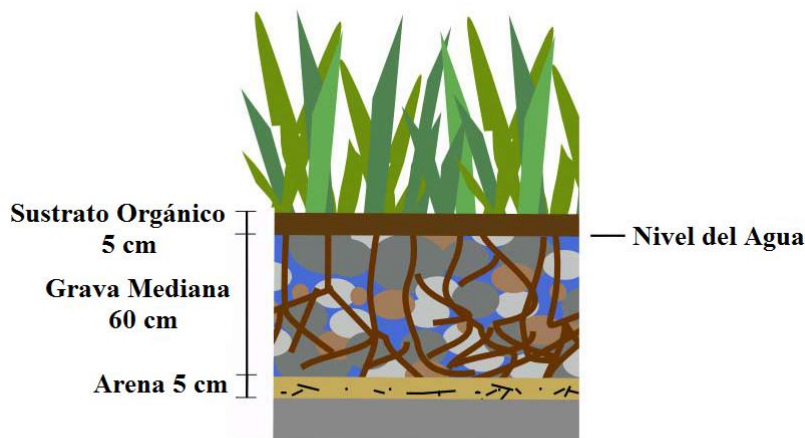


Figura 30 Perfil transversal humedal artificial meandro Algorfa

4.4 Mantenimiento y operación

4.4.1 Plantación de especies vegetales

La especie vegetal macrofita a implantar en los tres humedales es la “*Scirpus spp.*” o comúnmente conocida como junco. Pertenece a la familia de las ciperáceas. Es una planta perenne que crece en grupo en aguas costeras, interiores salobres y humedales. Crecen bien en agua desde 5 cm hasta 3 m de profundidad. Es una planta de clima templado que prospera en posiciones soleadas, tolerando un amplio rango de pH (4-9). La temperatura media óptima para su desarrollo está dentro del intervalo de 16 C° a 27C°. Es resistente a la salinidad hasta una concentración máxima de 20 ppt.

Tiene una epidermis muy delgada a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes y tejidos; grandes espacios intercelulares que forman una red de conductos huecos en los que se almacenan y circula el aire con oxígeno. Esto permite la transferencia de oxígeno desde el aire y órganos fotosintéticos y desde ahí a las raíces.

El junco tiene rizomas, que son tallos subterráneos que crecen paralelamente a la superficie del suelo. Estos presentan a un lado raíces adventicias y al otro ramas hacia la superficie con hojas y yemas. Acumulan reservas, con lo que aumentan su volumen, y en épocas favorables las yemas aprovechan estas reservas para germinar. Su penetración de las raíces en el agua y en el sustrato está en torno a los 60 cm por lo que es muy recomendable para los sistemas de flujo subsuperficial.

Los tallos varían de 1m a 4m, erectos, remotos o próximos entre sí; lisos, trígonos o subteretes, verde-amarillentos cuando secos. Presentan vainas foliares pardo oscuro, sin láminas. Tienen aerénquimas, que son tejidos sin color con grandes espacios intercelulares llenos de aire, que facilitan la flotación y la llegada de aire a los órganos sumergidos.

En la mayoría de los casos, la totora se reproduce vegetativamente. La reproducción por semillas es muy limitada debido a que generalmente no logran germinar. La reproducción vegetativa es por desarrollo de propágulos vegetativos, es decir, mediante células especializadas en propagar la planta (meristemos), agrupadas en estructuras especiales (rizomas). De esta manera se producen individuos nuevos, pero adaptados al ambiente.



Figura 31 Vista general "Scirpus Lacustris" y "Scirpus Holoschenus"

Entre las especies de *Scirpus* spp. que son de aplicación para el tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales destacan las especies *S. lacustris* y *S. holoschoenus*, de distribución natural en España. Se tiene referencia de algunos estudios sobre la capacidad depuradora de los humedales con totora. En la siguiente tabla se presentan algunos resultados al respecto:

Variables	Metales Pesados	Nitrógeno	Fosfato	Fósforo	Patógenos
Ujang et al. (2004)	85%				
Soto et al. (1999)		22 a 33%	30%	20%	99,9%

Para evitar la monotonía y darle mayor belleza paisajística a los humedales de macrofitas flotantes, se utilizará una combinación pero en menor cantidad, con otra variedad de planta de nombre "Iris Pseudoacorus" o también conocida como lirio amarillo.

La principal ventaja de este vegetal, es que no tiene parada vegetativa en invierno y da un toque muy estético al humedal a la vez que sigue consumiendo nitrógeno en dichas fechas del año, cuando otras especies, paralizan su metabolismo. Otra ventaja de los sistemas mixtos de vegetación en lugar de monocultivos de juncos es, que al ser mayor la biodiversidad vegetal también lo es la población bacteriana y las eficiencias pueden llegar a ser mayores.



Figura 32 Vista general "Iris Pseudoacorus"

La base elemental del sistema es convertir en flotantes, plantas macrofitas del tipo emergente que habitualmente enraízan en los suelos encharcados de humedales. Las macrofitas son plantas que tienen menor densidad que el agua (0,6-0,7), por lo que consiguen flotar sin dificultad en un principio. Sin embargo, el mayor problema, es asegurar la estabilidad del plantón en flotación hasta que este alcance el desarrollo necesario para que los sistemas radiculares de todas las macrofitas se entrelacen entre sí formando una autentica isla flotante sobre la superficie de lagos o canales, en el momento en el cual el filtro funciona de manera óptima.

Como primera opción para el anclaje en flotación de las macrofitas flotantes he seleccionado el sistema que utiliza la empresa Macrofitas S.L. en su marca HIDROLUTION FMF®, mediante una pieza plana especifica de soporte ensambladora, pieza ESE, un eslabón fundamental para la viabilidad del filtro. Esta pieza asegura por un lado la total flotabilidad de las plantas jóvenes y su perfecto crecimiento y por otro lado facilita enormemente la labor de plantación sobre el agua contaminada, por la sencillez de anclaje de la planta en la pieza y de la pieza en sus soportes.

Podemos seleccionar el hueco de la instalación en 5 cavidades dependiendo del tamaño de la raíz, rizoma, o parte de planta que vayamos a insertar, asegurando su estabilidad y sujeción mediante las pestañitas interiores prensoras. Además existe la posibilidad de añadir un soporte central para colocar semilla o algún tratamiento fitosanitario o abonos pelletizados de liberación controlada para favorecer el crecimiento y la viabilidad del plantón durante los primeros estadios del desarrollo.

Las 4 sujeciones especializadas son la base de la verdadera estructura que nos va a crear un mallaje perfecto interactuando inteligentemente con los elementos independientes (tubos de PE), capaz de poder utilizar el soporte en casi cualquier medio acuático formando balsas o sistemas autónomos de flotación. Con la ventaja añadida de poder plantar desde la orilla de la rivera del pantano, laguna o charca, o desde embarcación sin necesidad de tener que tocar el agua.

El soporte para sujetar cultivos de especies vegetales en flotación, configurado para ser sustentado por al menos dos elementos de sustentación independientes (10). El soporte comprende una estructura plana reticulada (1) que dispone de al menos un alojamiento (2-3) configurado para albergar una semilla, planta, parte de planta o rizoma, y/o combinaciones de las mismas y de al menos dos elementos de anclaje (5-6) a los elementos de sustentación independientes (10) configurados para compensar los momentos y fuerzas generados por la porción de planta que sobresale del nivel del agua con respecto al punto de intersección de dicha porción con el plano definido por la estructura (1), hasta un estado de crecimiento que la planta subsiste y se reproduce por si sola al proliferar las raíces y/o rizomas de las mismas y para transmitir dichos momentos y fuerzas a los elementos de sustentación independientes (10).

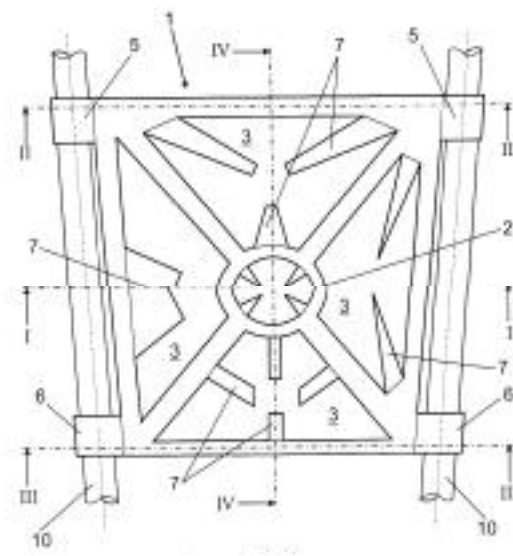


Figura 33 Soporte de macrofitas flotantes ESE®

Como segunda opción, la empresa “QuarQ Enterprise”, ha desarrollado una patente conocida como “Tamiz Estructural AQ3M”. Se trata de un sistema modular en suspensión para conseguir hacer flotar typhas y plantas helófitas sobre láminas de agua. Está especialmente diseñada para facilitar la formación del filtro, favoreciendo el entramado radicular de las plantas de forma natural, y no forzando la parte aérea en su desarrollo. Estos moldes están realizados en polipropileno flexible de baja densidad (0,742 gr/cc)+ expansor, fabricado mediante una sola colada de inyección en caliente y en una sola pieza. El ensamblaje secuencial de numerosas piezas (teselas), permite la instalación de grandes láminas sobre la superficie del agua, en la que previamente se ha insertado plantones de plantas helófitas.



Figura 34 Tamiz estructural AQ3M

4.4.2 Gestión de la vegetación

Durante los primeros meses de operación deben eliminarse las malas hierbas que puedan competir con la vegetación implantada en el humedal, controlando también la aparición de posibles plagas, que puedan hacer peligrar la existencia de las plantas. La entrada a la depuradora estará limitada para evitar el acceso de animales que puedan alimentarse de las plantas del humedal.

Finalizado el ciclo vegetativo de la vegetación implantada en el humedal artificial, debe procederse a su cosechado. Se recomienda realizar siegas cada año cuando empiecen a secarse las partes aéreas de las plantas. En la zona Mediterránea esto ocurre aproximadamente en noviembre.

En el humedal de flujo subsuperficial horizontal la siega se puede realizar con maquinaria ligera o de manera manual por los operarios.

En los humedales con macrofitas flotantes, considero que la siega debe realizarse con alguna segadora de brazo telescópico que permita la operación desde las riberas del meandro sin necesidad de extraer el soporte fijo con los vegetales del agua. El correcto funcionamiento de este sistema depende en gran medida de la fauna microbiana que habita en el entramado de rizomas de las macrofitas, y de las condiciones del humedal, las cuales podrían verse modificadas por la extracción de las plantas, tales como resuspensión de sólidos, modificación de las condiciones anaerobias del lecho del humedal...

5. CONCLUSIONES

A día de hoy, los principales contaminantes de las aguas del río Segura a su paso por la comarca de la vega baja, son la gran cantidad de nutrientes en forma de amonio y fósforo y los sólidos suspendidos principalmente en forma de fitoplancton. Las altas velocidades del agua que circulan actualmente por estos meandros, superiores a 1 m/sg, penalizan gravemente la correcta sedimentación de los sólidos suspendidos en el caso de instalar el sistema de macrofitas flotantes. Por esta razón, en cada uno de los diseños hidráulicos se presentan dos alternativas en base a la velocidad de flujo de agua en los mismos.

Los rendimientos de remoción de contaminantes de este tipo de sistemas son reducidos debido a la necesidad de una elevada superficie de tratamiento para observar cambios considerables. Los caudales de tratamiento para los cuales se han diseñado los humedales con macrofitas son bastante menores que el caudal que diariamente atraviesa el río cualquiera de las estaciones de aforo de la Vega Baja del Segura. Por esta razón, el impacto final sobre la calidad de agua del río en su totalidad es casi imperceptible. Sin embargo, aunque la mejora en la calidad del agua no sea tan sustancial en cuanto al porcentaje de remoción de contaminantes, la implantación de humedales artificiales en los meandros abandonados del río Segura permite una mejora ambiental en cuanto a la restauración de los ecosistemas fluviales perdidos en el acortamiento del río Segura y mejorar el estado ecológico de la masa de agua.

El ejemplo más claro de ello, es el meandro de “Algorfa”, donde la aplicabilidad de los humedales artificiales en el mismo, permitiría a la vez que depurar el agua, recuperar una lámina de agua accesible en el propio meandro tal y como existía anteriormente. En este caso se trataría de una lámina de agua en forma de laguna artificial, sirviendo la misma como hábitat para una diversidad de especies tanto de flora como de fauna, y aportando una belleza paisajística en un lugar donde a día de hoy se ubica una antigua cantera de áridos en estado de abandono.

6. BIBLIOGRAFÍA

“Encauzamiento del río Segura 1990-1994”. Germán Sánchez Gómez. Blog de geología, ingeniería geológica, geotecnia y cimentaciones especiales.

“Corredor Verde. Restauración paisajística y ambiental en la Vega Baja del río Segura”. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Confederación Hidrográfica del Segura. Febrero 2009.

“Catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valenciana”. Consellería de Medio Ambiente. Generalitat Valenciana. 2002.

“Restauración de ríos. Seminario internacional”. El papel de las confederaciones hidrográficas en la restauración de los ríos de España. Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Segura. Madrid, Septiembre de 2006.

“Azudes y Acueductos del Sistema de Riego Tradicional de la Vega Baja del Segura”. Arturo Trapote Jaume, José Francisco Roca y Joaquín Melgarejo Moreno. Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales y Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante. Enero-Junio de 2015.

“Informe Obra de Restauración Hidrológico-Forestal en la Cuenca del Segura; El ejemplo El Corredor Verde de la Vega Baja del Segura: Antecedentes, Planificación y Desarrollo. Confederación Hidrográfica del Segura. Oficina FEDER. Murcia, Septiembre 2006.

“Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial”. Joan García Serrano y Angélica Corzo Hernández. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Noviembre de 2008.

“Aguas Residuales: Tratamientos por Humedales Artificiales”. Fundamentos científicos. Tecnologías. Diseño. Mariano Seoánez Calvo. 1999.

“A Handbook of Constructed Wetland”. A guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage and stormwater in the Mid-Atlantic Region. Volume 1: General Considerations. Luise Davis. EPA (United States Environmental Protection Agency).

“Filtro de macrofitas en flotación HIDROLUTION FMF®, la depuración de aguas residuales que se adapta al entorno y es probablemente el sistema más eficiente, económico y ecológico del mercado”. Revista “Aguas Residuales. Info”. Número 4. Año I. 4º Trimestre 2015.

“Depuración de Aguas Residuales por medio de Humedales Artificiales”. Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez, Mauricio Andrade. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Universidad Mayor de San Simón, Cochamba (Bolivia). 2010.

“Manual de diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración”. Dayna Yocum, Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara.

Anexo I Valores Físico-Químicos de los Puntos de Muestreo

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura

Punto de Muestreo “Beniel”

Demanda Química de Oxígeno (mgO₂/l)			
07/03/2011	14	13/03/2013	26
04/04/2011	19	17/04/2013	13
04/05/2011	15	22/05/2013	15
14/06/2011	15	12/06/2013	15
21/09/2011	11	17/07/2013	14
19/10/2011	13	07/08/2013	13
30/11/2011	11	11/09/2013	11
13/12/2011	18	16/10/2013	12
30/01/2012	16	13/11/2013	13
20/02/2012	19	11/12/2013	14
28/03/2012	16	22/01/2014	18
18/04/2012	19	12/02/2014	27
09/05/2012	18	14/05/2014	14
13/06/2012	19	18/06/2014	35
25/07/2012	16	15/12/2014	31
17/10/2012	16	21/01/2015	14
14/11/2012	25	13/05/2015	12
03/12/2012	17	12/08/2015	12
23/01/2013	12	09/09/2015	12
20/02/2013	14	21/10/2015	35

Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días (mgO₂/l)			
08/03/2011	2	18/06/2014	15
05/04/2011	4	15/12/2014	11

Fósforo Total (mgP/l)			
04/04/2011	0,56	07/08/2013	1,08
04/05/2011	0,31	11/09/2013	0,79
14/06/2011	0,88	16/10/2013	0,8
13/07/2011	0,24	13/11/2013	0,3
16/08/2011	0,45	11/12/2013	1,58
21/09/2011	0,57	22/01/2014	1
19/10/2011	0,96	12/02/2014	1,29
30/11/2011	0,35	14/05/2014	0,82
13/12/2011	1,79	18/06/2014	0,97
30/01/2012	0,3	10/07/2014	0,21
20/02/2012	2,4	10/09/2014	0,62
28/03/2012	0,36	22/10/2014	0,71
18/04/2012	0,29	19/11/2014	0,77
09/05/2012	0,49	15/12/2014	1,06
13/06/2012	1,04	21/01/2015	0,24
25/07/2012	0,68	11/02/2015	0,44
08/08/2012	0,56	11/03/2015	0,5
19/09/2012	0,49	15/04/2015	0,67
17/10/2012	1,36	13/05/2015	0,99
14/11/2012	1,15	17/06/2015	0,54
03/12/2012	0,97	15/07/2015	0,22
23/01/2013	0,88	22/07/2015	0,36
20/02/2013	0,41	12/08/2015	0,51

13/03/2013	0,97	09/09/2015	0,39
17/04/2013	0,27	21/10/2015	0,68
22/05/2013	1,03	18/11/2015	0,5
12/06/2013	0,92	16/12/2015	0,76
17/07/2013	0,63	27/01/2016	0,38

Amonio (mgN/l)			
04/04/2011	1,71	22/05/2013	1,84
19/10/2011	1,02	12/06/2013	0,47
30/11/2011	0,82	13/11/2013	2,12
13/12/2011	1,50	11/12/2013	0,42
30/01/2012	3,45	22/01/2014	0,57
20/02/2012	1,89	12/02/2014	1,02
09/05/2012	1,24	14/05/2014	0,51
17/10/2012	1,94	18/06/2014	0,89
14/11/2012	1,26	15/12/2014	3,45
03/12/2012	2,85	21/01/2015	2,56
23/01/2013	2,72	12/08/2015	1,20
20/02/2013	0,71	21/10/2015	2,41
13/03/2013	0,75	16/12/2015	0,15
27/01/2016	0,3		

Nitratos (mgN/l)			
04/04/2011	1,56	16/10/2013	3,21
04/05/2011	1,49	13/11/2013	3,07
14/06/2011	2,28	11/12/2013	4,45
13/07/2011	1,78	22/01/2014	3,61
16/08/2011	2,60	12/02/2014	2,20
21/09/2011	1,42	14/05/2014	1,94
19/10/2011	2,89	18/06/2014	3,66
30/01/2012	2,30	11/09/2013	1,64
20/02/2012	3,15	10/07/2014	2,28
28/03/2012	3,45	13/08/2014	1,83
18/04/2012	2,78	10/09/2014	1,65
09/05/2012	1,53	22/10/2014	2,62
13/06/2012	3,27	19/11/2014	1,96
25/07/2012	1,28	15/12/2014	2,24
08/08/2012	1,48	21/01/2015	2,69
19/09/2012	1,58	11/02/2015	1,75
17/10/2012	4,52	11/03/2015	2,06
14/11/2012	4,31	15/04/2015	1,88
03/12/2012	2,85	13/05/2015	1,78
23/01/2013	2,55	17/06/2015	1,35
20/02/2013	2,44	15/07/2015	1,51
13/03/2013	1,64	22/07/2015	1,75
17/04/2013	1,35	12/08/2015	1,11
22/05/2013	2,71	09/09/2015	1,19
12/06/2013	2,73	21/10/2015	1,90
17/07/2013	2,80	18/11/2015	2,94
07/08/2013	2,91		

Sólidos Suspendidos (mg/l)			
04/04/2011	75	17/07/2013	99
05/04/2011	106	07/08/2013	54

04/05/2011	110	11/09/2013	199
19/05/2011	142	16/10/2013	58
14/06/2011	128	13/11/2013	59
13/07/2011	98	11/12/2013	15
16/08/2011	73	22/01/2014	23
21/09/2011	67	12/02/2014	37
19/10/2011	15	14/05/2014	149
30/11/2011	101	18/06/2014	248
13/12/2011	26	10/07/2014	156
30/01/2012	16	13/08/2014	87
20/02/2012	13	10/09/2014	95
28/03/2012	15	22/10/2014	235
18/04/2012	17	19/11/2014	130
13/06/2012	76	15/12/2014	94
25/07/2012	253	21/01/2015	23
08/08/2012	87	11/02/2015	51
19/09/2012	91	11/03/2015	38
17/10/2012	37	15/04/2015	24
14/11/2012	40	13/05/2015	122
03/12/2012	20	17/06/2015	118
23/01/2013	30	15/07/2015	111
20/02/2013	41	12/08/2015	62
13/03/2013	161	09/09/2015	53
17/04/2013	136	21/10/2015	75
22/05/2013	32	18/11/2015	54
12/06/2013	45	16/12/2015	29

Oxígeno Disuelto (mgO₂/l)			
04/04/2011	7,86	12/02/2014	7,62
05/04/2011	7,8	14/05/2014	7,15
04/05/2011	7,93	18/06/2014	2,81
19/05/2011	5,4	10/07/2014	6
14/06/2011	6,05	13/08/2014	7,18
13/07/2011	6,27	10/09/2014	7,47
16/08/2011	5,63	22/10/2014	7,79
21/09/2011	6,33	19/11/2014	9,09
19/10/2011	7,12	15/12/2014	6,87
30/11/2011	8,82	21/01/2015	8,87
13/12/2011	7,88	11/02/2015	9,7
30/01/2012	6,99	11/03/2015	9,18
20/02/2012	8,26	15/04/2015	8,76
28/03/2012	7,99	13/05/2015	7,67
18/04/2012	7,05	17/06/2015	7,13
09/05/2012	7,12	15/07/2015	7,07
13/06/2012	5,66	12/08/2015	5,61
25/07/2012	8,34	26/08/2015	7,16
08/08/2012	9,12	09/09/2015	6,28
19/09/2012	7,58	21/09/2015	7,15
17/10/2012	7,57	07/10/2015	7,68
14/11/2012	6,5	16/10/2015	9,8
03/12/2012	8,48	21/10/2015	4,31
23/01/2013	9,34	28/10/2015	7,18
20/02/2013	8,42	04/11/2015	7,97
13/03/2013	6,42	11/11/2015	8,13
17/04/2013	9,08	18/11/2015	8,64
22/05/2013	7,28	25/11/2015	10

12/06/2013	6,51	03/12/2015	9,58
17/07/2013	7,39	11/12/2015	9,07
07/08/2013	7,16	16/12/2015	8,71
11/09/2013	8,01	21/12/2015	9,12
16/10/2013	7,51	28/12/2015	8,87
13/11/2013	6,88	04/01/2016	8,54
11/12/2013	8,02	27/01/2016	9,13
22/01/2014	7,99		

Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
19/01/2011	1776	16/10/2013	1767
24/01/2011	1785	13/11/2013	1642
22/02/2011	2016	11/12/2013	1877
07/03/2011	1723	22/01/2014	2150
08/03/2011	1601	12/02/2014	1793
04/04/2011	1764	14/05/2014	1406
05/04/2011	1705	18/06/2014	1070
04/05/2011	1288	10/07/2014	1428
19/05/2011	1587	13/08/2014	1091
14/06/2011	1476	10/09/2014	1105
13/07/2011	1387	22/10/2014	1638
16/08/2011	1276	19/11/2014	1426
21/09/2011	1226	15/12/2014	1380
19/10/2011	1773	21/01/2015	1926
30/11/2011	2730	11/02/2015	1451
13/12/2011	2820	11/03/2015	1551
30/01/2012	2290	15/04/2015	1384
20/02/2012	2210	13/05/2015	1342
28/03/2012	2580	17/06/2015	1121
18/04/2012	2010	22/07/2015	1100
09/05/2012	2030	12/08/2015	1110
13/06/2012	1620	26/08/2015	1152
25/07/2012	1255	09/09/2015	1367
08/08/2012	1353	21/09/2015	1367
19/09/2012	1222	07/10/2015	2100
17/10/2012	2310	16/10/2015	1893
14/11/2012	2710	21/10/2015	1210
03/12/2012	2300	28/10/2015	1715
23/01/2013	2060	04/11/2015	2710
20/02/2013	1813	11/11/2015	2110
13/03/2013	1596	18/11/2015	2120
17/04/2013	1054	25/11/2015	1870
22/05/2013	1765	03/12/2015	1675
12/06/2013	1605	11/12/2015	1924
17/07/2013	1505	16/12/2015	2080
07/08/2013	1525	21/12/2015	1932
11/09/2013	1307	28/12/2015	2120

Temperatura del Agua (C°)			
04/04/2011	18,8	22/01/2014	13,6
05/04/2011	17,1	12/02/2014	13,2
04/05/2011	17,1	14/05/2014	21
19/05/2011	21,8	18/06/2014	22,6
14/06/2011	24,4	10/07/2014	24,8

13/07/2011	26,5	13/08/2014	25,2
16/08/2011	25,5	10/09/2014	24,1
21/09/2011	23,5	22/10/2014	20,1
19/10/2011	19,3	19/11/2014	14,4
30/11/2011	15,1	15/12/2014	13,3
13/12/2011	15,4	21/01/2015	10,2
30/01/2012	12,2	11/02/2015	10,6
20/02/2012	12,9	11/03/2015	15,1
28/03/2012	17,6	15/04/2015	16,5
18/04/2012	18,1	13/05/2015	22,3
09/05/2012	22,3	17/06/2015	21,1
13/06/2012	24,8	15/07/2015	25
25/07/2012	24,8	22/07/2015	25,5
08/08/2012	23,1	12/08/2015	25,7
19/09/2012	22,6	26/08/2015	23,9
17/10/2012	19,9	09/09/2015	21,8
14/11/2012	16,6	21/09/2015	21,6
03/12/2012	12,4	07/10/2015	22
23/01/2013	11,7	16/10/2015	21
20/02/2013	14,2	21/10/2015	21,5
13/03/2013	13,7	28/10/2015	19,7
17/04/2013	16,6	04/11/2015	17,5
22/05/2013	18,8	11/11/2015	18,5
12/06/2013	23,7	18/11/2015	17,1
17/07/2013	25,3	25/11/2015	11,9
07/08/2013	26,2	03/12/2015	13,3
11/09/2013	26,6	11/12/2015	13,4
16/10/2013	21,4	21/12/2015	12
13/11/2013	17,7	28/12/2015	15,2
11/12/2013	15,2	04/01/2016	13,8

Invierno 2011	16,6	Verano 2011	21,8
Invierno 2012	15,3	Verano 2012	22,6
Invierno 2013	15,7	Verano 2013	22,9
Invierno 2014	14,9	Verano 2014	23,5
Invierno 2015	15,9	Verano 2015	22,6
Media Invierno	15,4 C°	Media Verano	22,7 C°

Puntos de Muestreo “Puente Benezúzar” y “Presa Alfeitamí”

Demanda Química de Oxígeno (mgO ₂ /l)			
04/04/2011	16	12/06/2013	17
10/04/2014	16	17/07/2013	17
04/05/2011	18	07/08/2013	16
14/06/2011	19	11/09/2013	15
13/07/2011	19	16/10/2013	16
16/08/2011	14	13/11/2013	24
21/09/2011	14	22/01/2014	18
19/10/2011	14	12/02/2014	16
21/11/2014	12	12/03/2014	13
30/11/2011	15	09/04/2014	15
13/12/2011	14	14/05/2014	16
30/01/2012	14	18/06/2014	19
20/02/2012	17	10/07/2014	10

24/03/2015	26	13/08/2014	13
28/03/2012	16	10/09/2014	13
18/04/2012	20	22/10/2014	24
09/05/2012	16	19/11/2014	14
13/06/2012	15	15/12/2014	27
25/07/2012	16	21/01/2015	16
08/08/2012	11	11/02/2015	11
19/09/2012	11	11/03/2015	11
17/10/2012	13	15/04/2015	13
14/11/2012	18	15/07/2015	14
03/12/2012	15	08/07/2015	17
23/01/2013	12	12/08/2015	15
20/02/2013	12	09/09/2015	17
13/03/2013	23	21/10/2015	18
17/04/2013	14	16/11/2015	14
22/05/2013	15	16/12/2015	13

Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días (mgO₂/l)			
12/01/2011	2	01/03/2011	3
07/03/2011	12	24/03/2015	12
05/04/2011	3	08/07/2015	8
10/04/2014	13	16/11/2015	7

Fósforo Total (mgP/l)			
04/04/2011	0,57	16/10/2013	0,53
04/05/2011	0,59	13/11/2013	0,51
14/06/2011	0,86	11/12/2013	0,66
13/07/2011	0,39	22/01/2014	0,64
16/08/2011	0,58	12/02/2014	0,8
21/09/2011	0,53	12/03/2014	0,51
19/10/2011	0,61	09/04/2014	0,7
30/11/2011	0,52	14/05/2014	0,77
13/12/2011	0,82	18/06/2014	1,35
30/01/2012	0,42	10/07/2014	0,28
20/02/2012	0,35	13/08/2014	0,32
28/03/2012	0,56	10/09/2014	0,8
18/04/2012	0,7	10/04/2014	0,32
09/05/2012	1,05	22/10/2014	0,83
13/06/2012	0,6	19/11/2014	0,82
25/07/2012	0,66	21/11/2014	0,67
08/08/2012	0,51	15/12/2014	1,09
19/09/2012	0,45	21/01/2015	0,39
17/10/2012	0,69	11/02/2015	0,65
14/11/2012	0,81	11/03/2015	0,44
03/12/2012	0,68	24/03/2015	0,87
23/01/2013	0,72	15/04/2015	0,78
20/02/2013	0,41	08/07/2015	0,49
13/03/2013	0,91	15/07/2015	0,32
17/04/2013	0,3	12/08/2015	0,67
22/05/2013	0,81	09/09/2015	0,49
12/06/2013	0,64	21/10/2015	0,71
17/07/2013	0,38	16/11/2015	0,66
07/08/2013	0,84	18/11/2015	0,52
11/09/2013	0,58	16/12/2015	0,71

Amonio (mgN/l)			
04/04/2011	1,27	12/06/2013	1,57
04/05/2011	1,07	16/10/2013	0,43
14/06/2011	0,59	13/11/2013	0,61
13/07/2011	0,54	11/12/2013	0,47
19/10/2011	1,64	22/01/2014	1,59
30/11/2011	0,58	12/03/2014	0,52
13/12/2011	0,74	18/06/2014	2,01
30/01/2012	1,04	19/11/2014	0,61
20/02/2012	1,06	21/11/2014	0,83
28/03/2012	1,00	21/01/2015	1,07
18/04/2012	0,61	11/02/2015	0,82
09/05/2012	0,90	24/03/2015	1,84
13/06/2012	0,53	08/07/2015	1,02
25/07/2012	0,72	15/07/2015	0,21
14/11/2012	1,21	12/08/2015	0,64
03/12/2012	1,57	09/09/2015	0,33
23/01/2013	0,96	21/10/2015	2,64
20/02/2013	0,44	16/11/2015	2,11
13/03/2013	1,28	18/11/2015	0,37
22/05/2013	0,88		

Nitratos (mgN/l)			
04/04/2011	8,02	13/11/2013	5,74
04/05/2011	2,94	11/12/2013	5,37
14/06/2011	3,41	22/01/2014	5,65
13/07/2011	3,48	12/02/2014	4,67
16/08/2011	4,36	12/03/2014	2,96
21/09/2011	5,33	09/04/2014	3,70
19/10/2011	7,52	10/04/2014	3,73
13/12/2011	8,09	14/05/2014	4,20
30/01/2012	6,00	18/06/2014	3,93
20/02/2012	7,22	10/07/2014	4,49
28/03/2012	5,58	13/08/2014	3,84
18/04/2012	3,73	10/09/2014	4,20
09/05/2012	5,13	22/10/2014	4,54
13/06/2012	4,31	19/11/2014	4,22
25/07/2012	2,96	21/11/2014	4,05
08/08/2012	3,25	15/12/2014	3,34
19/09/2012	4,11	21/01/2015	5,08
17/10/2012	6,80	11/02/2015	4,09
14/11/2012	7,29	11/03/2015	5,74
03/12/2012	5,78	24/03/2015	5,58
23/01/2013	5,78	15/04/2015	4,22
20/02/2013	5,10	08/07/2015	4,02
13/03/2013	3,70	15/07/2015	3,66
17/04/2013	2,78	12/08/2015	3,77
22/05/2013	4,56	09/09/2015	3,23
12/06/2013	4,52	21/10/2015	5,31
17/07/2013	4,67	16/11/2015	5,67
07/08/2013	4,18	18/11/2015	4,85
11/09/2013	3,52	16/12/2015	3,70
16/10/2013	5,31		

Sólidos en Suspensión (mg/l)			
12/01/2011	65	12/06/2013	97
03/02/2011	43	17/07/2013	118
01/03/2011	50	07/08/2013	61
07/03/2011	17	11/09/2013	80
04/04/2011	43	16/10/2013	79
05/04/2011	81	13/11/2013	135
04/05/2011	65	11/12/2013	42
10/05/2011	191	22/01/2014	28
14/06/2011	92	12/02/2014	15
13/07/2011	142	12/03/2014	40
16/08/2011	108	09/04/2014	68
21/09/2011	61	10/04/2014	58
19/10/2011	23	14/05/2014	96
30/11/2011	65	18/06/2014	132
13/12/2011	12	10/07/2014	117
30/01/2012	19	13/08/2014	165
20/02/2012	16	10/09/2014	127
28/03/2012	40	19/11/2014	94
18/04/2012	74	21/11/2014	138
09/05/2012	16	15/12/2014	106
13/06/2012	64	21/01/2015	19
25/07/2012	142	11/02/2015	60
08/08/2012	51	11/03/2015	14
19/09/2012	49	24/03/2015	49
17/10/2012	60	15/04/2015	71
14/11/2012	42	08/07/2015	85
03/12/2012	19	15/07/2015	124
23/01/2013	49	12/08/2015	44
20/02/2013	45	09/09/2015	36
13/03/2013	103	21/10/2015	117
17/04/2013	158	16/11/2015	56
22/05/2013	185	18/11/2015	23

Oxígeno Disuelto (mgO₂/l)			
04/04/2011	7,86	09/04/2014	4,4
05/04/2011	6,00	10/04/2014	4,36
04/05/2011	7,01	14/05/2014	5,21
10/05/2011	5,40	18/06/2014	4,32
14/06/2011	4,93	10/07/2014	4,14
13/07/2011	5,58	13/08/2014	4,71
16/08/2011	4,53	10/09/2014	4,93
21/09/2011	7,21	22/10/2014	5,62
19/10/2011	7,37	19/11/2014	6,64
30/11/2011	7,17	21/11/2014	7,21
13/12/2011	7,8	15/12/2014	3,71
30/01/2012	5,12	21/01/2015	6,01
20/02/2012	6,37	11/02/2015	6,62
28/03/2012	4,4	11/03/2015	5,57
18/04/2012	4,11	24/03/2015	4,57
09/05/2012	2,8	15/04/2015	6,14
13/06/2012	3,55	08/07/2015	4,77
25/07/2012	3,76	15/07/2015	4,68
08/08/2012	9,12	12/08/2015	3,84
19/09/2012	4,81	26/08/2015	8,26

17/10/2012	5,57	09/09/2015	3,4
14/11/2012	7,26	21/09/2015	5,2
03/12/2012	6,27	07/10/2015	4,73
23/01/2013	6,82	16/10/2015	8,99
20/02/2013	5,88	21/10/2015	4,4
13/03/2013	4,23	28/10/2015	8,83
22/05/2013	5,57	04/11/2015	6,42
12/06/2013	4,69	11/11/2015	6,25
17/07/2013	4,39	16/11/2015	8,61
07/08/2013	5,32	18/11/2015	5,68
11/09/2013	9,3	25/11/2015	8,08
16/10/2013	5,24	03/12/2015	6,84
13/11/2013	5,39	11/12/2015	8,74
11/12/2013	6,61	21/12/2015	8,98
22/01/2014	5,19	28/12/2015	6,09
12/02/2014	5,41	04/01/2016	5,38
12/03/2014	5,85		

Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)			
12/01/2011	2470	12/02/2014	2650
24/01/2011	2450	12/03/2014	1698
03/02/2011	2550	09/04/2014	2020
01/03/2011	2900	10/04/2014	1850
07/03/2011	2480	14/05/2014	2120
04/04/2011	3000	18/06/2014	1985
05/04/2011	2580	10/07/2014	2060
04/05/2011	1774	13/08/2014	1659
10/05/2011	2400	10/09/2014	1726
14/06/2011	1919	22/10/2014	2040
13/07/2011	1748	19/11/2014	1992
16/08/2011	1870	21/11/2014	2055
21/09/2011	2090	15/12/2014	1878
19/10/2011	2670	21/01/2015	2400
30/11/2011	4040	11/02/2015	2100
13/12/2011	3760	11/03/2015	2400
30/01/2012	3120	24/03/2015	1941
20/02/2012	3270	15/04/2015	2000
28/03/2012	3280	08/07/2015	1641
18/04/2012	2440	15/07/2015	1489
09/05/2012	2640	12/08/2015	1704
13/06/2012	2220	26/08/2015	1589
25/07/2012	1773	09/09/2015	1584
08/08/2012	1875	21/09/2015	1999
19/09/2012	1960	07/10/2015	2420
17/10/2012	2830	16/10/2015	2160
14/11/2012	2950	21/10/2015	2140
03/12/2012	3070	28/10/2015	1853
23/01/2013	2880	04/11/2015	2440
20/02/2013	2640	11/11/2015	2520
13/03/2013	2580	16/11/2015	1633
17/04/2013	1340	18/11/2015	2520
22/05/2013	2250	25/11/2015	2110
12/06/2013	2230	03/12/2015	2390
17/07/2013	1910	11/12/2015	1998
07/08/2013	1943	16/12/2015	2280
11/09/2013	1718	21/12/2015	2230

16/10/2013	2200	28/12/2015	2360
13/11/2013	2200	04/01/2016	2280
11/12/2013	2330	27/01/2016	2720
22/01/2014	2830		

Temperatura del agua (C°)			
04/04/2011	18,3	09/04/2014	18,3
05/04/2011	20,5	10/04/2014	17,9
04/05/2011	20,2	14/05/2014	20,6
10/05/2011	22,7	18/06/2014	22,6
14/06/2011	23,6	10/07/2014	24,6
13/07/2011	25,2	13/08/2014	25,5
16/08/2011	25,7	10/09/2014	24,8
21/09/2011	22,3	22/10/2014	20,7
19/10/2011	19,8	19/11/2014	15,6
30/11/2011	15,9	21/11/2014	16,5
13/12/2011	14,2	15/12/2014	13,6
30/01/2012	11	21/01/2015	9,6
20/02/2012	12,2	11/02/2015	11,1
28/03/2012	15,8	11/03/2015	15,3
18/04/2012	17,4	24/03/2015	16,2
09/05/2012	20,5	15/04/2015	16,4
13/06/2012	23,3	08/07/2015	26,2
25/07/2012	25,1	15/07/2015	25,1
08/08/2012	21,9	12/08/2015	26,1
19/09/2012	23,4	26/08/2015	24,7
17/10/2012	19	09/09/2015	22,2
14/11/2012	15,8	21/09/2015	22
03/12/2012	11,5	07/10/2015	21,5
23/01/2013	10,9	16/10/2015	22,4
20/02/2013	13,8	21/10/2015	20,8
13/03/2013	14,9	28/10/2015	19,4
17/04/2013	17,3	04/11/2015	17,4
22/05/2013	18,1	11/11/2015	17,8
12/06/2013	22	16/11/2015	18,8
17/07/2013	24,2	18/11/2015	16,2
07/08/2013	25,3	25/11/2015	12,5
11/09/2013	25,6	03/12/2015	14,4
16/10/2013	20,7	11/12/2015	13,5
13/11/2013	17,2	16/12/2015	14,4
11/12/2013	13,6	21/12/2015	11,3
22/01/2014	12,2	28/12/2015	14,1
12/02/2014	12,4	04/01/2016	14,1
12/03/2014	13,8		

Invierno 2012	14,2	Verano 2011	22,3
Invierno 2013	15,2	Verano 2012	21,9
Invierno 2014	15,0	Verano 2013	22,1
Invierno 2015	15,9	Verano 2014	22,7
Invierno 2016	14,1	Verano 2015	23,2
Media Invierno	14,9 C°	Media Verano	22,4 C°