



# INSTITUTO DE SOSTENIBILIDAD

## DOCTORADO EN SOSTENIBILIDAD

### PROPUESTA DE TESIS

Título provisional

***Parámetros de diseño en humedales contruidos de flujo  
subsuperficial bajo distintas condiciones climáticas, diferentes  
contaminantes y medios filtrantes.***

#### DOCTORANDO

Lorena Aguilar Pérez

Cátedra UNESCO de Sostenibilidad

Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech

lorena.aguilar@upc.edu

#### DIRECTOR

Jordi Morató Farreras

Coordinador de la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad

Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech

jordi.morato@upc.edu

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                          |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                                  | iii  |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                                                   | v    |
| ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS .....                                                              | vi   |
| ACRÓNIMOS .....                                                                          | viii |
| 1. RESUMEN .....                                                                         | 1    |
| 2. ESTADO DEL ARTE .....                                                                 | 4    |
| 2.1. EL AGUA EN LA AGRICULTURA.....                                                      | 4    |
| 2.2. EL CICLO DEL NITROGENO .....                                                        | 5    |
| 2.3. CONTAMINACIÓN POR NITRATOS.....                                                     | 9    |
| 2.4. LOS PLAGUICIDAS EN LA AGRICULTURA.....                                              | 10   |
| 2.5. CONTAMINACIÓN DIFUSA (CD) .....                                                     | 11   |
| 2.6. SISTEMAS NATURALES PARA EL TRATAMIENTO DE LA CD:<br>HUMEDALES CONSTRUIDOS (HC)..... | 12   |
| 2.6.1. GENERALIDADES .....                                                               | 13   |
| 2.6.2. TIPOS.....                                                                        | 15   |
| 2.6.3. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS .....                                                     | 15   |
| ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA .....                                                    | 15   |
| IMPERMEABILIZACIÓN .....                                                                 | 16   |
| MEDIO GRANULAR.....                                                                      | 17   |
| VEGETACIÓN.....                                                                          | 17   |
| 2.6.4. DISEÑO.....                                                                       | 18   |
| PRETRATAMIENTO .....                                                                     | 18   |
| TRATAMIENTO PRIMARIO.....                                                                | 19   |
| TRATAMIENTO SECUNDARIO.....                                                              | 19   |
| TRATAMIENTO TERCIARIO .....                                                              | 19   |
| 2.6.5. TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS POR NITRATOS .....                              | 20   |
| 2.6.6. TRATAMIENTO DE PLAGUICIDAS .....                                                  | 20   |
| 2.6.7. MEDIOS FILTRANTES .....                                                           | 21   |
| 2.7. TICs EN LA AGRICULTURA.....                                                         | 22   |
| 2.8. PROYECTO REAGRITECH .....                                                           | 23   |
| 2.8.1. PUBLICACIONES ACTUALES .....                                                      | 25   |
| 2.8.2. PRESENTACIONES EN CONGRESOS PROYECTO REAGRITECH .....                             | 25   |
| 3. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN .....                                                      | 27   |
| 3.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....                                                     | 27   |
| 3.2. HIPÓTESIS.....                                                                      | 27   |

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.3. OBJETIVOS .....</b>                                        | <b>27</b> |
| 3.3.1. OBJETIVO GENERAL .....                                      | 27        |
| 3.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                 | 28        |
| <b>4. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>                               | <b>29</b> |
| <b>4.1. PILOTOS IPCT .....</b>                                     | <b>29</b> |
| 4.1.1. DISEÑO CONCEPTUAL .....                                     | 30        |
| 4.1.2. AGUA RESIDUAL SINTÉTICA (ARS).....                          | 31        |
| <i>TEMPERATURA, SALES, CONDUCTIVIDAD Y pH.....</i>                 | <i>32</i> |
| <i>TURBIDEZ .....</i>                                              | <i>32</i> |
| <i>DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO).....</i>                       | <i>33</i> |
| <i>NITRÓGENO TOTAL .....</i>                                       | <i>33</i> |
| 4.1.3. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....                            | 34        |
| 4.1.4. CONSTRUCCIÓN.....                                           | 36        |
| <b>4.2. PROTOTIPOS REAGRITECH.....</b>                             | <b>41</b> |
| 4.2.1. DISEÑO CONCEPTUAL .....                                     | 41        |
| 4.2.2. CONSTRUCCIÓN .....                                          | 42        |
| 4.2.3. OPERACIÓN Y MONITOREO .....                                 | 47        |
| <b>5. PLAN DE TRABAJO .....</b>                                    | <b>51</b> |
| <b>5.1. BUSQUEDA BIBLIOGRÁFICA Y FORMACIÓN COMPLEMENTARIA.....</b> | <b>51</b> |
| <b>5.2. PLAN EXPERIMENTAL .....</b>                                | <b>52</b> |
| 5.2.1. PARÁMETROS A ANALIZAR .....                                 | 52        |
| 5.2.2. IPCT .....                                                  | 52        |
| <i>FUNCIONAMIENTO DE LOS PILOTOS.....</i>                          | <i>52</i> |
| <i>CALENDARIO DE MUESTREO.....</i>                                 | <i>54</i> |
| <i>TOMA DE MUESTRAS.....</i>                                       | <i>55</i> |
| 5.2.3. REAGRITECH.....                                             | 55        |
| <i>FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO .....</i>                          | <i>55</i> |
| <i>CALENDARIO DE MUESTREO.....</i>                                 | <i>56</i> |
| <i>TOMA DE MUESTRAS.....</i>                                       | <i>56</i> |
| <b>5.3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....</b>                         | <b>57</b> |
| <b>5.4. RESULTADOS ESPERADOS Y PUBLICACIONES .....</b>             | <b>58</b> |
| 5.4.1. ARTÍCULOS PROPUESTOS.....                                   | 58        |
| <b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                       | <b>59</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. El 70% del uso del agua disponible en el mundo es para actividades agrícolas. Fuente: FAO Water.....                                                                                                                                                             | 4  |
| Figura 2. El volumen de uso estimado de agua para la agricultura en el año 2000 fue de más de 2.500 km <sup>3</sup> . Fuente: FAO.....                                                                                                                                     | 4  |
| Figura 3. Extracción de agua por sectores de actividad en los países europeos, último año de datos disponible entre paréntesis (%del total de extracción bruta). Fuente: Eurostat, 2008.....                                                                               | 5  |
| Figura 4. De las distintas formas en que se puede encontrar el nitrógeno las más nocivas para el medio ambiente son N <sub>2</sub> O, NO, NO <sup>-3</sup> y NO <sup>-2</sup> . Fuente: Elaboración Adriá Auladell.....                                                    | 6  |
| Figura 5. El nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico complejo en el que se ven implicados diferentes organismos y procesos en ambientes óxicos o en ambientes anóxicos. Fuente: Anne Bernhard.....                                                                          | 7  |
| Figura 6. El nitrógeno es inmovilizado en el sistema por los organismos para la creación de proteínas. Fuente: Saggarr et al. ....                                                                                                                                         | 7  |
| Figura 7. El nitrógeno en el suelo es descompuesto por bacterias y absorbido por plantas y animales. Fuente: <a href="http://explorando-el-pais5.webnode.es/a10-ciclos/">http://explorando-el-pais5.webnode.es/a10-ciclos/</a> . 8                                         | 8  |
| Figura 8. La actividad humana ha duplicado la fijación de nitrógeno a nivel global lo que tiene un efecto a nivel ambiental muy grande. Fuente: D.Fowler et al. ....                                                                                                       | 9  |
| Figura 9. Ejemplo del tratamiento de las aguas residuales de una urbanización por medio de HFSS. Al ser una tecnología natural se puede integrar perfectamente en el medio. Fuente: AquaSost.....                                                                          | 13 |
| Figura 10. Esquema de funcionamiento de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: AquaSost.....                                                                                                                                                    | 13 |
| Figura 11. Interacción entre los diferentes elementos de HC. Fuente: Adaptación AquaSost a partir de Constructed Wetland Treating Wastewater with Cenoses of Plants and Microorganisms, A Research Association at UFZ center for Enviromental Research Leipzig-Halle. .... | 14 |
| Figura 12. La recirculación del efluente en los humedales construidos mejora y estabiliza el tratamiento general del sistema( Brix, 2005). Fuente: Elaboración propia. ....                                                                                                | 31 |
| Figura 13. El área propuesta para cada humedal es de 1m <sup>2</sup> , área de los depósitos de 1.000 L con rejilla. Fuente: Elaboración L. García y L. Aguilar. ....                                                                                                      | 37 |
| Figura 14. Sección X-X' con las alturas de la capa de drenaje (26cm) y medio filtrante (60 cm). Fuente: Elaboración L. García y L. Aguilar. ....                                                                                                                           | 37 |
| Figura 15. Sección Y-Y' donde se ve la altura de los muestreadores por capa a cada 20 cm. Fuente: Elaboración L. García y L. Aguilar.....                                                                                                                                  | 38 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16. El diseño tiene como objetivo obtener efluentes con una disminución del 95% de DBO y 50% menos de contenido de nitrógeno. El prototipo permite recircular los efluentes dentro del sistema lo que brinda una gran variedad de posibilidades de tratamiento. Fuente: Elaboración Ángel Gallegos. .... | 41 |
| Figura 17. Vista de la plataforma web en la que el prototipo está dividido por zonas para el funcionamiento adecuado y la identificación de cada elemento. Fuente: DASSA Technologies. ....                                                                                                                     | 48 |
| Figura 18. Cada una de las zonas permite agrupar a cada uno de sus sensores y elementos relacionados con el funcionamiento del sistema. Fuente: DASSA Technologies. ....                                                                                                                                        | 48 |
| Figura 19. El sistema brinda el histórico de operación de cada uno de los componentes del sistema. Fuente: DASSA Technologies. ....                                                                                                                                                                             | 49 |
| Figura 20. El sistema brinda datos de operación del prototipo en tiempo real. Fuente: DASSA Technologies. ....                                                                                                                                                                                                  | 49 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Comparación entre sistemas naturales y convencionales. Fuente: Grupo de Gestión Sostenible del Agua - AquaSost. .... | 12 |
| Tabla 2. Composiciones del ARS. ....                                                                                          | 31 |
| Tabla 3. Resultados de DQO para cada composición. ....                                                                        | 32 |
| Tabla 4. Pruebas de DQO adicionales para la composición con mejores resultados (2). ....                                      | 32 |
| Tabla 5. Resultados de análisis de muestra para pH, Conductividad y Temperatura. ....                                         | 32 |
| Tabla 6. Resultados de análisis de muestra para DQO. ....                                                                     | 33 |
| Tabla 7. Resultados de análisis de muestra para nitrógeno total. ....                                                         | 33 |
| Tabla 8. Resultados de análisis de muestra para nitratos. ....                                                                | 33 |
| Tabla 9. Listado de material para la construcción de pilotos IPCT. ....                                                       | 34 |
| Tabla 10. Concentraciones a dosificar mensualmente a los VF. ....                                                             | 53 |
| Tabla 11. Funcionamiento del sistema experimental de los pilotos IPCT. ....                                                   | 53 |
| Tabla 12. Calendario de muestreos IPCT. ....                                                                                  | 54 |
| Tabla 13. Calendario de muestreos REAGRITECH. ....                                                                            | 56 |
| Tabla 14. Propuesta de plan de actividades. ....                                                                              | 57 |

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fotografía 1. Cajas de entrada y salida de HFSS. ....                                                                                                                   | 15 |
| Fotografía 2. Vista de la tubería perforada para la distribución del efluente y la caja de distribución o arqueta. Fuente: Ángel Gallegos. ....                         | 16 |
| Fotografía 3. Instalación de polietileno de alta densidad y geotextil para la impermeabilización del sistema. <i>Heraclio Bermudez</i> ©. ....                          | 16 |
| Fotografía 4. El medio granular deben estar libre de finos para reducir el riesgo de colmar el sistema. <i>Ángel Gallegos</i> ©. ....                                   | 17 |
| Fotografía 5. Las plantas ornamentales se han utilizado en los humedales con la finalidad de darle una mejor imagen. <i>Ángel Gallegos</i> ©. ....                      | 18 |
| Fotografía 6. Vista general de la ubicación del primer prototipo en Sudanell. Fuente: Lorena Aguilar. ....                                                              | 24 |
| Fotografía 7. Vilanova de la Barca. Ubicado a un costado del río Corb. Fuente: Lorena Aguilar. ....                                                                     | 24 |
| Fotografía 8. Vista de la ubicación del tercer prototipo en Bellvis. Fuente: Lorena Aguilar. ....                                                                       | 25 |
| Fotografía 9. Vista de los humedales Pilotos IPCT. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                             | 29 |
| Fotografía 10. Vista del prototipo REAGRITECH. Fuente: Jordi M. ....                                                                                                    | 29 |
| Fotografía 11 y 12. Ubicación y vista lateral de sistemas de plantas piloto IPCT. Fuente: Google maps y L. Aguilar. ....                                                | 29 |
| Fotografía 13. Una vez cortada la tapa superior de los depósitos de los humedales se instala en el fondo la tubería de drenaje y de aireación. Fuente: L. Aguilar. .... | 38 |
| Fotografía 14. Para evitar fugas se debe sellar la conexión entre la tubería de drenaje y la salida del deposito. Fuente: L. Aguilar. ....                              | 38 |
| Fotografía 15. La capa de drenaje con grava de 16 mm va en el fondo del humedal, después de haber colocado la tubería de drenaje. Fuente: L. Aguilar. ....              | 39 |
| Fotografía 16. El geotextil separa la capa de drenaje del medio filtrante. Se debe dejar una perforación para poner colocar el muestreador. Fuente: L. Aguilar. .       | 39 |
| Fotografía 17. Sobre el geotextil se coloca el medio filtrante de 16 mm y los muestreadores. Fuente: L. Aguilar. ....                                                   | 39 |
| Fotografía 18. Se coloca el medio filtrante de gravilla de 5 mm. Fuente: L. Aguilar                                                                                     | 39 |
| Fotografía 19. Vista del humedal con medio filtrante de corcho y una capa de 20 cm de grava de 16 mm para evitar que flote. Fuente: L. Aguilar. ....                    | 39 |
| Fotografía 20. Vista del humedal con medio filtrante de corcho y los depósitos de entrada al fondo. Fuente: L. Aguilar. ....                                            | 39 |
| Fotografía 21. Vista de la instalación del sistema de aireación. Fuente: L. Aguilar.                                                                                    | 40 |
| Fotografía 22. Vista del detalle del montaje del sistema de distribución de aire. Fuente: L. Aguilar. ....                                                              | 40 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fotografía 23. Sobre la capa de drenaje se coloca el medio filtrante de 16 mm y los muestreadores. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                                                                                | 40 |
| Fotografía 24. Se coloca el medio filtrante de gravilla de 5 mm. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                                                                                                                  | 40 |
| Fotografía 25. Vista del humedal con medio filtrante de grava. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                                                                                                                    | 40 |
| Fotografía 26. Vista del humedal con medio filtrante de corcho. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                                                                                                                   | 40 |
| Fotografía 27, 28 y 29. El prototipo, al estar construido dentro de contenedores marítimos, puede ser transportado a diferentes ubicaciones sin causar impactos en el entorno. Fuente: A. Gallegos. ....                                                                   | 42 |
| Fotografía 30 y 31. Vista del interior del contenedor marítimo usado como cuarto de control. Fuente: J. Morató. ....                                                                                                                                                       | 43 |
| Fotografía 32, 33, 34 y 35 . Vistas del cuadro de elementos hidráulicos y de la zona de control. Fuente: J. Morató. ....                                                                                                                                                   | 43 |
| Fotografía 36, 37, 38 y 39. Estructura metálica dentro del contenedor OpenTop y geomembrana y geotextil de impermeabilización. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                                                    | 44 |
| Fotografía 40 y 41. Cama de arena compactada y tubería de recogida del humedal vertical. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                                                                                          | 44 |
| Fotografía 42 y 43. Tuberías de recolección de agua y sensores de nivel en los humedales horizontales. Fuente: A. Gallegos. ....                                                                                                                                           | 45 |
| Fotografía 44 y 45. Las diferencias entre el medio granular de los humedales horizontales permitirán comparar la eficiencia de remoción del sistema entre el sustrato tradicional como grava y un subproducto de otras actividades como el corcho. Fuente: J. Morató. .... | 45 |
| Fotografía 46 y 47. Una adecuada distribución del agua en la superficie de los humedales permite que tengan el rendimiento de tratamiento esperado. Fuente: L. Aguilar. ....                                                                                               | 46 |
| Fotografía 48 y 49. Vista del muro vegetal y la cubierta. Fuente: J. Morató. ....                                                                                                                                                                                          | 46 |
| Fotografía 50 y 51. Trabajos de impermeabilización de la cubierta y sistema modular Igniagreeen. Fuente: A. Gallegos. ....                                                                                                                                                 | 47 |

## ACRÓNIMOS

ARS – Agua residual sintética.

AQUASOST – Grupo de gestión sostenible del Agua.

CD – Contaminación difusa

DBO – Demanda bioquímica de Oxígeno.

HC – Humedales construidos.

HFSS – Humedal de flujo horizontal subsuperficial.

N – Nitrógeno.

NT – Nitrógeno total.

NO<sub>3</sub> – Nitratos.

NT – Nitrógeno total.

SST – Sólidos suspendidos totales.

TIC – Tecnologías de la Información y Comunicación

VF – Humedal de flujo vertical.

## 1. RESUMEN

La propuesta del tema de tesis *Parámetros de diseño en humedales construidos de flujo subsuperficial bajo distintas condiciones climáticas, diferentes contaminantes y medios filtrantes* tiene como objetivo general “*Determinar los parámetros de diseño y comparar la eficiencia de remoción de contaminantes (plaguicidas) y de nutrientes (nitrógeno) provenientes de la escorrentía agrícola en humedales construidos de flujo subsuperficial vertical y horizontal bajo diferentes condiciones climáticas, aireación, medios filtrantes y a distintas profundidades*”. Y como objetivos específicos:

1. Determinar los parámetros de diseño para definir la constante de remoción  $k$  de primer orden en humedales construidos de flujo subsuperficial para agua de escorrentía agrícola.
2. Comparar la eficiencia de remoción de nutrientes (nitrógeno) a distintos niveles entre dos medios filtrantes diferentes: la grava y el corcho.
3. Evaluar los efectos de recirculación del efluente en humedales verticales de grava y corcho.
4. Evaluar los efectos de la aireación inducida dentro del sistema de tratamiento en humedales verticales de grava y corcho.
5. Determinar la remoción de plaguicidas en humedales construidos de flujo subsuperficial, según las configuraciones anteriores (medio filtrante, profundidad del medio filtrante, aireación y recirculación).

**Con el aumento de la población, en las últimas décadas las prácticas agrícolas han requerido aumentar su producción, por lo que han optimizado los sistemas de riego, agregado fertilizantes nitrogenados y aplicado plaguicidas a los cultivos.** Estas prácticas han ocasionado impactos directos sobre el agua, como la contaminación de acuíferos y cuerpos de agua, así como un aumento en el consumo del recurso hídrico.

**A nivel mundial un 70 % de los recursos hídricos son destinados a esta actividad.** En promedio el 42% del total de las extracciones de agua en la Unión Europea están destinadas a la agricultura, ascendiendo este porcentaje a valores de entre el 50 - 70% en los países miembros del suroeste.

**El nitrógeno es esencial para la vida en la Tierra;** las plantas lo absorben del suelo y los animales se alimentan de ellas, cuando mueren y se descomponen, el nitrógeno vuelve al suelo, donde las bacterias lo transforman y el ciclo comienza de nuevo (UE, 2010). Junto con el carbono, el fósforo y otros nutrientes esenciales, **el nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico complejo en el que se ven implicados diferentes organismos y procesos.**

Para entender el ciclo desde una perspectiva general en el medio ambiente, **las plantas aportan nitrógeno al sistema mediante la fijación de  $N_2$  o la absorción de nitratos del suelo, y que existen otros inputs que no se presentan de forma natural, como el uso de fertilizantes o la excreción de urea por parte de los animales.**

**Las aguas que presentan una concentración alta de nitrógeno normalmente la presentan en forma de amonio, nitratos, nitritos y otros derivados.** Estos compuestos pueden ser movilizados tanto por las plantas como por los microorganismos. **El hecho de que no siempre en la desnitrificación se dan todos las fases, en el tratamiento de aguas puede inducir en la creación de gases de efecto invernadero,** con un efecto muy negativo a nivel global, por lo que es necesario establecer un control de ratio  $N_2O/N_2$ .

El equilibrio generado a través del ciclo del nitrógeno puede verse afectado y causar un desbalance en los ecosistemas. **La cantidad excesiva de nutrientes como el nitrógeno en ambientes acuáticos causa algunas consecuencias como la eutrofización,** dando lugar a cambios en la abundancia y diversidad de especies, así como la proliferación de algas, zonas muertas desoxigenadas y la lixiviación de nitratos en las aguas subterráneas

En España, un 80% de las aguas subterráneas tienen concentraciones superiores a los 25 mg/L de  $NO_3$  (European Environment Agency, 2007) y un 12,7% del territorio ha sido declarado como zonas vulnerables por nitratos (Fernández, 2007).

**El uso de plaguicidas se ha incrementado considerablemente** a lo largo de los últimos 35 años, alcanzando tasas de crecimiento del 4 al 5,4 por ciento en algunas regiones. Hasta bien entrada la década de los 70 se consideraba que las aguas subterráneas tenían "cierto nivel de protección", a partir de entonces **empezaron a aparecer episodios de contaminación en los mantos freáticos.**

En el ámbito europeo, la vulnerabilidad de los recursos hídricos quedaba reflejada en un estudio realizado por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), según el cual un **70% de los ríos españoles estaban amenazados, especialmente por los pesticidas.**

**La contaminación difusa se refiere a la contaminación del aire y el agua desde una fuente de contaminación no puntual,** es decir, existe más de una fuente contaminante que es difícil de determinar. Este tipo de contaminación es difícil de predecir y controlar ya que la cantidad y frecuencia varía de manera irregular. **En el caso de los cuerpos de agua, una de las fuentes más importantes son las escorrentías de áreas agrícolas** que drenan hacia los ríos. En ella podemos encontrar diversos tipos de contaminantes como los sólidos suspendidos, sales solubles, Nitrógeno-Fósforo y los plaguicidas.

**Como solución a la problemática del consumo de agua para la agricultura y a la contaminación difusa por nitratos y plaguicidas se propone una tecnología natural para el tratamiento de aguas contaminadas como los humedales construidos (HC),** que ha diferencia de los sistemas convencionales de tratamiento, no tienen costos elevados de inversión y mantenimiento.

El funcionamiento se basa en el movimiento del efluente contaminado a través del medio granular, dispuesto en camas o canales de profundidad variable (la cuál depende del tipo de humedal), el cuál soporta las macrófitas y el biofilm que contiene los microorganismos responsables de degradar los contaminantes.

**Los HC son usados en el tratamiento de aguas residuales pero sobre todo en donde existe una gran proporción de los compuestos nitrogenados;** esto debido a que los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, las cuales ocurren en diferentes zonas del medio filtrante. Cuando se requiere eliminar compuestos nitrogenados, la combinación mas usada es un humedal vertical seguido de un humedal horizontal con recirculación del flujo.

Existen diversos métodos para dimensionar los HC. El método más moderno y aceptado es el PKC\*, donde k es una constante cinética que depende del tipo de contaminante y de la temperatura, en la cuál se llevan a cabo los procesos de remoción y donde C\* representa la concentración de fondo del humedal.

**Sin embargo, aunque los humedales verticales presentan una mayor eficiencia de remoción en la mayoría de contaminantes, en la actualidad no hay suficientes datos para evaluar la variabilidad de la remoción en función de la temperatura y los efectos estocásticos** (cambios estacionales ocasionados por el clima, el ciclo de biomasa de la planta y la temperatura del agua).

En el medio granular se dan varios procesos como la retención y la sedimentación de materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación de nutrientes y la asimilación e inactivación de microorganismos patógenos.

**Los humedales construidos también se pueden usar para tratar agua de escorrentía contaminada con pesticidas, sin embargo, éstos pueden dañar la estructura y función de las comunidades bacterianas asociadas al biofilm fijado en el medio granular.**

**El uso de materiales naturales procesados en los humedales construidos pueden presentar funciones adicionales más allá del simple proceso de filtración.** Sus áreas de superficie pueden constituir un soporte para el crecimiento de la población microbiana, así como para el desarrollo de la vegetación en el humedal. **Varios estudios han evaluado la idoneidad de los residuos de corcho como adsorbente.**

**La automatización en la operación y monitoreo en tiempo real de los HC para el tratamiento de agua de escorrentía agrícola permitiría seguramente aumentar la eficiencia y productividad de los sistemas de explotación** (A. Pérez, 2006), y al mismo tiempo preservar el medio ambiente.

Para desarrollar la tesis y cada uno de los temas a investigar se propone la construcción de un sistema experimental a escala piloto (IPCT) y de varios prototipos, dentro del proyecto LIFE REAGRITECH, cuyos **objetivos principales del proyecto REAGRITECH son reducir el consumo de agua y minimizar la contaminación difusa asociado al sector agrícola, utilizando tecnologías naturales para la descontaminación de la escorrentía subsuperficial y la recarga de los acuíferos aluviales.**

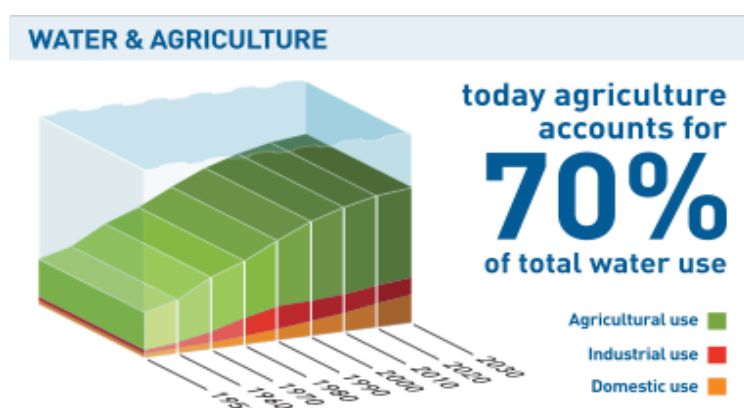


## 2. ESTADO DEL ARTE

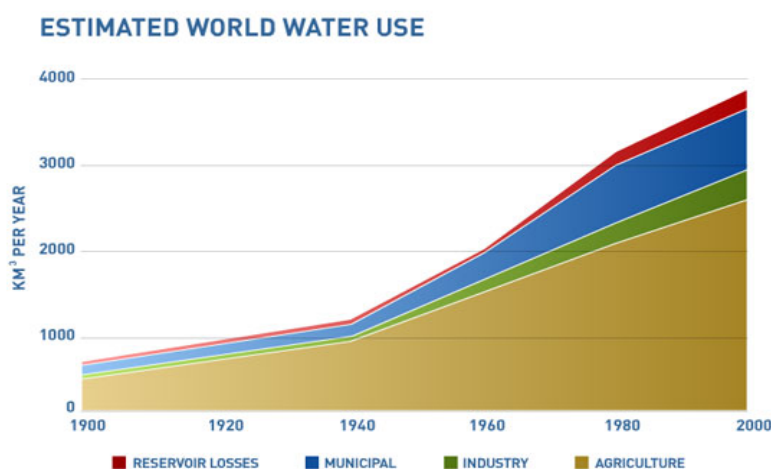
Con el aumento de la población, **en las últimas décadas las prácticas agrícolas han requerido aumentar su producción, por lo que han optimizado los sistemas de riego, agregado fertilizantes nitrogenados y aplicado plaguicidas a los cultivos.** Estas prácticas han ocasionado impactos directos sobre el agua, como la contaminación de acuíferos y cuerpos de agua, así como un aumento en el consumo del recurso hídrico.

### 2.1. EL AGUA EN LA AGRICULTURA

Desde 1950 se ha producido un aumento considerable en el uso del agua para fines agrícolas. **A nivel mundial un 70 % de los recursos hídricos son destinados a esta actividad** (Figura 1) y en el año 2000 se estimó un volumen de uso de un poco más de 2.500 km<sup>3</sup> (Figura 2).

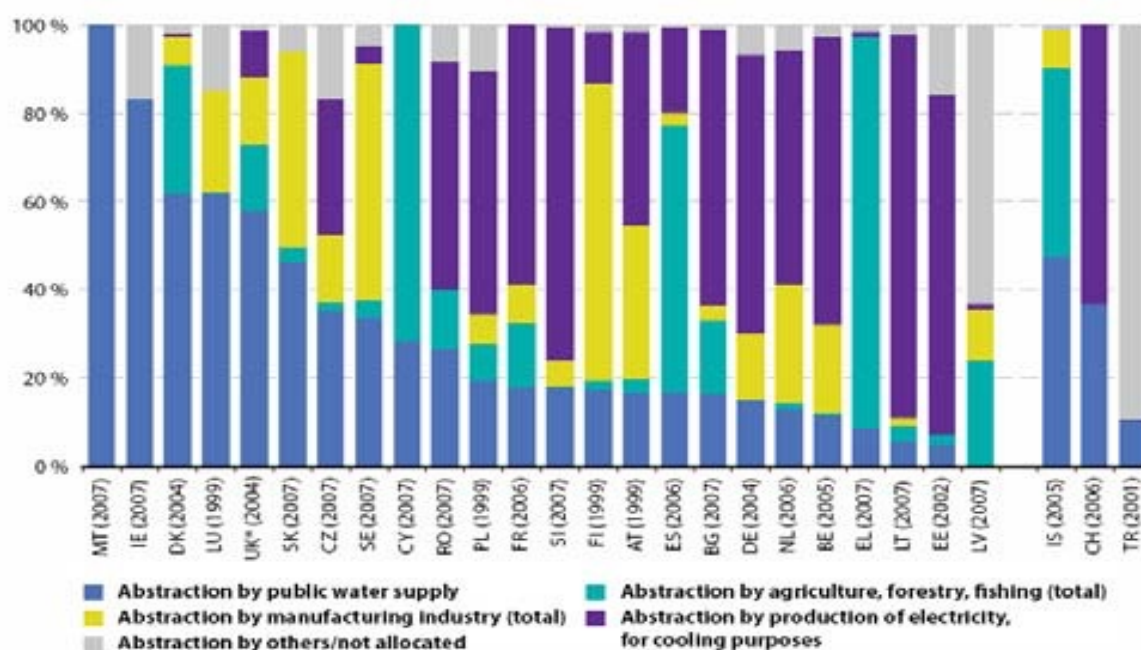


**Figura 1.** El 70% del uso del agua disponible en el mundo es para actividades agrícolas. Fuente: FAO Water.



**Figura 2.** El volumen de uso estimado de agua para la agricultura en el año 2000 fue de más de 2.500 km<sup>3</sup>. Fuente: FAO.

En promedio el 42% del total de las extracciones de agua en la Unión Europea están destinadas a la agricultura, ascendiendo este porcentaje a valores de entre el 50 - 70% en los países miembros del suroeste (Figura 3). Esto se tradujo en unos volúmenes de extracción de agua (subterránea y superficial) para el cultivo de 38.900 millones de m<sup>3</sup> en el año 2006 en los EU27 (en los años posteriores no se dispone de los datos de gran parte de los países de la EU) (Eurostat, 2008).



\*UK: Wales and England only.

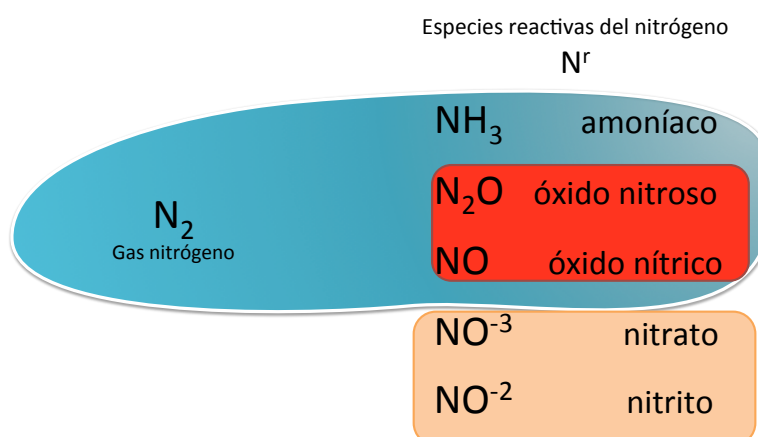
**Figura 3.** Extracción de agua por sectores de actividad en los países europeos, último año de datos disponible entre paréntesis (%del total de extracción bruta). Fuente: Eurostat, 2008.

## 2.2. EL CICLO DEL NITROGENO

**El nitrógeno es esencial para la vida en la Tierra;** las plantas lo absorben del suelo y los animales se alimentan de ellas, cuando mueren y se descomponen, el nitrógeno vuelve al suelo, donde las bacterias lo transforman y el ciclo comienza de nuevo (UE, 2010).

**Existen diferentes compuestos en los que podemos encontrar el nitrógeno en el ambiente** (Figura 4). Cada una de ellas presenta diferentes características, por ejemplo el Gas Nitrógeno (N<sub>2</sub>) se encuentra en forma gaseosa y en grandes cantidades en el ambiente, y como especies de Nitrógeno reactivo (N<sup>r</sup>) se tiene:

- Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Fácilmente degradable, presente en el suelo ( $\text{NH}_4^+$ ) y el ambiente. Utilizado en gran medida por plantas y bacterias.
- $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso) y  $\text{NO}$  (óxido nítrico). Producen gases de efecto invernadero.
- Nitrato ( $\text{NO}^{-3}$ ) y nitrito ( $\text{NO}^{-2}$ ): compuestos provenientes de la oxidación de materia orgánica los cuáles producen contaminación en altas cantidades.



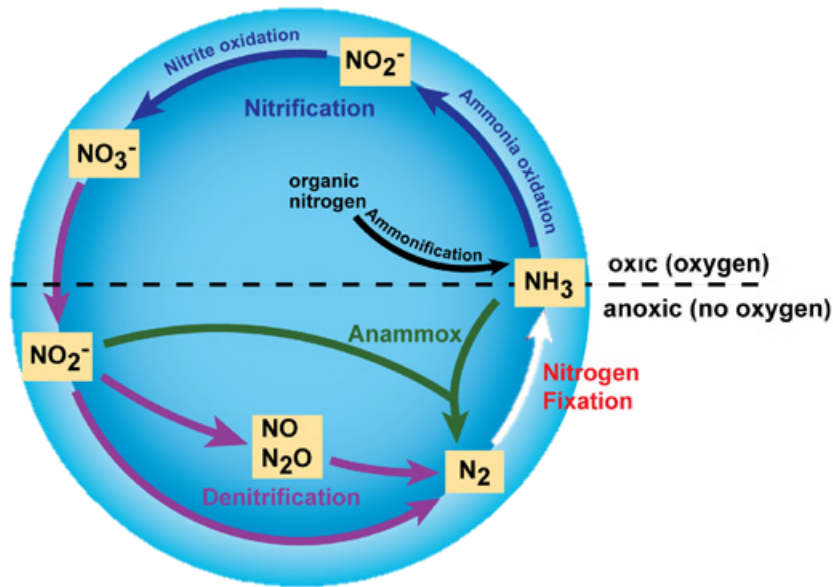
**Figura 4.** De las distintas formas en que se puede encontrar el nitrógeno las más nocivas para el medio ambiente son  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}^{-3}$  y  $\text{NO}^{-2}$ . Fuente: Elaboración Adriá Auladell.

Junto con el carbono, el fósforo y otros nutrientes esenciales, **el nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico complejo en el que se ven implicados diferentes organismos y procesos** (Figura 5).

Se puede distinguir los procesos en dos grandes grupos, según si son procesos en ambientes óxicos o en ambientes anóxicos:

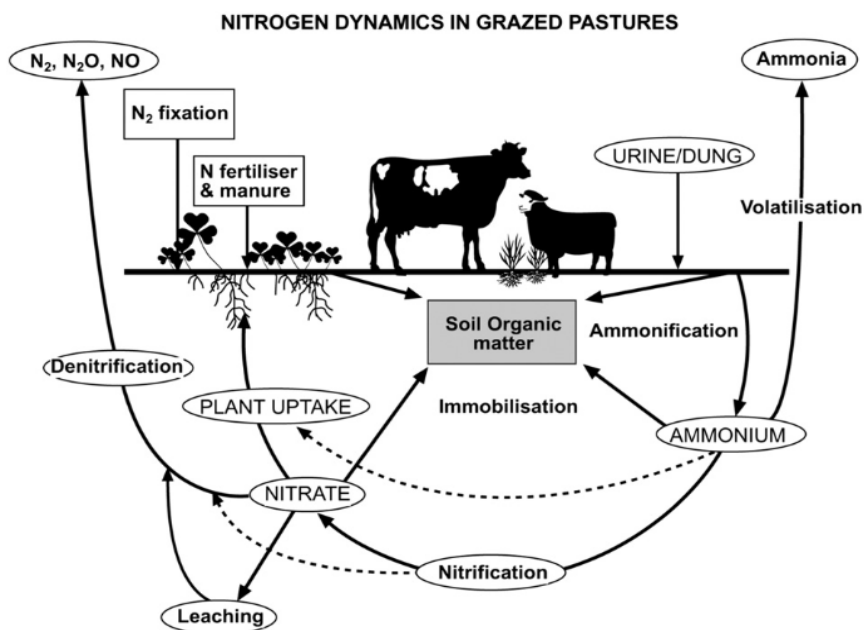
- La nitrificación consiste en oxidar el amonio obteniendo energía en el proceso por parte de microorganismos quimioautótrofos.
- La desnitrificación consiste en reducir los nitratos presentes en el ambiente utilizándolos como aceptores finales de electrones, debido a la falta de oxígeno.

**A partir del nitrato, se llega a obtener un conjunto de derivados, incluyendo el  $\text{N}_2$  atmosférico.** Existen otros procesos anaeróbicos como la reacción annamox, de bastante interés ya que produce directamente  $\text{N}_2$  atmosférico.



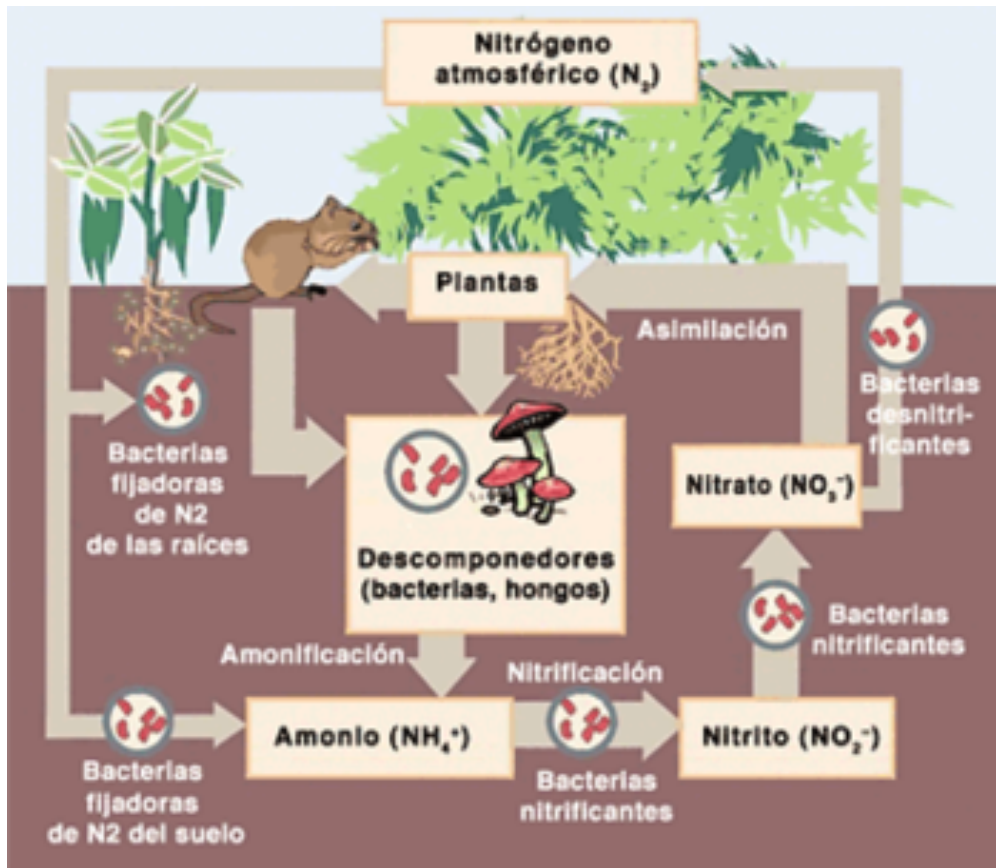
**Figura 5.** El nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico complejo en el que se ven implicados diferentes organismos y procesos en ambientes óxicos o en ambientes anóxicos. Fuente: Anne Bernhard.

Para observar el ciclo desde una perspectiva general en el medio ambiente, la (Figura 6) muestra como **las plantas aportan nitrógeno al sistema mediante la fijación de  $N_2$  o la absorción de nitratos del suelo, y que existen otros inputs que no se presentan de forma natural, como el uso de fertilizantes o la excreción de urea por parte de los animales.**



**Figura 6.** El nitrógeno es inmovilizado en el sistema por los organismos para la creación de proteínas. Fuente: Saggar et al.

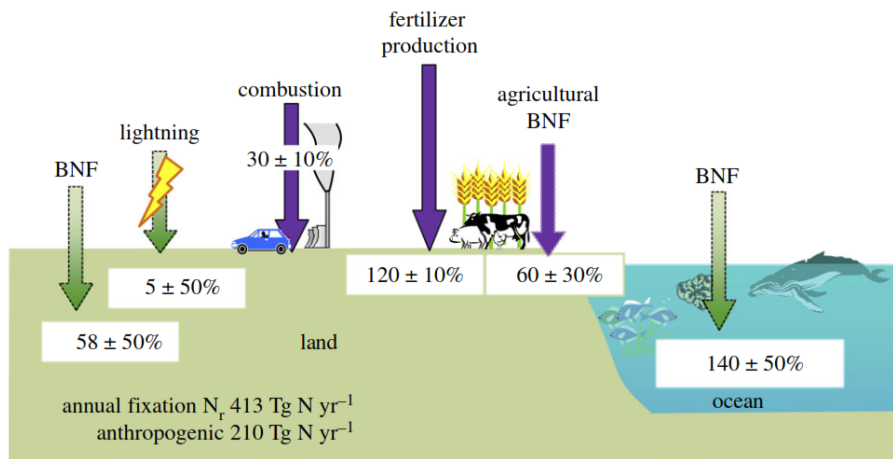
El papel más importante de las bacterias es la descomposición de la materia prima, permitiendo que el sistema cierre el ciclo (Figura 7), tanto en el papel de la nitrificación como en el de la desnitrificación.



**Figura 7.** El nitrógeno en el suelo es descompuesto por bacterias y absorbido por plantas y animales. Fuente: <http://explorando-el-pais5.webnode.es/a10-ciclos/>.

Existen diferentes **procesos capaces de introducir nitrógeno gas de nuevo en el sistema** por medio de la formación de especies reactivas. Se pueden distinguir en dos grupos:

- **Procesos que ocurren en la natura.** Ocurren de forma espontánea vienen dados por la fijación biológica de nitrógeno (organismos) y la caída de rayos (produciendo NO). Contribuyen fijando 203 Tg N yr<sup>-1</sup>. Podemos observar un intervalo de error muy grande debido a la dificultad de aislar los datos de la actividad humana (Figura 8).
- **Procesos antropogénicos.** Contribuyen con 210 Tg N yr<sup>-1</sup>. Esta cantidad viene dada por procesos como la combustión, la producción y uso de fertilizantes para el crecimiento de cultivos y la fijación de nitrógeno por los mismos cultivos de la agricultura.



**Figura 8.** La actividad humana ha duplicado la fijación de nitrógeno a nivel global lo que tiene un efecto a nivel ambiental muy grande. Fuente: D.Fowler et al.

**Las aguas que presentan una concentración alta de nitrógeno normalmente la presentan en forma de amonio, nitratos, nitritos y otros derivados.** Estos compuestos pueden ser movilizables tanto por las plantas como por los microorganismos. Las primeras lo usarán para la creación de biomasa, y los segundos para la creación de biomasa y la obtención de energía en determinados ambientes (desnitrificación).

**El hecho de que no siempre en la desnitrificación se dan todas las fases, en el tratamiento de aguas puede inducir en la creación de gases de efecto invernadero,** con un efecto muy negativo a nivel global, por lo que es necesario establecer un control de ratio N<sub>2</sub>O/N<sub>2</sub>.

### 2.3. CONTAMINACIÓN POR NITRATOS

**El equilibrio generado a través del ciclo del nitrógeno puede verse afectado y causar un desbalance en los ecosistemas al haber un alto aporte de nitrógeno, lo cuál puede ser ocasionado a través del uso de fertilizantes.**

**La cantidad excesiva de nutrientes como el nitrógeno en ambientes acuáticos causa algunas consecuencias como la eutrofización,** dando lugar a cambios en la abundancia y diversidad de especies, así como la proliferación de algas, zonas muertas desoxigenadas y la lixiviación de nitratos en las aguas subterráneas (E. E. Agency, 2015 ).

La incorporación de los nitratos a las aguas depende de un conjunto de transformaciones, procesos de transporte y a variables características del suelo; que juntas condicionan la incorporación de compuestos de nitrógeno en mayor o menor volumen al flujo subterráneo (L. Fernández Ruiz, 2007).

La Unión Europea indica que el 15 % de las estaciones de control de aguas subterráneas registra niveles de nitratos superiores al límite de 50 mg por litro y el 66 % presenta niveles inferiores a 25 mg/l (UE, 2010). En la UE, entre el 50 y 80% de nitrógeno y el 30 y 80% de fósforo presentes en el agua se debe a las actividades agrícolas (Isermann 1990, CEE 2003).

**En España, un 80% de las aguas subterráneas tienen concentraciones superiores a los 25 mg/L de NO<sub>3</sub>** (European Environment Agency, 2007) y un 12,7% del territorio ha sido declarado como zonas vulnerables por nitratos (Fernández, 2007).

**Los anteriores valores de nitratos en aguas subterráneas causan gran preocupación por parte de las autoridades ambientales de la Unión Europea (UE), debido a que la calidad de las aguas subterráneas es objeto de atención preferente al ser un factor esencial para el aprovechamiento de este recurso renovable de importancia estratégica**, tal como se estipula en la normatividad 91/676/CEE del 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias, en la que se indica que la máxima concentración permitida de nitratos en las aguas de consumo público en los países de la UE es de 50 mg/L. A partir de la aprobación de la Directiva 91/676 en el Estado Español se declararon como zonas vulnerables por nitratos a partir de la detección de concentraciones superiores a 50 mg/l de nitrato.

Posteriormente con la aparición de la Directiva 2000/60/CE, se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas llamado Directiva Marco de Agua (DMA) (El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, 2000), el cual se fortalece con la Directiva 2006/118/CE relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (E. P. E. Y. E. C. D. L. U. Europea, 2006).

La Directiva Marco del agua (DMA) y la Directiva sobre la protección de las aguas subterráneas, trabajan en estrategias de prevención y control de la contaminación de estas aguas. Por lo que **todas las medidas legales y actuaciones técnicas que se encuentran en desarrollo, se dirigen a conseguir una disminución sustancial de nitratos en aguas de infiltración, para alcanzar los niveles permitidos por la legislación, lo que ha obligado a realizar ajustes en el desarrollo de las prácticas agrarias**, debido a que se atribuye a estas practicas la mayor responsabilidad de contaminación por nitratos en las aguas subterráneas (L. Fernández Ruiz, 2005).

## **2.4. LOS PLAGUICIDAS EN LA AGRICULTURA**

**El uso de plaguicidas se ha incrementado considerablemente a lo largo de los últimos 35 años, alcanzando tasas de crecimiento del 4 al 5,4 por ciento en algunas regiones.** En los años noventa se apreció una disminución del uso de insecticidas, tanto en países desarrollados, como Francia, Alemania y el Reino Unido, como en unos cuantos países en desarrollo, como la India.



En contraste, el uso de herbicidas continuó aumentando en la mayoría de los países. Además, su uso será frenado por la creciente demanda de cultivos orgánicos, producidos sin la adición de productos químicos. Es probable que en el futuro aumente el uso de plaguicidas "inteligentes", variedades de cultivos resistentes y métodos ecológicos de control de plagas.

**Hasta bien entrada la década de los 70 se consideraba que las aguas subterráneas tenían "cierto nivel de protección", a partir de entonces empezaron a aparecer episodios de contaminación en los mantos freáticos** que pusieron en evidencia la capacidad de ciertos contaminantes para atravesar todas las capas de filtración, llegar a la zona de saturación y contaminar las aguas.

**En Estados Unidos se han detectado 74 pesticidas en 28 estados, y de 1970 a 1985 se confirmaron más de 52.000 casos de enfermedad por contaminación del agua.** En esta investigación no se ha detectado, sin embargo, la presencia de insecticidas o fungicidas.

**En el ámbito europeo, la vulnerabilidad de los recursos hídricos quedaba reflejada en un estudio realizado por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), según el cual un 70% de los ríos españoles estaban amenazados, especialmente por los pesticidas.** Otro estudio, esta vez realizado por el Institut Français de l'Environnement (IFEN, en sus siglas francesas), demuestra que el 96% de las aguas superficiales y el 61% de las subterráneas del país están contaminadas por pesticidas.

**En Europa, la Directiva Marco del Agua (DMA) tiene como objetivo fijar, para 2015, límites de concentración para 41 sustancias consideradas peligrosas para la seguridad del medio acuática.** Entre estas sustancias se incluyen pesticidas, biocidas y metales pesados.

## **2.5. CONTAMINACIÓN DIFUSA (CD)**

**La contaminación difusa se refiere a la contaminación del aire y el agua desde una fuente de contaminación no puntual,** es decir, existe más de una fuente contaminante que es difícil de determinar. Este tipo de contaminación es difícil de predecir y controlar ya que la cantidad y frecuencia varía de manera irregular.

**En el caso de los cuerpos de agua, una de las fuentes más importantes son las escorrentías de áreas agrícolas** que drenan hacia los ríos. En ella podemos encontrar diversos tipos de contaminantes como los sólidos suspendidos, sales solubles, Nitrógeno-Fósforo y los plaguicidas.



## 2.6. SISTEMAS NATURALES PARA EL TRATAMIENTO DE LA CD: HUMEDALES CONSTRUIDOS (HC)

Los sistemas naturales de tratamiento de agua son tecnologías con un diseño ecológico inspirado en los ecosistemas naturales (Arroyo, 2010), que pueden ser utilizados para el tratamiento de este tipo de contaminación.

La diferencia entre los sistemas convencionales y los sistemas que encontramos en la naturaleza, es que los primeros aceleran los procesos de degradación aprovechando y potenciando los procesos de depuración física, química y biológica que ocurren espontáneamente en la naturaleza.

Sin embargo los sistemas convencionales de potabilización y depuración requieren de numerosos equipos y sistemas electromecánicos que producen costos de explotación y mantenimiento elevados, por lo que en zonas rurales o de difícil acceso, se convierten en una opción menos viable para el tratamiento de aguas contaminadas.

Algunas de las ventajas de los sistemas naturales de tratamiento en comparación con los sistemas convencionales se pueden observar en la siguiente tabla 1.

**Tabla 1.** Comparación entre sistemas naturales y convencionales. Fuente: Grupo de Gestión Sostenible del Agua - AquaSost.

| Sistemas Naturales                            | Sistemas Convencionales                    |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Costo de proyecto medio                       | Elevado costo de proyecto                  |
| Bajo costo de mantenimiento                   | Alto costo de mantenimiento                |
| Bajo o nulo consumo energético                | Requiere consumo energético                |
| No requiere de personal técnico especializado | Requiere de personal técnico especializado |
| Producción de fangos baja o nula              | Elevada producción de fangos               |
| No genera malos olores                        | Genera malos olores                        |

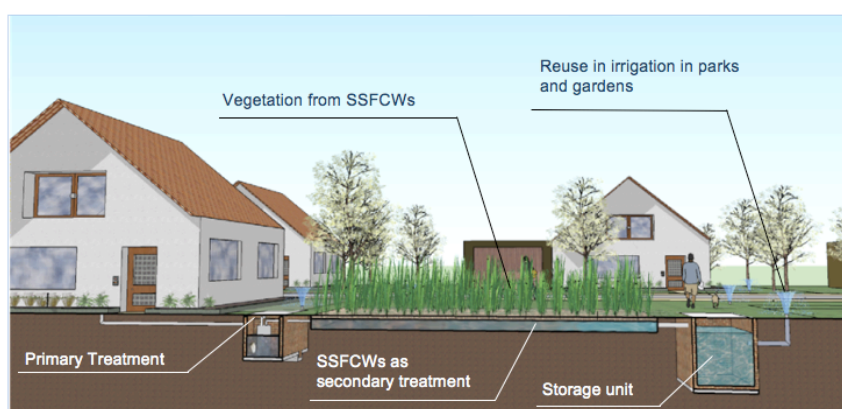
Una de las desventajas sistemas naturales es que tienen requerimientos de superficie más grandes que las tecnologías convencionales por lo que su aplicación está limitada por la disponibilidad de terrenos a precios accesibles, limitándose generalmente a las zonas rurales. Sin embargo, investigaciones recientes han mejorado la eficiencia del tratamiento para reducir el área requerida para la construcción.

Dentro de este tipo de tecnologías se encuentran los humedales contruidos y las franjas vegetadas.

### 2.6.1. GENERALIDADES

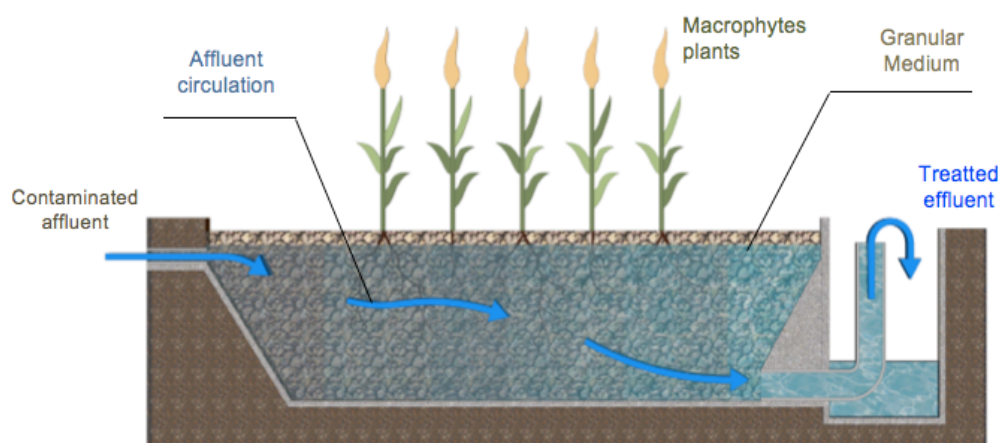
Como solución a la problemática del consumo de agua para la agricultura y a la contaminación difusa por nitratos y plaguicidas se propone una tecnología natural para el tratamiento de aguas contaminadas como los humedales construidos (HC), que ha diferencia de los sistemas convencionales de tratamiento, no tienen costos elevados de inversión y mantenimiento.

Los humedales construidos son sistemas que utilizan condiciones naturales, y ningún tipo de energía externa, para mejorar la calidad del agua del agua a través de una combinación de procesos biológicos físicos y químicos. Pueden ser utilizados con éxito en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, agrícolas y de escorrentía urbana (Figura 9).



**Figura 9.** Ejemplo del tratamiento de las aguas residuales de una urbanización por medio de HFSS. Al ser una tecnología natural se puede integrar perfectamente en el medio. Fuente: AquaSost.

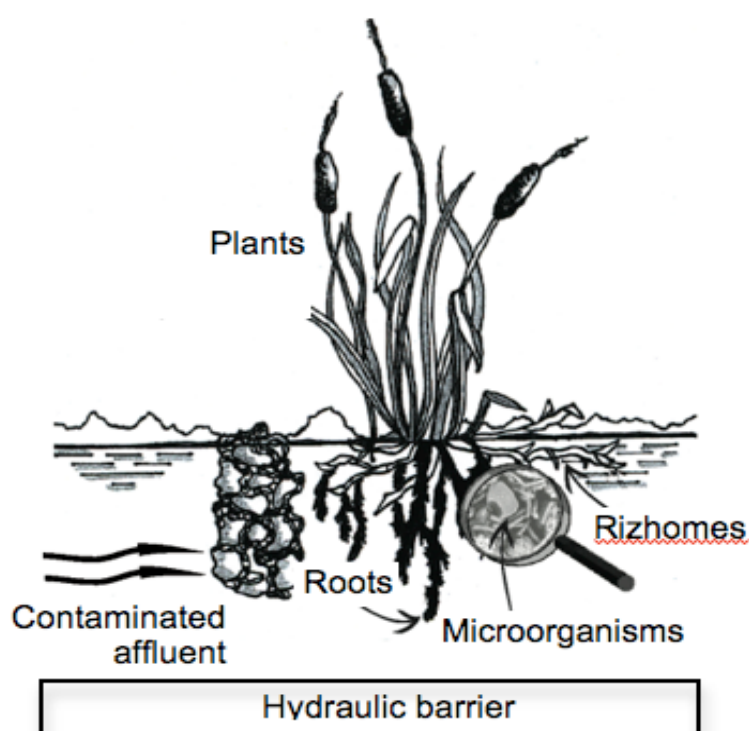
El funcionamiento se basa en el movimiento del afluente contaminado a través del medio granular, dispuesto en camas o canales de profundidad variable (la cuál depende del tipo de humedal), el cuál soporta las macrófitas y el biofilm que contiene los microorganismos responsables de degradar los contaminantes (Figura 10).



**Figura 10.** Esquema de funcionamiento de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: AquaSost.

**La vegetación actúa como un filtro verde para mejorar la calidad del agua y cumple un papel clave en el desempeño de los humedales**, ya que contribuye a la reducción de carga contaminante a partir de procesos de fitoextracción, fitoestabilización, transpiración y rizofiltración (Kadlec, 1999).

Los HC simulan procesos naturales a partir de la vegetación, del medio filtrante y de las relaciones microbianas allí ocurridas, las cuales **trabajan como un sistema que tiene entre sus principales funciones la absorción de nutrientes, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas** (J. Vymazal and T. Březinová, 2015). La Figura 11 muestra la interacción entre los componentes de los humedales construidos: el sustrato, la columna de agua, la vegetación y microorganismos, lo que determina el grado de purificación que se puede obtener en el efluente final.



**Figura 11.** Interacción entre los diferentes elementos de HC. Fuente: Adaptación AquaSost a partir de Constructed Wetland Treating Wastewater with Cenoses of Plants and Microorganisms, A Research Association at UFZ center for Enviromental Research Leipzig-Halle.

**Vale la pena destacar que para que los HC funcionen adecuadamente es necesario que los tratamientos anteriores también estén trabajando correctamente**, por lo que en el diseño, punto 2.6.4., debe considerarse como una combinación de operaciones y procesos de un sistema de tratamiento integrado, con la finalidad de reducir el riesgo de colmatación del humedal y evitar problemas en el cumplimiento de los objetivos de remoción de contaminantes establecidos.

### 2.6.2. TIPOS

Dependiendo de la forma en como circula el agua en el humedal construido, éstos pueden ser superficiales (circula expuesta a la atmósfera) o subsuperficiales (cuando no tiene contacto con ella). Los subsuperficiales se dividen en:

- Horizontales (HSSF). La circulación del agua es continua y lo hace de forma horizontal sobre el medio granular.
- Verticales (VF). La circulación del efluente va de la parte superior a la inferior del humedal y ciclos discontinuos, permitiendo la aireación en el medio granular.
- Híbridos. Cuando se combina el HSSF y el VF se les conoce como un sistema híbrido (J. Vymazal 2013).

En una encuesta realizada sobre el estado en la aplicación de los sistemas híbridos, se tiene que hay 60 humedales construidos híbridos en 24 países; con mayor presencia en Europa y Asia, mientras que en otros continentes su uso es limitado. De los 60 sistemas híbridos estudiados, 38 han sido diseñados para el tratamiento de aguas residuales municipales, mientras que 22 sistemas híbridos fueron diseñados para el tratamiento de diversas aguas residuales industriales y agrícolas.

El sistema híbrido más utilizado es un humedal construido VF-HFSS, esto debido a que son un poco más eficientes en la eliminación de amoníaco que los sistemas híbridos con otro tipo de combinaciones (J. Vymazal, 2013).

### 2.6.3. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.

#### **ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA**

Los HC son sistemas que requieren una **recolección y distribución adecuada del agua**. Por lo tanto, las estructuras de entrada y salida (Fotografía 1) deben estar diseñadas y construidas adecuadamente. Las aguas residuales de los tratamientos anteriores se conducen hacia una caja de distribución donde el flujo se vierte a una cama de grava a través de varias tuberías.



**Fotografía 1.** Cajas de entrada y salida de HFSS.  
Fuente: Ángel Gallegos.



La distribución y recogida del efluente se hace a través de tuberías perforadas instaladas en la superficie, (Fotografía 2), y fondo del humedal respectivamente. Este tubo está conectado a una arqueta de donde el nivel del agua puede ser regulado, lo que permite drenar el humedal durante las operaciones de mantenimiento.



**Fotografía 2.** Vista de la tubería perforada para la distribución del efluente y la caja de distribución o arqueta. Fuente: Ángel Gallegos.

### **IMPERMEABILIZACIÓN**

Es necesario instalar una barrera impermeable para confinar el sistema **para prevenir la infiltración de las aguas residuales en el subsuelo** (Fotografía 3). Regularmente, láminas de plástico (HDPE) se utilizan en combinación con revestimientos de geotextil para evitar que las raíces de las plantas o las piedras perforen la lámina.



**Fotografía 3.** Instalación de polietileno de alta densidad y geotextil para la impermeabilización del sistema. *Heraclio Bermudez* ©.

## MEDIO GRANULAR

En el medio granular se dan varios procesos como la retención y la sedimentación de materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación de nutrientes y la asimilación e inactivación de microorganismos patógenos. En las zonas de entrada y salida, la grava más grande se coloca con el fin de diferenciar estas áreas del medio granular principal. Esto también favorece la conductividad dentro del sistema.

Este medio debe mantenerse limpio (Fotografía 4), homogéneo y capaz de mantener su forma a largo plazo. Debe permitir que las plantas y los biofilm se desarrollen correctamente. Los medios granulares con un diámetro de 5 a 8 mm ofrecen excelentes resultados. Una característica importante es la conductividad hidráulica del medio granular, ya que limita la capacidad de flujo de agua del sistema. En el diseño se debe considerar que la **conductividad hidráulica disminuirá en el tiempo debido a la acumulación de la materia orgánica y biofilm**.



**Fotografía 4.** El medio granular deben estar libre de finos para reducir el riesgo de colmatar el sistema. Ángel Gallegos ©.

Además, **las bacterias responsables de la degradación de la materia orgánica ocupan la superficie del material granular** para la formación de la película bacteriana (biofilm), lo que con el paso del tiempo disminuirá la conductividad hidráulica.

## VEGETACIÓN

Las especies de plantas más utilizadas en los humedales son las *Phragmites*, *Typha* o *Scirpus*. También se ha estudiado el efecto de plantas ornamentales (Fotografía 5) . Todas estas plantas **son capaces de adaptarse para vivir en ambientes permanentemente inundados**. Sus tejidos internos están equipados con espacios vacíos (aerenquimas) o bolsas que permiten que el oxígeno fluya desde las partes aéreas a los órganos enterrados para cubrir la necesidad que tienen de éste.



**Fotografía 5.** Las plantas ornamentales se han utilizado en los humedales con la finalidad de darle una mejor imagen. *Ángel Gallegos* ©.

#### **2.6.4. DISEÑO**

**En el diseño de los HC se emplean conceptos hidráulicos, biológicos y microbiológicos.** Son sistemas de tratamiento de tipo natural, que, a partir de la emulación de procesos físicos, químicos y biológicos, mejoran la calidad del agua residual que fluye a través de estos (Wittgreen y Maehlum, 1997; Aluko y Sridhar, 2005).

Los factores que se deben tener en cuenta en el diseño son las características del agua residual (DBO5, sólidos suspendidos, pH, sustancias tóxicas, la calidad del efluente requerido para la descarga), los parámetros climáticos (precipitaciones, temperatura, radiación solar) y el costo y disponibilidad del terreno.

**Todos los tratamientos de aguas residuales son el resultado de la combinación de operaciones y procesos unitarios. El sistema de humedales artificiales no son una excepción y para su correcto funcionamiento es necesario tener un buen diseño de todo el sistema de tratamiento y tener en cuenta un adecuado mantenimiento periódico.**

El esquema más común de un humedal construido consta de un pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario (los propios humedales) y, dependiendo del objetivo de calidad establecido, un tratamiento terciario.

#### **PRETRATAMIENTO**

Su principal objetivo es eliminar objetos grandes, grasas y partículas que flotan en las aguas residuales, que pudieran colmatar el sistema de distribución del efluente así como el mismo lecho del humedal. Por lo general se compone de rejillas de desbaste y / o trampas de grasa.

## **TRATAMIENTO PRIMARIO**

El tratamiento primario tiene como objetivo reducir los sólidos en suspensión en las aguas residuales para evitar problemas en las siguientes unidades de tratamiento; Tanques Sépticos y Imhoff son ejemplos de estas tecnologías de tratamiento.

## **TRATAMIENTO SECUNDARIO**

El tratamiento secundario tiene como objetivo eliminar los contaminantes orgánicos en aguas residuales y reducir la demanda de oxígeno del agua. Los reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) y los HFSS son ejemplos de este tipo de tecnologías de tratamiento.

## **TRATAMIENTO TERCIARIO**

El tratamiento terciario se utiliza para eliminar los compuestos específicos que no han sido eliminados por los procesos anteriores. Como ejemplos de estos tratamientos tenemos los procesos de ozonización y filtros de carbón activado.

**El diseño de los sistemas híbridos se debe realizar con el objetivo de aprovechar las ventajas de cada tipo de humedal construido en busca de hallar la complementariedad entre estos** (J.-H. Park, S.-H. Kim, 2015). El uso de los sistemas híbridos incrementó en la década de 2000 debido principalmente a los estrictos límites de descarga estipulados para compuestos nitrogenados y a las altas cargas contaminantes en las aguas residuales a tratar (J. Vymazal, 2013).

**Los factores que se deben tener en cuenta en el diseño son las características del agua residual** ( $DBO_5$ , sólidos suspendidos, pH, sustancias tóxicas, la calidad del efluente requerido para la descarga), **los parámetros climáticos** (precipitaciones, temperatura, radiación solar) y **el costo y disponibilidad del terreno**. Se debe considerar que la **conductividad hidráulica disminuirá en el tiempo debido a la acumulación de la materia orgánica y biofilm**.

**Existen diversos métodos para dimensionar los HC. El método más moderno y aceptado es el PKC\*, donde k es una constante cinética que depende del tipo de contaminante y de la temperatura**, en la cuál se llevan a cabo los procesos de remoción y donde  $C^*$  representa la concentración de fondo del humedal.

Sin embargo, aunque los humedales verticales presentan una mayor eficiencia de remoción en la mayoría de contaminantes, en la actualidad no hay suficientes datos para evaluar la variabilidad de la remoción en función de la temperatura y los efectos estocásticos (cambios estacionales que son impulsados por el clima, el ciclo de biomasa de la planta y la temperatura del agua) (R. Kadlec, 2009).



**Detalles trascendentales de eliminación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y nitratos ( $\text{NO}_3$ ) en función de la profundidad del lecho no están disponibles actualmente para una variedad de humedales de flujo vertical.**

Sin embargo, se ha demostrado que la mayoría de la biomasa microbiana se encuentra en los 20 cm superiores de la cama del humedal vertical (Langergraber et al, 2006b.); por lo tanto, es altamente probable que la eliminación orgánicos se produce preferentemente en esta región superior, debido a la filtración de la materia orgánica en partículas, mayor disponibilidad de oxígeno, y una mayor biomasa microbiana (R. Kadlec, 2009).

#### **2.6.5. TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS POR NITRATOS**

**Los HC son usados en el tratamiento de aguas residuales pero sobre todo en donde existe una gran proporción de los compuestos nitrogenados;** esto debido a que los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, las cuales ocurren en diferentes zonas del medio filtrante (C. Platzer, 1999).

**Cuando se requiere eliminar compuestos nitrogenados, la combinación mas usada es un VF, seguido de un HSSF con recirculación del flujo.**

**Los HSSF son limitados en la nitrificación por la ausencia de oxígeno en el lecho de filtración, por lo tanto no son eficaces en la eliminación de amoníaco** (J. Vymazal, 2014); por otro lado, las condiciones anóxicas y anaeróbicas son adecuadas para la desnitrificación, lo que se ve beneficiado dado que la mayor parte de las camas de filtración permanecen (H. Brix, 1987). **En los VF la dirección, de la parte superior a la inferior, y la intermitencia del flujo permite la aireación en el medio granular, por tal motivo son excelentes para la nitrificación** (Cooper, 2009).

La remoción de nitrógeno total en los HC varía entre 40 y 55% para un rango de carga entre 250 y 630 gr  $\text{m}^2$   $\text{yr}^{-1}$ , dependiendo de su tipología y carga de entrada (Vymazal 2007).

#### **2.6.6. TRATAMIENTO DE PLAGUICIDAS**

**Una tecnología simple y de bajo costo para la eliminación de estos contaminantes no existe, y las tecnologías utilizadas normalmente para tratar estos efluentes suelen ser costosas.** Las alternativas actuales al uso de pesticidas son los cultivos resistentes o el control biológico de plagas (Arriaga, T, 2011).

La fotocátalisis heterogénea se ha empleado como alternativa para degradar sustancias que no se pueden descomponer mediante sistemas biológicos. Sin embargo, su mayor desventaja son sus elevados costos de operación. Por consiguiente, **estudios han planteado la oxidación parcial de los contaminantes mediante esta técnica como tratamiento primario, para después someterlos a tratamiento biológico** (Arriaga, T, 2011).

En este punto, **los humedales contruidos se pueden usar para tratar agua de escorrentía contaminada con pesticidas**, sin embargo, éstos pueden dañar la estructura y función de las comunidades bacterianas asociadas a un biofilm (Tlili et al., 2008), solamente las células persistentes darán lugar a un nuevo crecimiento de la biopelícula (Chambless et al., 2006).

## **2.6.7. MEDIOS FILTRANTES**

El tratamiento del agua en humedales artificiales se produce por la interacción entre sus componentes y las propiedades físicas, químicas y fenómenos biológicos dentro de ellos (Arias y Brix, 2003). En esas interacciones, **los microorganismos unidos a superficies (grava, raíces, etc.), que se organizan como biofilms, desempeñan un papel esencial en la transformación y la mineralización de los nutrientes y contaminantes orgánicos** (Stottmeister et al., 2003).

Debido a la estructura excepcionalmente compleja y la estructura interna y externa peculiar de biofilms (Lawrence et al, 2001; Lasur-Kruh et al, 2010), los microorganismos se organizan en ellos como un mecanismo de resistencia para repeler los agentes antimicrobianos (Mah & O'Toole, 2001; Heinzl, 1998), como los pesticidas.

En los **humedales el medio filtrante o sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación** que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico (Delgadillo et al., 2010).

**El medio filtrante en los humedales sirve de soporte para la vegetación**, provee de sitios para las transformaciones químicas y bioquímicas y dota de espacios para el almacenamiento de contaminantes.

**Los materiales utilizados como sustratos de humedales contruidos incluyen arena, grava, suelo y materiales orgánicos. La principal característica del medio o sustrato es que debe tener la porosidad suficiente para permitir el paso de agua a través de él**, por lo que se recomienda utilizar materiales o suelos que sean granulares. En general, se aconseja utilizar gravas lavadas, con poco material fino, con una granulometría diferente según la calidad del agua entrante (Vymazal et al., 1998).

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidad de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero, este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004).

Así mismo el sustrato es importante porque de forma indirecta, **el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora** (Delgadillo et al., 2010).

**El uso de materiales naturales procesados en los humedales construidos pueden presentar funciones adicionales más allá del simple proceso de filtración. Sus áreas de superficie pueden constituir un soporte para el crecimiento de la población microbiana, así como para el desarrollo de la vegetación en el humedal.** La eficiencia de estos sistemas biológicos para la eliminación de contaminantes puede ser mejorada de manera significativa por una mayor capacidad de los medios filtrantes para retener estos compuestos mediante absorción, intercambio iónico u otros procesos físico-químicos.

En las últimas décadas varios estudios se han centrado en adsorbentes alternativos como la biomasa, a fin de encontrar material barato y funcionalmente aceptable para la eliminación de contaminantes orgánicos y metales pesados (Estevinho et al., 2006). **Varios estudios han evaluado la idoneidad de los residuos de corcho como adsorbente.**

La capacidad adsorbente del corcho está relacionada con su composición química. Suberina es el principal componente de las células de las paredes de corcho y es responsable de muchas de sus propiedades relacionadas con la capacidad de adsorción de contaminantes orgánicos (Domingues et al., 2005; Zhou et al., 1995). La lignina es el segundo biopolímero más abundante y también está relacionado con la capacidad de adsorción del corcho.

## **2.7. TICs EN LA AGRICULTURA**

**La información y el conocimiento son dos factores necesarios para que el sector agrario y el mundo rural puedan adaptarse a los cambios que la liberalización económica y la globalización han introducido en la economía mundial, y a los cuales no pueden permanecer ajenos.** Es necesario que el acceso del mundo rural al uso de las tecnología de la información y las comunicaciones (TIC) se pueda hacer en condiciones semejantes a las del medio urbano (Morillo, 2005).

Las unidades de producción agrícola presentan necesidades y requerimientos que donde las TIC puedan apoyar en los procesos técnicos con mayor eficiencia, confiabilidad y seguridad (Chaparro, 2013). **La incorporación de las técnicas informáticas o tecnologías de la información en la agricultura, permite desarrollar herramientas que hacen posible aumentar la eficiencia y productividad de los sistemas de explotación** (Pérez, 2006), y al mismo tiempo preservar el medio ambiente.

**Una de las características esenciales de un sistema eficaz y duradero de gestión colectiva del recurso hídrico es la existencia de una estructura adecuada de vigilancia y control de las extracciones** (Calera, 2010), por lo que la incorporación de las tecnologías de la información a la agricultura permite obtener información útil en tiempo real para una mejor toma decisiones.

**Las herramientas TICs permiten contar con un nivel superior de interactividad, capaz de controlar distintas instalaciones de forma autónoma, con la finalidad de recopilar y conformar una base de datos del sistema que permita tomar decisiones sobre su operación.**

Por ejemplo, las plataformas web son una excelente herramienta que pone a la disposición de los usuarios finales, así como entidades de la administración pública e investigadores, la información necesaria para la toma de decisiones encaminada a la optimización del recurso hídrico y al cuidado del medio ambiente (Gallegos, 2016).

## 2.8. PROYECTO REAGRITECH

**El proyecto LIFE11 ENV/ES/579 REAGRITECH “Regeneration and reuse of runoff and drainage water in agricultural plots by combined natural water treatment systems”, utiliza los HC como una tecnología natural de tratamiento para aguas contaminadas por nitratos, con la finalidad de disminuir los impactos que tienen en el medio ambiente y, al mismo tiempo, para reducir las extracciones y el consumo del recurso hídrico destinado a las actividades agrícolas, por medio de su reutilización en el riego de la parcela.**

El proyecto busca contribuir sustancialmente en el desarrollo de los objetivos de sostenibilidad enmarcados dentro de las políticas de la Unión Europea y ser un ejemplo en la gestión sostenible de los recursos hídricos y mejora del medio ambiente. Es subvencionado por el Programa LIFE+ de la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea. El consorcio del proyecto está conformado por la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de la UPC, TYPESA y Leitat.

El proyecto REAGRITECH ha sido pensado para que ayude a implementar las políticas de la UE en los ámbitos de la sostenibilidad y mejora del medio ambiente. **Los objetivos principales del proyecto REAGRITECH son reducir el consumo de agua y minimizar la contaminación difusa asociado al sector agrícola, utilizando tecnologías naturales para la descontaminación de la escorrentía subsuperficial y la recarga de los acuíferos aluviales.**

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Reutilizar el agua de escorrentía y de infiltración para el riego de parcelas.
- Adaptar los sistemas de tratamiento y las tecnologías apropiadas a las prácticas agrícolas.
- Mejorar la calidad del agua superficial y subsuperficial declarada como vulnerable por nitratos.
- Reducir los costos de tratamiento de agua.

**Los humedales construidos son los encargados de la disminución inicial de nutrientes (nitratos y fosfatos) y plaguicidas captadas de las aguas subterráneas del acuífero aluvial contaminadas por las prácticas agrícolas.**

Una vez tratada esta agua, se reincorpora al sistema natural mediante el proceso de riego de la parcela.

Las parcelas de regadío donde se desarrolla el proyecto se encontrarán cercanas a cursos fluviales donde la alimentación mayoritaria del mismo sea a través de las aguas subterráneas o zona saturada. De esta manera, se facilitarían las operaciones de captación y distribución de las aguas.

**Los sistemas demostrativos de tratamiento, a base de humedales construidos, están instalados en parcelas de regadío en el plana de Lleida, en la cuenca del río Segre, afluente del río Ebro, y en el territorio de riego Segarra-Garrigues y alrededor de un canal de riego existente desde el siglo XIX: el canal de Urgell. Las Fotografías 6, 7 y 8 muestran las tres parcelas seleccionadas.**



**Fotografía 6.** Vista general de la ubicación del primer prototipo en Sudanell. Fuente: Lorena Aguilar.



**Fotografía 7.** Vilanova de la Barca. Ubicado a un costado del río Corb. Fuente: Lorena Aguilar.



**Fotografía 8.** Vista de la ubicación del tercer prototipo en Bellvis.  
Fuente: Lorena Aguilar.

### 2.8.1. PUBLICACIONES ACTUALES

Actualmente se cuentan con las siguientes publicaciones del proyecto REAGRITECH:

- *“Design parameters of constructed wetlands for regeneration and reuse of agricultural runoff and drainage water in irrigation”*. Book of Abstracts. WETPOL 6th International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control, Annual Conference of the Constructed Wetland Association, York, U.K. del 13 al 18 de septiembre 2015. **Lorena Aguilar**, Ángel Gallegos, Carlos A. Arias, Patricia Caro, Santiago Sahuquillo, Carlos Pérez, Jordi Morató. Abstract seleccionado como una de las tres mejores líneas de investigaciones innovadoras en el campo.
- *“TIC para la determinación de los parámetros operacionales de humedales contruidos diseñados para el tratamiento de aguas contaminadas por nitratos”*, en Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, Colombia, Vol. 15, No. 28, Enero-Junio 2016. A. Gallegos, **L. Aguilar**, I. Campos, P. Caro, S. Sahuquillo, C. Pérez, C. A. Arias, J. Montoya, J. Morató.

### 2.8.2. PRESENTACIONES EN CONGRESOS PROYECTO REAGRITECH

#### 2015

- Presentación oral *“Regeneration of irrigation water and reuse of runoff and drainage water in agricultural plots by constructed wetlands”*, at WETPOL 6th International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control, Annual Conference of the Constructed Wetland Association, York, U.K. del 13 al 18 de Septiembre. **Lorena Aguilar**, Ángel Gallegos, Carlos A. Arias, Patricia Caro, Santiago Sahuquillo, Carlos Pérez, Jordi Morató.

- Presentación oral “Regeneration and reuse of nitrogen rich water runoff and drainage in agricultural plots by constructed wetlands”, en la 6th World Conference on Ecological Restoration , Manchester, U.K. del 23 al 27 de agosto. Ángel Gallegos, **Lorena Aguilar**, Carlos A. Arias, Patricia Caro, Santiago Sahuquillo, Carlos Pérez, Jordi Morató.
- Presentación oral “ICT for the automation and control of constructed wetlands designed to treat agricultural runoff water polluted by nitrates”, at TIC-@gro: Primer Workshop de Tecnologías de la Información y la Comunicación aplicadas a la Agricultura, Popayán, Col., del 11 al 13 de junio. A. Gallegos, **L. Aguilar**, I. Campos, P. Caro, S. Sahuquillo, C. Pérez, C. A. Arias, J. Montoya, J. Morató.

## 2014

- Presentación oral “Humedales construidos y franjas vegetadas para el control de la contaminación agrícola difusa. Proyecto REAGRITECH, LIFE11 ENV/ES/579“, at XVII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Popayán, Cauca, Col., del 8 al 11 de Octubre. Jordi Morató, **Lorena Aguilar**, Ángel Gallegos, Carlos Arias, Patricia Caro, Santiago Sahuquillo, Carlos Pérez.
- Presentación oral “REAGRITECH LIFE11 ENV/ES/579. Constructed wetlands for diffuse pollution control of agricultural runoff”, at Wetlands Biodiversity and Services: Tools for Socio-Ecological Development International Wetlands Conference, Huesca, España, del 14 al 18 de septiembre. Ángel Gallegos, **Lorena Aguilar**, Carlos A. Arias, Patricia Caro, Santiago Sahuquillo, Carlos Pérez, Jordi Morató.
- Presentación oral “Constructed wetlands for the control diffuse pollution in agricultural water runoff” en la 9th European Conference on Ecological Restoration, Oulu, Finland, del 3 al 8 de Agosto.
- Poster presentation “Constructed wetlands for the control diffuse pollution in agricultural water runoff”, at Water Europe, ZCAM, Zaragoza, España, del 12 al 14 de Junio. Jordi Morató, **Lorena Aguilar**, Ángel Gallegos, Carlos Arias, Patricia Caro, Santiago Sahuquillo, Carlos Pérez.

### 3. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Actualmente **la agricultura consume el 70% del agua disponible a nivel mundial y es la principal fuente de contaminación directa de los acuíferos y cuerpos de agua**. Con el aumento de la población se requerirá una mayor cantidad de alimentos, por lo que la producción agrícola necesitará ser más grande para satisfacer esta demanda y, por lo tanto, utilizar más agua, fertilizantes y plaguicidas.

Para **ahorrar agua y reducir la contaminación difusa**, además de unas buenas prácticas agrícolas, es necesaria una adecuada gestión integral del recursos hídrico, por tal motivo **se requiere el uso de tecnologías adecuadas y eficientes**. **Los humedales construidos es una tecnología natural que permite la descontaminación del agua con nitratos y plaguicidas y reutilizar el agua**, sin embargo no existe suficiente información para determinar los parámetros de diseño que mejoren su eficiencia en el tratamiento de agua de escorrentía agrícola.

#### 3.2. HIPÓTESIS

La optimización del diseño de humedales construidos para agua de escorrentía agrícola, bajo distintas condiciones climáticas, por medio de la definición de constantes de diseño, configuraciones de funcionamiento y medios filtrantes apropiados, permitirá conocer los parámetros clave para mejorar la eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes del agua mediante el uso de tecnologías naturales de tratamiento, a la vez que se reutiliza el agua en el riego de la parcela o para recarga de acuíferos y cuerpos de agua, se preserva el medio ambiente y se cierran los diferentes ciclos, desde una visión de la economía circular.

#### 3.3. OBJETIVOS

##### 3.3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros de diseño y comparar la eficiencia de remoción de contaminantes (plaguicidas) y de nutrientes (nitrógeno) provenientes de la escorrentía agrícola en humedales construidos de flujo subsuperficial vertical y horizontal bajo diferentes condiciones climáticas, aireación y tipo de medio filtrante.

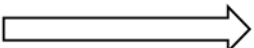


### **3.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Determinar los parámetros del diseño en función de contaminantes y condiciones climáticas para definir la constante de remoción  $k$  de primer orden en humedales construidos de flujo subsuperficial para agua de escurrentía agrícola.
2. Comparar la eficiencia de remoción de nutrientes (nitrógeno) entre dos medios filtrantes diferentes: la grava y el corcho.
3. Evaluar los efectos de recirculación del efluente en humedales verticales de grava y corcho.
4. Evaluar los efectos de la aireación inducida dentro del sistema de tratamiento en humedales verticales de grava y corcho.
5. Determinar la remoción de plaguicidas en humedales construidos de flujo subsuperficial, según las configuraciones anteriores (medio filtrante, profundidad del medio filtrante, aireación y recirculación).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se propone la construcción de un sistema experimental a escala piloto (IPCT) (Fotografía 9), para que pueda compararse con el construido a escala prototipo (REAGRITECH) (Fotografía 10).

Planta Piloto  Prototipo



**Fotografía 9.** Vista de los humedales Pilotos IPCT. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 10.** Vista del prototipo REAGRITECH. Fuente: Jordi M.

### 4.1. PILOTOS IPCT

Los pilotos de los humedales construidos están ubicados en el Instituto Politécnico Campus Terrassa de la UPC, Ctra Nac. 150 km 14,5 08227 Terrassa, Barcelona (Fotografía 11 y 12).



**Fotografía 11 y 12.** Ubicación y vista lateral de sistemas de plantas piloto IPCT. Fuente: Google maps y L. Aguilar.

**La propuesta es preparar agua residual sintética (ARS) para ser tratada en cuatro humedales construidos verticales de flujo subsuperficial, con recirculación del efluente para reducir la carga contaminante, y pueda ser reutilizada en el riego en un huerto del IPCT.**

#### **4.1.1. DISEÑO CONCEPTUAL**

El diseño conceptual del sistema de tratamiento plantea la operación de 4 humedales construidos verticales (VF), 2 con un sistema de aireación inducida y 2 sin aireación inducida. El medio granular que se comparará en los humedales es gravilla de 5mm y corcho granular de 5mm de acuerdo a la siguiente disposición:

- Humedal con gravilla VF1g y VF3g.
- Humedal con corcho VF2c y VF4c.

Esto permitirá comparar la diferencia en la remoción de contaminantes entre un humedal con aireación y sin ella, entre el corcho y gravilla cuando existen variaciones en el medio granular y aireación.

La vegetación a utilizar es *Phragmites australis* con una densidad de 4 unidades por metro cuadrado.

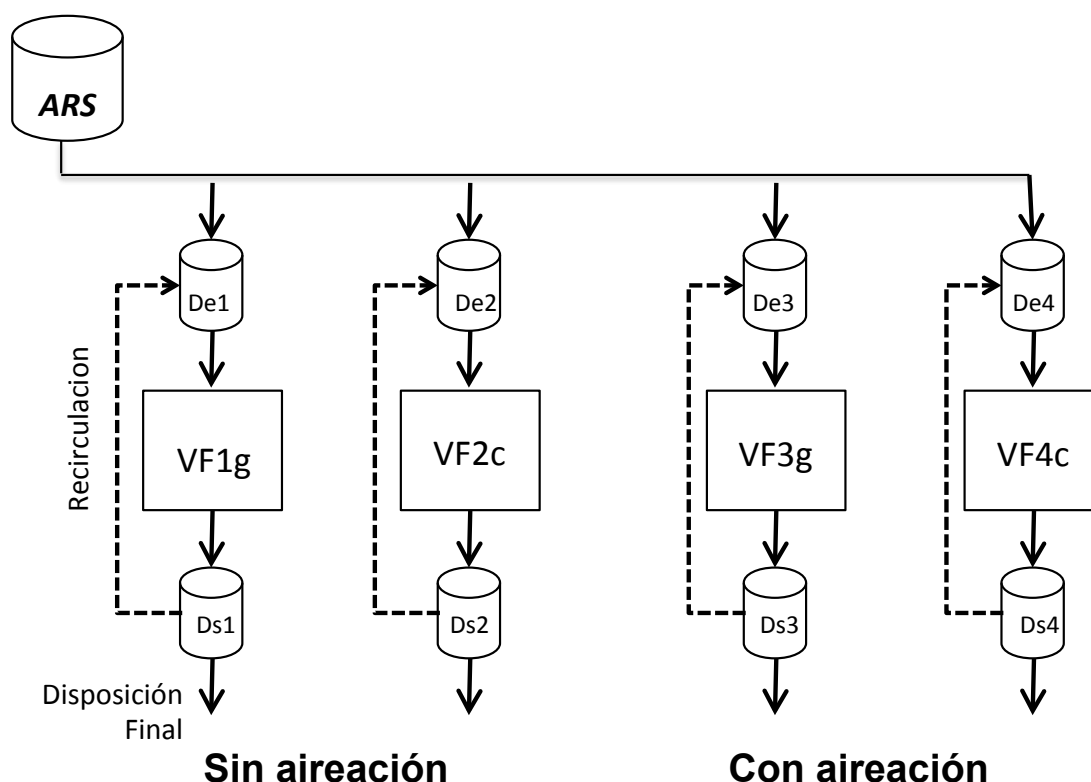
Los componentes de los pilotos verticales son:

- Depósito de mezclado (ARS).
- Depósito de entrada (De) a los humedales.
- Humedal construido vertical (VF).
- Depósito de salida-recirculación (Ds) de humedales.

**La planta demostrativa será alimentada con agua residual sintética (ARS) por lo que en esta fase no se considera un pretratamiento y tratamiento primario, ya que no habrá partículas suspendidas en ella.**

El ARS preparada será llevada a un depósito de mezclado, de donde pasará a los depósitos de entrada de cada uno de los humedales. De ahí serán distribuidos a cada uno de los sistemas naturales de tratamiento (VF1 y 2 con aireación inducida y VF3 y VF4 sin aireación inducida) para posteriormente ir a un depósito de salida desde donde podrá ser enviado a su disposición final o bien ser recirculado dentro del sistema.

La Figura 12 muestra el esquema general de funcionamiento y la disposición de los elementos.



**Figura 12.** La recirculación del efluente en los humedales construidos mejora y estabiliza el tratamiento general del sistema( Brix, 2005). Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. AGUA RESIDUAL SINTÉTICA (ARS)

Dado que en los pilotos del IPCT se tratará agua residual sintética (ARS) con características similares al agua residual agrícola, **para su preparación se utilizará un fertilizante que aporta los nutrientes y micronutrientes característicos de esta agua, lo que favorecerá la dinámica microbiológica que se da en el interior de los humedales, y azúcar tipo básica** (Fertilizante Líquido Universal Eroski Basic y Marca Azucarera). En la preparación del ARS **está pendiente por determinar el tipo de plaguicida que se agregará.**

Se preparó un (ARS) con tres composiciones diferentes (Tabla 2) para poder comparar resultados y definir la concentración necesaria para obtener una DQO dentro de un rango de 600-900 mg L<sup>-1</sup>.

**Tabla 2.** Composiciones del ARS.

| Reactivos                                       | Composición |     |     |
|-------------------------------------------------|-------------|-----|-----|
|                                                 | 1           | 2   | 3   |
| Azúcar (gr L <sup>-1</sup> )                    | 0,3         | 0,3 | 0,3 |
| Fertilizante Eroski Basic (ml L <sup>-1</sup> ) | 2           | 3   | 4   |

Se realizó una prueba de DQO por cada una de las 3 diferentes composiciones. Para la composición con mejores resultados (Composición 2, Tabla 3) se realizaron 2 pruebas adicionales para determinar que estos resultados pudieran ser valores reproducibles (Tabla 4).

**Tabla 3.** Resultados de DQO para cada composición.

| Parámetro                 | Composición |            |     |
|---------------------------|-------------|------------|-----|
|                           | 1           | 2          | 3   |
| DQO (mg L <sup>-1</sup> ) | 510         | <b>574</b> | 598 |

**Tabla 4.** Pruebas de DQO adicionales para la composición con mejores resultados (2).

| Composición 2 |                           |
|---------------|---------------------------|
| PRUEBA        | DQO (mg L <sup>-1</sup> ) |
| 1             | 688                       |
| 2             | 626                       |

## **TEMPERATURA, SALES, CONDUCTIVIDAD Y pH**

La temperatura con la que se preparó el ARS fue de 21° C. Los resultados para conductividad y sales, mostrados en la Tabla 5, son valores coherentes con la composición del fertilizante usado en la preparación, el cual contiene oligoelementos solubles en agua como el boro, cobre, zinc entre otros. El parámetro pH que se obtuvo está muy cercano a un valor neutro sin embargo muestra desviación hacia lo ácido.

**Tabla 5.** Resultados de análisis de muestra para pH, Conductividad y Temperatura.

| Parámetro             | Composición 2 |
|-----------------------|---------------|
| Conductividad (μS)    | 2668          |
| Sales disueltas (ppm) | 1321          |
| pH                    | 6,13          |

## **TURBIDEZ**

Como era de esperarse, el valor de turbidez no es representativo debido a la alta solubilidad de los componentes del ARS.

## **DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)**

Los valores de DQO, Tabla 6, obtenidos son el reflejo de la presencia de sacarosa y de los nutrientes que componen el fertilizante, aunque los valores difieren del primer valor obtenido, en la parte de determinación de la composición en donde la DQO fue de 574 mg L<sup>-1</sup> y ahora se realiza por duplicado esta determinación con las mismas concentraciones sacarosa y fertilizante, y se obtienen valores de 580 y 610 mg L<sup>-1</sup>; la diferencia entre estos valores puede ser generada a causa del error experimental por la baja precisión del material y equipos usados en la preparación del ARS. Sin embargo son valores que se encuentran en un rango de 570 a 610 mg L<sup>-1</sup>, por lo que cumple con lo requerido como característica del agua residual sintética deseada en este caso.

**Tabla 6.** Resultados de análisis de muestra para DQO.

| Parámetro                 | Composición 2 |           |
|---------------------------|---------------|-----------|
|                           | Replica 1     | Replica 2 |
| DQO (mg L <sup>-1</sup> ) | 580           | 610       |

## **NITRÓGENO TOTAL**

El parámetro de nitrógeno total, Tabla 7, arrojo un valor alto como era de esperarse, partiendo de que el fertilizante usado para preparar el ARS contiene 8% de nitrógeno total del cual: 3,7% nítrico y 4,3% nitrógeno amoniacal.

**Tabla 7.** Resultados de análisis de muestra para nitrógeno total.

| Parámetro              | Composición 2 |
|------------------------|---------------|
| Nitrogeno Total (mg/L) | 1330          |

Los nitratos arrojaron un valor de 597 mg/L lo que es coherente puesto que se encuentra por debajo del valor de nitrógeno total que fue de 1330 mg/L, Tabla 8. Este valor corresponde a menos de la mitad del nitrógeno total lo que corrobora la etiqueta composicional del fertilizante, puesto que del nitrógeno total la mayor parte es nitrógeno orgánico.

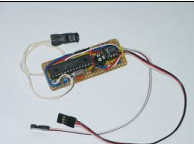
**Tabla 8.** Resultados de análisis de muestra para nitratos.

| Parámetro                      | Composición 2 |
|--------------------------------|---------------|
| Nitratos (mg L <sup>-1</sup> ) | 597           |

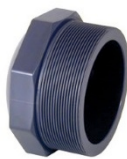
### 4.1.3. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

La siguiente Tabla 9 presenta las **especificaciones del material** para construcción tipo para humedal vertical.

**Tabla 9.** Listado de material para la construcción de pilotos IPCT.

| <b>Cantidad</b> | <b>Nombre y descripción</b>                                                                              | <b>Marca / proveedor</b> | <b>Imagen</b>                                                                         |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1               | Depósito de 1000 l, color blanco                                                                         | SCHUTZ ref. 502020 Q11   |    |
| 1               | Depósito de 60 L de color azul con tapa, Fabricado en polietileno de alta densidad y alto peso molecular |                          |    |
| 1               | Depósito 94 L, fabricado en fibra de vidrio                                                              | Remosa                   |   |
| 1               | Bomba pistón maxi orange                                                                                 | Aspen Pumps              |  |
| 2               | Bomba aspiración vertical (una para recirculación y otra para expulsión)                                 | Grundfoss                |  |
| 1               | Electroválvula                                                                                           | Invensys                 |  |
| 1               | sensor de nivel máximo Y mínimo                                                                          | RS-Amidata               |  |
| 1               | Tubo perforado corrugado flexible "espiralado", en color negro de 100 mm D, longitud: 0,80 m             | ALPEC TECNIC             |  |
| 2               | Tubo PVC de alta resistencia color naranja 100mm D, longitud: 1,50 m                                     | Aqua Control             |  |

**Tabla 9.** Listado de material para la construcción de pilotos IPCT.

| <b>Cantidad</b> | <b>Nombre y descripción</b>                 | <b>Marca / proveedor</b> | <b>Imagen</b>                                                                         |
|-----------------|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 2               | Tapones PVC reducidos ciegos machos 100mm D | ALPEC TECNIC             |    |
| 1               | Tapón PVC para el tubo corrugado 110mm D    | ALPEC TECNIC             |    |
| 3               | Uniones PVC 110mm D                         | ALPEC TECNIC             |    |
| 2               | Codos PVC 110mm D                           | ALPEC TECNIC             |    |
| 1               | Tee PVC 110mm D                             | ALPEC TECNIC             |   |
| 1               | Microtubo para riego de interno 4mm         | Aqua Control             |  |
| 2               | Rosca macho 1/2" D                          | Crearplast               |  |
| 1               | Codo 1/2" D                                 | Crearplast               |  |
| 2               | Enlace mixto de hembra                      | Crearplast               |  |
| 2               | Unión de 1/2" D                             | Crearplast               |  |

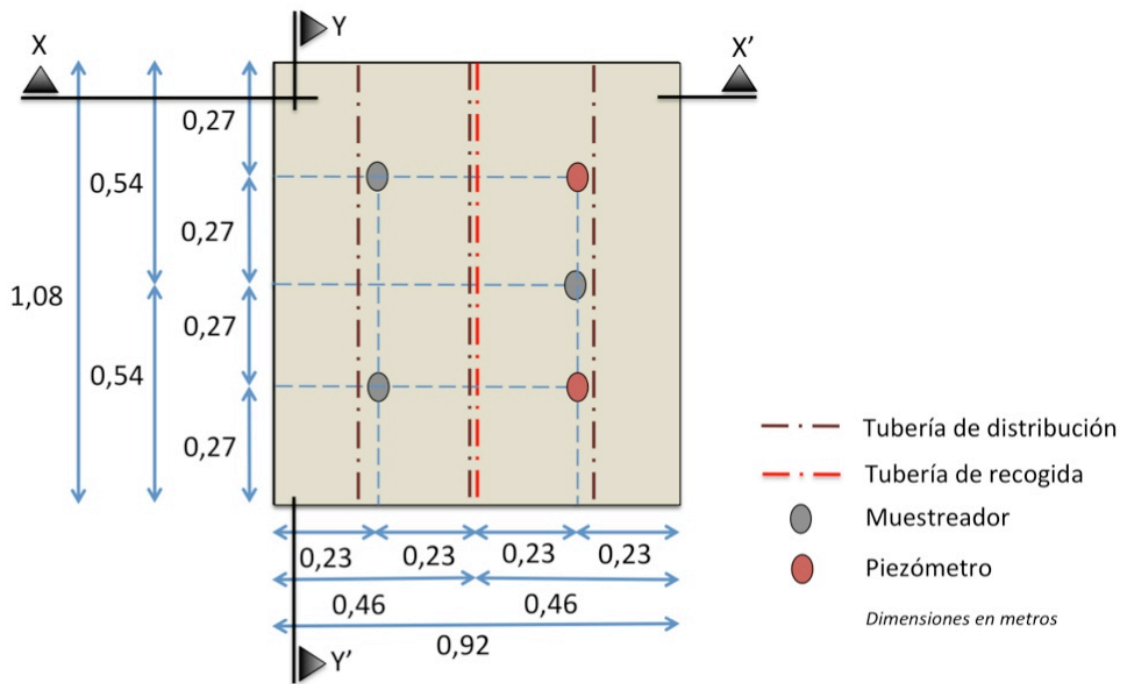


**Tabla 9.** Listado de material para la construcción de pilotos IPCT.

| <b>Cantidad</b>     | <b>Nombre y descripción</b>                                                                              | <b>Marca / proveedor</b> | <b>Imagen</b>                                                                         |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                   | Geotextil blanco anti punzante de grosor 2mm, área: 1,01 m <sup>2</sup>                                  | Jaume Saborit            |    |
| 1                   | Funda en lona para proteger el humedal de los rayos del sol                                              | Jaume Saborit            |    |
| 0,61 m <sup>3</sup> | Corcho de 5 mm, esto siempre que el medio filtrante sea corcho.                                          | UPRODECO                 |    |
| 0,31 m <sup>3</sup> | Grava de 16 mm, para poner en la superficie del humedal del corcho para evitar que éste material flote . | Arids García             |   |
| 0,61 m <sup>3</sup> | Gravilla de 5mm, esto siempre que el medio filtrante sea gavilla.                                        | Arids García             |  |

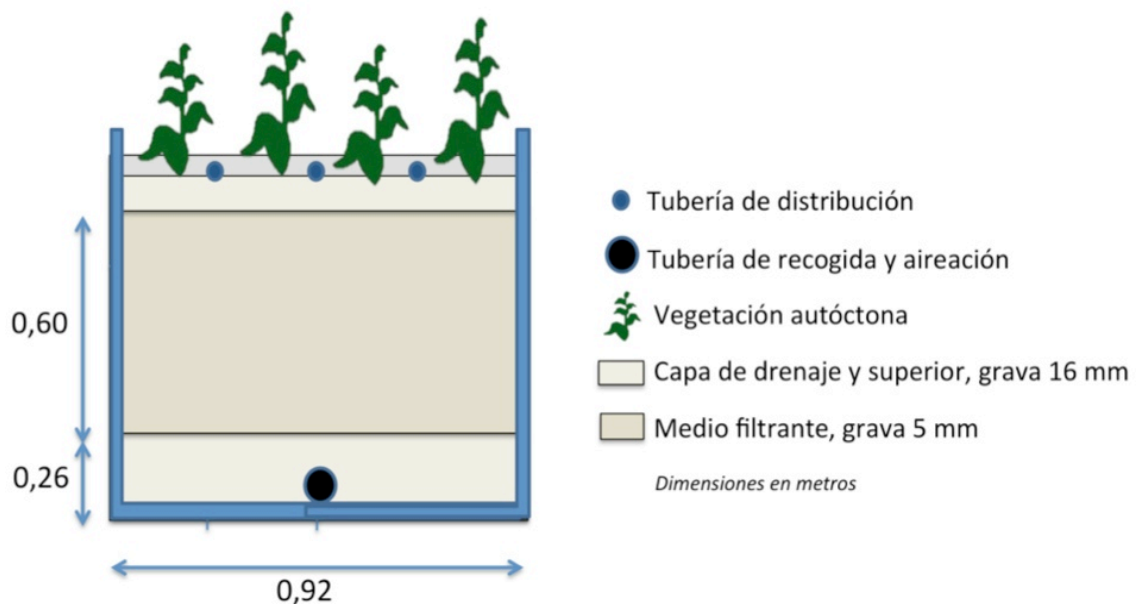
#### **4.1.4. CONSTRUCCIÓN.**

Como guía para la construcción se elaboraron los siguientes esquemas. En la Figura 13 se muestran las distancias a las que debe ir la tubería de distribución, tuberías de recogida, muestreadores y piezómetros.



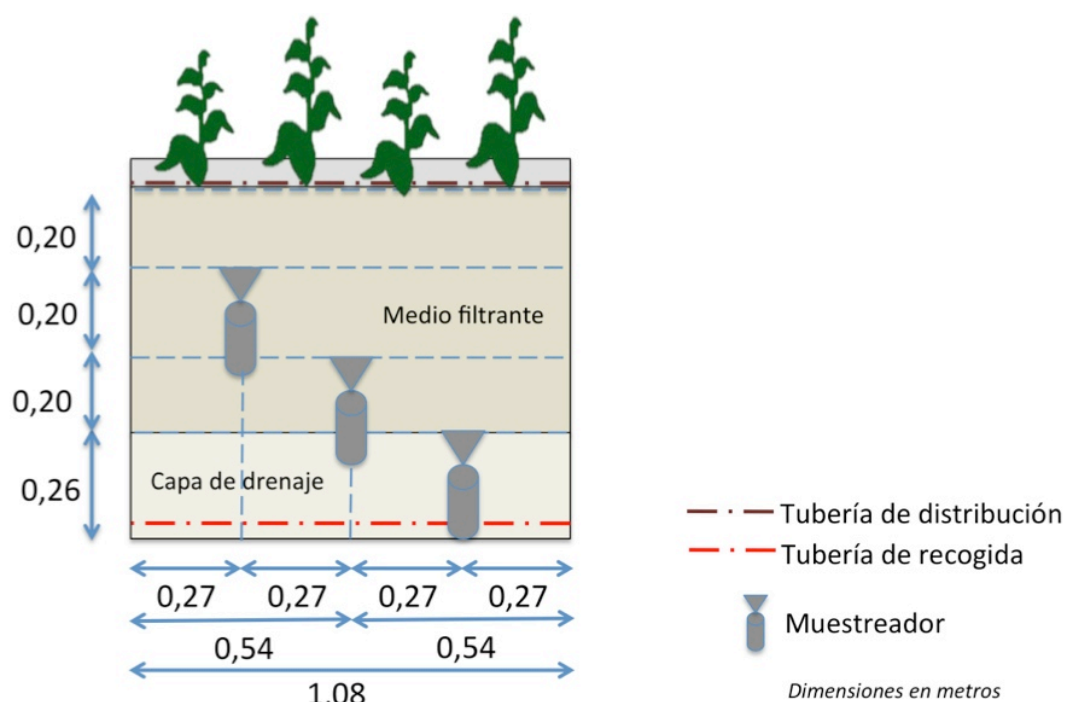
**Figura 13.** El área propuesta para cada humedal es de  $1\text{m}^2$ , área de los depósitos de 1.000 L con rejilla. Fuente: Elaboración L. García y L. Aguilar.

Sobre el medio filtrante se coloca una capa de aislamiento térmico para evitar que las tuberías se congelen en invierno (Figura 14).



**Figura 14.** Sección X-X' con las alturas de la capa de drenaje (26cm) y medio filtrante (60 cm). Fuente: Elaboración L. García y L. Aguilar.

Los muestreadores que se colocaron dentro de los humedales permitirán comparar la eficiencia de remoción a distintas alturas del humedal (Figura 15).



**Figura 15.** Sección Y-Y' donde se ve la altura de los muestreadores por capa a cada 20 cm. Fuente: Elaboración L. García y L. Aguilar.

En las siguientes Fotografías se explica el **procedimiento constructivo** de los pilotos.



**Fotografía 13.** Una vez cortada la tapa superior de los depósitos de los humedales se instala en el fondo la tubería de drenaje y de aireación. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 14.** Para evitar fugas se debe sellar la conexión entre la tubería de drenaje y la salida del deposito. Fuente: L. Aguilar.





**Fotografía 15.** La capa de drenaje con grava de 16 mm va en el fondo del humedal, después de haber colocado la tubería de drenaje. Fuente: L. Aguilar



**Fotografía 16.** El geotextil separa la capa de drenaje del medio filtrante. Se debe dejar una perforación para poner colocar el muestreador. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 17.** Sobre el geotextil se coloca el medio filtrante de 16 mm y los muestreadores. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 18.** Se coloca el medio filtrante de gravilla de 5 mm. Fuente: L. Aguilar

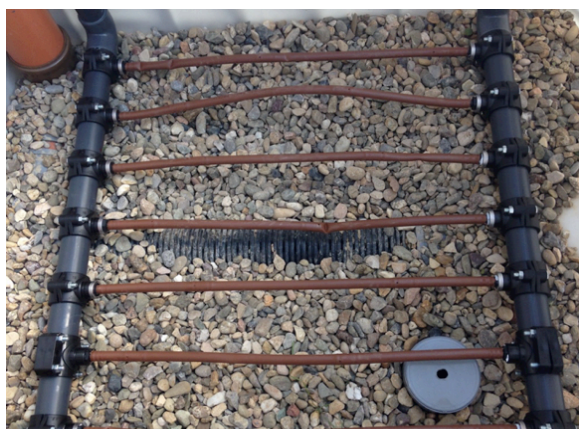


**Fotografía 19.** Vista del humedal con medio filtrante de corcho y una capa de 20 cm de grava de 16 mm para evitar que flote. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 20.** Vista del humedal con medio filtrante de corcho y los depósitos de entrada al fondo. Fuente: L. Aguilar.

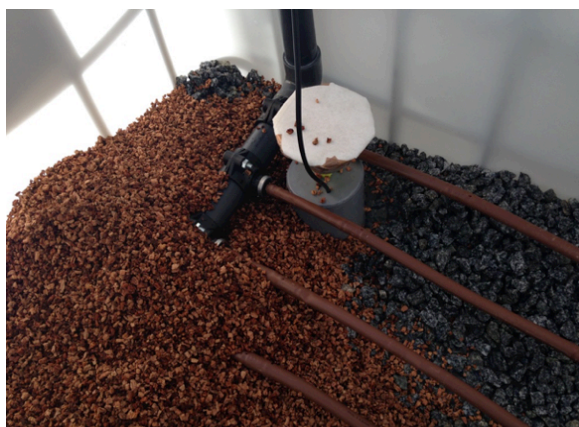




**Fotografía 21.** Vista de la instalación del sistema de aireación. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 22.** Vista del detalle del montaje del sistema de distribución de aire. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 23.** Sobre la capa de drenaje se coloca el medio filtrante de 16 mm y los muestreadores. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 24.** Se coloca el medio filtrante de gravilla de 5 mm. Fuente: L. Aguilar



**Fotografía 25.** Vista del humedal con medio filtrante de grava. Fuente: L. Aguilar.



**Fotografía 26.** Vista del humedal con medio filtrante de corcho. Fuente: L. Aguilar.

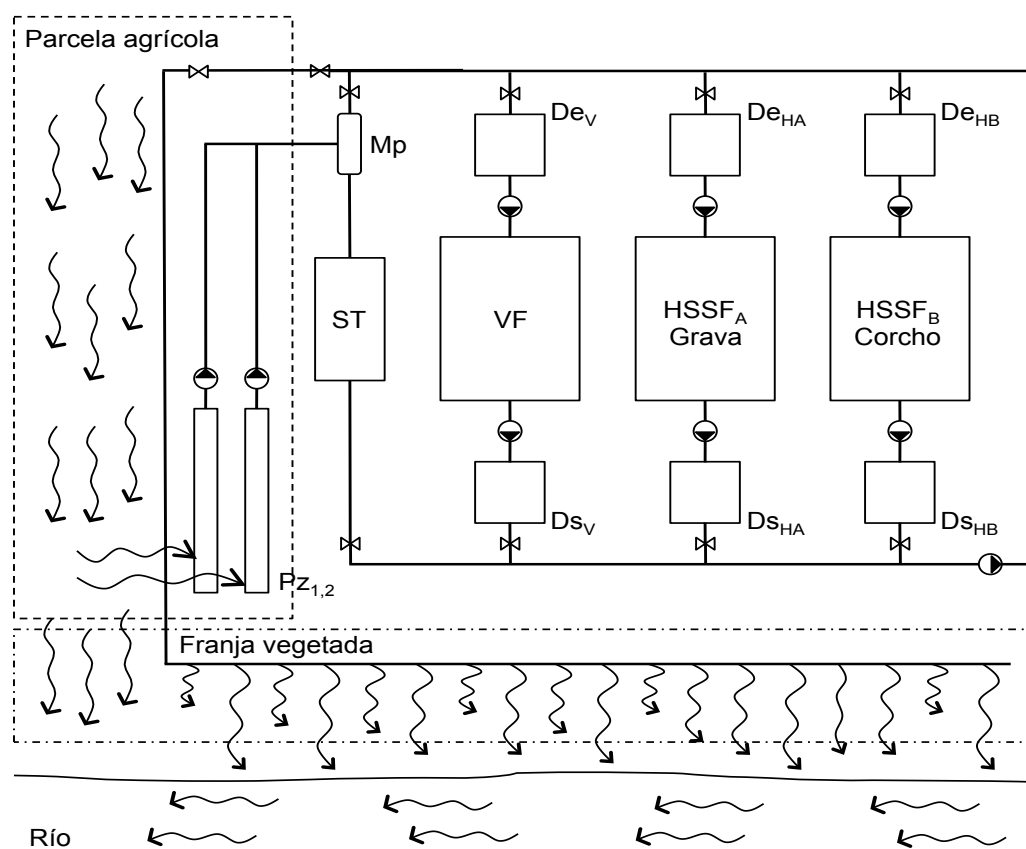
## 4.2. PROTOTIPOS REAGRITECH

### 4.2.1. DISEÑO CONCEPTUAL

Los prototipos REAGRITECH permitirán obtener valores específicos para la constante cinética  $k$  para aguas contaminadas por nitratos procedentes de las prácticas agrícolas, mediante un diseño experimental de tratamiento de distintas cargas de contaminantes (DBO y NT) en un periodo específico de tiempo.

Debido a los permisos de captación de agua el flujo máximo de diseño a ser tratado por la planta es de 750 L/d, aunque, esta cantidad puede variar dependiendo de las condiciones climáticas, la lluvia y la variación de los contaminantes del efluente.

El prototipo de Sudanell, compuesto por un VF de 5.5 m<sup>2</sup> y dos HSSF de 4,10 m<sup>2</sup> funcionando en paralelo. Plantea la captación del agua a tratar a través de un piezómetro (Pz), desde es bombeado al tanque de sedimentación de dos cámaras (ST) donde se eliminar la materia en suspensión. Posteriormente el afluente puede conducirse al HV, al HSSF<sub>A</sub> (grava) o al HSSF<sub>B</sub> (corcho) ya que cada uno tiene su propio depósito de bombeo y de recogida. El esquema de funcionamiento general se puede ver en la Figura 16.



**Figura 16.** El diseño tiene como objetivo obtener efluentes con una disminución del 95% de DBO y 50% menos de contenido de nitrógeno. El prototipo permite recircular los efluentes dentro del sistema lo que brinda una gran variedad de posibilidades de tratamiento. Fuente: Elaboración Ángel Gallegos.

**El sistema de domótica adaptado, explicado en el apartado 4.2.2. Operación y monitoreo, permite contar con un sistema flexible donde se pueda decidir cuál es el ciclo que se prefiere hacer:** tratar el afluente por el HV y posteriormente por los HSSF o viceversa, así como recircularlo las veces que sea necesario.

Por ejemplo el afluente se distribuye en un primer ciclo de 6 pulsos intermitentes en el humedal vertical; posteriormente se pueden hacer 6 pulsos adicionales de recirculación adicionales. El flujo de salida del vertical se divide en dos partes iguales para llevarse a los dos humedales horizontales.

#### **4.2.2. CONSTRUCCIÓN**

**Un puntos clave de especial relevancia del prototipo es que es un diseño compacto, móvil y modular que no causa afectación al entorno ya que ha sido construido dentro de contenedores marítimos** (Fotografías 27 a 29). Compacto por que es posible la recirculación del efluente, alcanzando remociones de contaminantes más altas en un área menor; modular por que permite incrementar la superficie de tratamiento agregando más contenedores; y móvil por que puede ser trasportado a otra ubicación.



**Fotografía 27, 28 y 29.** El prototipo, al estar construido dentro de contenedores marítimos, puede ser transportado a diferentes ubicaciones sin causar impactos en el entorno. Fuente: A. Gallegos.

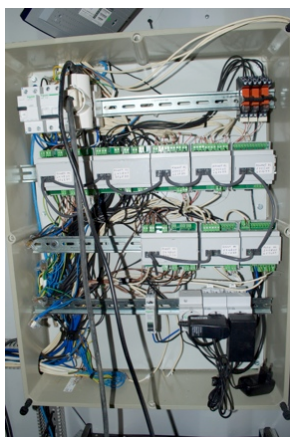
Uno de los contenedores es usados como cuarto de control, Fotografía 30 y 31, donde se han instalado los depósitos de bombeo y almacenamiento, bombas, válvulas, sensores y todo el sistema de distribución, así como los elementos de automatización y control.





**Fotografía 30 y 31.** Vista del interior del contenedor marítimo usado como cuarto de control. Fuente: J. Morató.

Se ha dividido en dos zonas el cuarto de control. En las siguiente fotografías se puede ver los elementos de la zona hidráulica (depósitos, cuadro de bombas, contadores y electroválvulas) y los elementos de la zona de control (donde se encuentra el equipo de automatización y cuadro de fuerza).



**Fotografía 32, 33, 34 y 35 .** Vistas del cuadro de elementos hidráulicos y de la zona de control. Fuente: J. Morató.

Se ha utilizado un contenedor OpenTop para alojar los HC. Su interior ha sido dividido por medio de una estructura metálica para generar los espacios necesarios para el humedal vertical y los dos horizontales. Posteriormente, la estructura y muros interiores se han recubierto con una geomembrana y un geotextil para evitar la pérdida de agua (Fotografías 36 a 39).





**Fotografía 36, 37, 38 y 39.** Estructura metálica dentro del contenedor OpenTop y geomembrana y geotextil de impermeabilización. Fuente: L. Aguilar.

**Los sistemas de recogida varían de acuerdo al tipo de humedal.** En el humedal vertical se ha colocado una cama de arena compactada en el fondo para dar la pendiente necesaria para conducir el agua tratada al punto de recogida (Fotografía 40 y 41). El sistema de recolección consiste en una red de alta densidad de tuberías de drenaje de 100 mm, perforadas en la parte superior, para captar el agua tratada.



**Fotografía 40 y 41.** Cama de arena compactada y tubería de recogida del humedal vertical. Fuente: L. Aguilar.

El sistema de recogida del humedal horizontal es una tubería de drenaje de 100mm (Fotografía 42 y 43). Un sensor de nivel dentro de la tubería de recolección permite encender y apagar la bomba de extracción de agua.



**Fotografía 42 y 43.** Tuberías de recolección de agua y sensores de nivel en los humedales horizontales. Fuente: A. Gallegos.

El material granular del sistema híbrido, Fotografía 44 y 45, es:

- Humedal Vertical: La profundidad total del filtro es de 1,4 m, que comprende un drenaje capa inferior de 0,2 m, con 16 mm de grava de granito, una capa de 1,0 m filtro de arena D60 de 4 mm  $U < 3,5$  y una capa de corcho de 0,2 m como material aislante en la capa superior.
- Humedal Horizontal A: La profundidad total del humedal es de 80 cm y se compone de 32 mm de grava granítica.
- Humedal Horizontal B : La profundidad total del humedal es de 80 cm y se compone de 32 mm de corcho.



**Fotografía 44 y 45.** Las diferencias entre el medio granular de los humedales horizontales permitirán comparar la eficiencia de remoción del sistema entre el sustrato tradicional como grava y un subproducto de otras actividades como el corcho. Fuente: J. Morató.



Las tuberías de distribución instaladas en el VF están presurizadas para asegurar una correcta distribución del agua en la superficie. En los HFFS se encuentra una única tubería de distribución en la parte alta del humedal (Fotografía 46 y 47).



**Fotografía 46 y 47.** Una adecuada distribución del agua en la superficie de los humedales permite que tengan el rendimiento de tratamiento esperado. Fuente: L. Aguilar.

La vegetación que se utilizará en los humedales es *Phragmites Australis*, una especie nativa de las parcelas donde los prototipos serán ubicados. La densidad será de 4 plantas por m<sup>2</sup>.

El prototipo ha sido recubierto por un muro y techo verde que permite aislar el interior de los efectos de la temperatura, además que le permite integrarse al paisaje rural donde se encuentra (Fotografía 48 y 49).



**Fotografía 48 y 49.** Vista del muro vegetal y la cubierta. Fuente: J. Morató.

El techo del contenedor fue impermeabilizado con una geomembrana de polietileno de alta densidad, y la vegetación se colocó dentro del sistema modular de Igniagreen, el cuál es fabricado con plástico reciclado (Fotografía 50 y 51).



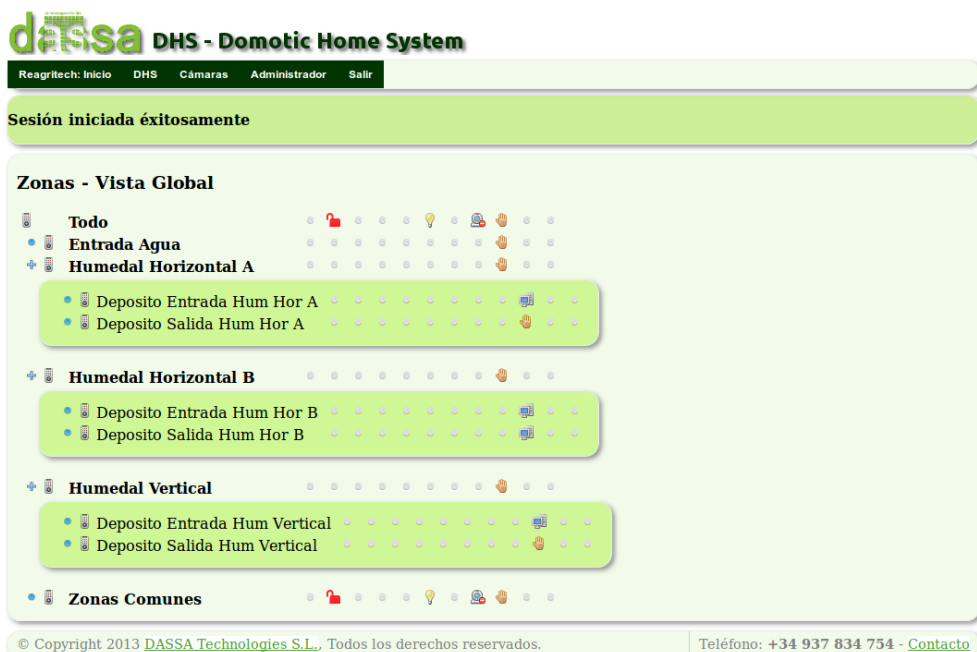
**Fotografía 50 y 51.** Trabajos de impermeabilización de la cubierta y sistema modular Igniagreen. Fuente: A. Gallegos.

La diferencia en entre el prototipo de Sudanell con los de Vilanova y Bellvis es que estos últimos están conformados por un VF de 5.5 m<sup>2</sup> y un solo HSSF de 8,10 m<sup>2</sup>. El material granular HSSF de Bellvis es de corcho y el de Vilanova de grava.

#### **4.2.3. OPERACIÓN Y MONITOREO**

**El prototipo funciona automáticamente a través de un sistema de domótica adaptado que permite crear, controlar en tiempo real, cada uno de los componentes dados de alta en la plataforma de operación y modificar las reglas de funcionamiento de cada componente electrónico del sistema** (bombas de flujo, caudalímetros, electroválvulas, sensores de temperatura y de nivel, etc).

**Un sistema base web permite monitorear a distancia el prototipo y ajustar los parámetros de operación según las necesidades del proyecto** (cantidad y características del afluente y efluente, condiciones climatológicas, etc.). La plataforma web divide el sistema por zonas (Figura 17), diferenciando cada uno de los elementos en el prototipo: entrada del afluente, humedal vertical, humedales horizontales A, B y zonas comunes.



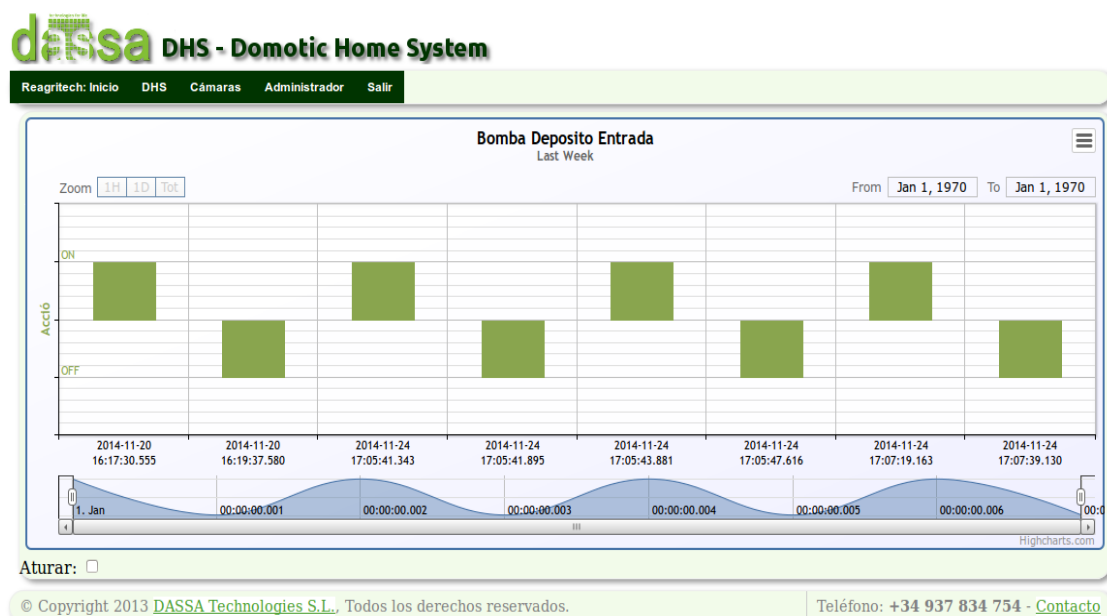
**Figura 17.** Vista de la plataforma web en la que el prototipo está dividido por zonas para el funcionamiento adecuado y la identificación de cada elemento. Fuente: DASSA Technologies.

Cada una de estas zonas permite agrupar a cada uno de los componentes necesarios para su operación. P.e. la Figura 18 muestra los elementos correspondientes a la Zona del Humedal Horizontal A.

| Nombre                           | Estado/Valor                           | Modo | Última activación       | Zona                       |
|----------------------------------|----------------------------------------|------|-------------------------|----------------------------|
| Bomba Salida Hum Hor A           | <input checked="" type="checkbox"/> on |      | 2014-11-13 18:22:32.664 | Deposito Salida Hum Hor A  |
| EV Entrada Hum Hor A (#3)        | <input checked="" type="checkbox"/> on |      | 2014-11-19 18:04:20.344 | Humedal Horizontal A       |
| EV Realimentación Hum Hor A (#6) | <input checked="" type="checkbox"/> on |      | 2014-11-19 18:04:22.631 | Humedal Horizontal A       |
| EV Salida Hum Hor A (#7)         | <input checked="" type="checkbox"/> on |      | 2014-11-19 18:04:22.225 | Humedal Horizontal A       |
| Sensor Max Salida Hum Hor A      |                                        |      | 2014-11-05 17:32:42.651 | Deposito Salida Hum Hor A  |
| Sensor Min Salida Hum Hor A      |                                        |      | 2014-11-06 11:03:06.910 | Deposito Salida Hum Hor A  |
| Sensor Max Entrada Hum Hor A     |                                        |      | 2014-11-05 17:32:42.651 | Deposito Entrada Hum Hor A |
| Sensor Min Entrada Hum Hor A     |                                        |      | 2014-11-06 11:31:35.228 | Deposito Entrada Hum Hor A |
| Bomba Riego HHA (Mini #1)        | <input checked="" type="checkbox"/> on |      | 2014-11-20 17:36:10.229 | Humedal Horizontal A       |
| Bomba Recogida HHA (Maxi #4)     | <input checked="" type="checkbox"/> on |      | 2014-11-20 17:29:58.132 | Humedal Horizontal A       |

**Figura 18.** Cada una de las zonas permite agrupar a cada uno de sus sensores y elementos relacionados con el funcionamiento del sistema. Fuente: DASSA Technologies.

Una característica del sistema es que **muestra el histórico de funcionamiento de cada uno de los elementos del prototipo** dados de alta en la automatización, por ejemplo, la Figura 19 muestra el encendido y apagado de la bombas del depósito de entrada.



**Figura 19.** El sistema brinda el histórico de operación de cada uno de los componentes del sistema. Fuente: DASSA Technologies.

El sistema también permite la **recopilación de información en tiempo real del funcionamiento del prototipo**. En la siguiente Figura se presenta el histórico de datos obtenidos por la sonda multiparamétrica del prototipo (Figura 20).

| ID   | Nom           | SamplingDev | Temp C | Cond mS cm | PH    | NO3 N mg L | Data/Hora               |
|------|---------------|-------------|--------|------------|-------|------------|-------------------------|
| 7601 | Sonda Entrada | Unknown     | 15.100 | 2.940      | 8.180 | 1.190      | 2015-10-14 09:44:05.997 |
| 7602 | Sonda Entrada | Unknown     | 15.080 | 2.940      | 8.180 | 1.180      | 2015-10-14 09:50:05.443 |
| 7603 | Sonda Entrada | Unknown     | 15.080 | 2.940      | 8.030 | 0.580      | 2015-10-14 09:51:06.028 |
| 7604 | Sonda Entrada | Unknown     | 15.070 | 2.940      | 8.200 | 1.040      | 2015-10-14 09:57:06.264 |
| 7605 | Sonda Entrada | Unknown     | 15.070 | 2.940      | 8.030 | 0.580      | 2015-10-14 09:58:05.848 |
| 7606 | Sonda Entrada | Unknown     | 15.070 | 2.940      | 8.030 | 0.580      | 2015-10-14 09:59:05.421 |
| 7607 | Sonda Entrada | Piez_1      | 15.060 | 2.940      | 8.190 | 1.350      | 2015-10-14 10:04:05.349 |
| 7608 | Sonda Entrada | Piez_1      | 15.050 | 2.940      | 8.030 | 0.580      | 2015-10-14 10:05:05.924 |
| 7609 | Sonda Entrada | Piez_1      | 15.050 | 2.940      | 8.030 | 0.580      | 2015-10-14 10:06:05.507 |
| 7610 | Sonda Entrada | Piez_1      | 15.050 | 2.940      | 8.030 | 0.580      | 2015-10-14 10:07:06.080 |

**Figura 20.** El sistema brinda datos de operación del prototipo en tiempo real. Fuente: DASSA Technologies.



Los elementos del sistema que permiten el control y monitoreo del sistema son:

- Sensores de nivel en cada depósito para controlar el nivel máximo que almacenan.
- Bombas de pistón para impulsar el agua tratada desde el humedal a cada uno de los depósitos.
- Bombas sumergidas para mover el agua de un depósito de almacenamiento a otro.
- Contadores de caudal
- Electroválvulas para regular la entrada y salida del agua.

Todo esto conectado a través un kit domótico compuesto por los siguientes elementos:

- Ordenador.
- Router.
- Módulos de fuerza.
- Modulo de medición.
- Modulo contador.
- Módulos de sensores magnéticos.

## **5. PLAN DE TRABAJO**

Como parte del plan trabajo se han definido tres actividades principales:

- Búsqueda bibliográfica y formación complementaria.
- Construcción de los sistemas experimentales.
- Muestreo de los pilotos y prototipos.

### **5.1. BUSQUEDA BIBLIOGRÁFICA Y FORMACIÓN COMPLEMENTARIA**

El proceso de búsqueda de información relacionada con los distintos temas de estudio para definir el Estado del Arte, me ha permitido seleccionar y definir la bibliografía más importante y profundizar en los conocimientos de los temas tratados en el estado del arte. El gestor de referencias Mendeley Premium ha sido de gran ayuda en este trabajo. El listado de la bibliografía consultada se encuentra en el apartado.

Para fortalecer los conocimientos y habilidades en el doctorado se han tomado los siguientes cursos:

- Curso: “Constructed Wetlands for Water Pollution Control. Aarhus University, Denmark del 18 al 24 Octubre 2015.
- Curso: “Gestión integral de los ciclos urbanos y ecológicos del agua” Máster ciencia y tecnología de la sostenibilidad ,Campus Norte, Barcelona. 2º semestre 2014/2015.
- Curso: “Fundamentos de las ciencias sociales y aproximación a los conflictos sociales. Máster ciencia y tecnología de la sostenibilidad ,Campus Norte, Barcelona. Primer semestre 2014/2015.
- Curso: “Scopus” Biblioteca del Campus Terrassa. 14 de mayo de 2014.
- Gestión de los residuos - Ciclo de Charlas Reciclar Ciudad 2014. Sala Diesel - mNACTEC. 24 de abril de 2014.
- Curso: “Publicació i avaluació de la recerca” Biblioteca l’EUETIB. Instituto de Ciencias de la Educación: 11 de abril del 2014.
- Curso: “Pautes per elaborar, estructurar i redactar un treball acadèmic” Biblioteca Rector Gabriel Ferrate. 10 de abril de 2014.
- Curso: ATENEA: “Publicació i avaluació de la recerca” Biblioteca l’ETSAB. 9 de abril del 2014.
- Asistencia a presentación tesis doctoral de Roger Samsó Campà.: "Numerical Modeling of Cosntructed Wetlands for Wastewater Treatment". Aula Master Campus Norte. 28 de marzo de 2014.

- Taller “Aprendizaje activo en grupos numerosos” 4 Aula VS214 del edificio Vèrtex. 20 de marzo de 2014.
- Curso: “Gestores de referencias: Mendeley Premium” Biblioteca del Campus Terrassa. 17 de febrero de 2014.
- Curso-taller de diseño de humedales construidos. Sala de reuniones Cátedra, Campus Terrassa. Del 3 al 6 de febrero de 2014.
- Asistencia a Ciclo de Charlas Reciclar Ciudad 2014. Economía circular y desarrollo territorial. Sala Diesel - mNACTEC. 27 de enero de 2014.

## **5.2. PLAN EXPERIMENTAL**

### **5.2.1. PARÁMETROS A ANALIZAR**

Los parámetros a analizar en los pilotos IPCT y en el Prototipo REAGRITECH son:

- |                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 1. Conductividad.                     | 8. DBO.                  |
| 2. pH.                                | 9. DQO.                  |
| 3. Alcalinidad.                       | 10. NTK                  |
| 4. SST (Sólidos suspendidos totales)* | 11. Nitrógeno amoniacal. |
| 5. Turbidez.                          | 12. Nitritos.            |
| 6. Oxígeno disuelto.                  | 13. Nitratos.            |
| 7. Temperatura                        | 14. Fósforo total        |

*\*Nota: En los pilotos IPCT no se tienen SST al ser alimentados con agua residual sintética.*

### **5.2.2. IPCT**

#### **FUNCIONAMIENTO DE LOS PILOTOS**

El funcionamiento de los pilotos IPCT tiene como finalidad de cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- determinar los parámetros de diseño para definir la constante de remoción  $k$  de primer orden,
- comparar la eficiencia de remoción de nutrientes (nitrógeno) a distintas profundidades entre dos medios filtrantes diferentes,
- evaluar los efectos de la aireación inducida dentro del sistema y
- determinar la remoción de plaguicidas en humedales construidos,

Con la obtención de los resultados de preparación del ARS se variará la concentración a dosificar mensualmente a los pilotos IPCT según se ve en la Tabla 10:

**Tabla 10.** Concentraciones a dosificar mensualmente a los VF.

| Mes   | Parámetro | Concentración (mg L <sup>-1</sup> ) |
|-------|-----------|-------------------------------------|
| Marzo | DBO5      | 500                                 |
|       | NT        | 50                                  |
| Abril | DBO5      | 1000                                |
|       | NT        | 100                                 |
| Mayo  | DBO5      | 1200                                |
|       | NT        | 120                                 |
| Junio | DBO5      | 2000                                |
|       | TN        | 200                                 |

El siguiente funcionamiento en los 4 VF, (Tabla 11) teniendo en cuenta que el caudal del humedal será de 48 L d<sup>-1</sup>, distribuido en 6 riegos (8 L por riego) es:

**Tabla 11.** Funcionamiento del sistema experimental de los pilotos IPCT.

| Mes 2016 | Semana | Descripción                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ene      | 1 a 4  | Operar el sistema con una baja concentración de ARS, para que alcance su estabilización.                                                                                                                                                                 |
| Feb      | 1 a 4  |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Mar      | 1      | Dosificar agua normal para dejar en descanso al humedal.                                                                                                                                                                                                 |
|          | 2      | Al inicio de la semana dosificar el ARS de acuerdo a las concentraciones de entrada según la Tabla 10.                                                                                                                                                   |
|          | 3      | Los últimos dos días de la semana se harán los muestreos por duplicado para evaluar la remoción de nutrientes y plaguicidas.<br>Al siguiente día del último día de muestreo se comienza con la aireación inducida al sistema, la cuál durará una semana. |
|          | 4      | Los últimos dos días de la 4a, se harán los muestreos por duplicado, para evaluar la remoción de nutrientes y plaguicidas con el sistema de aireación inducida funcionando,                                                                              |
| Abr      | 1 a 4  | Se operará de la misma forma que en el mes de Marzo                                                                                                                                                                                                      |
| May      | 1 a 4  |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Jun      | 1 a 4  |                                                                                                                                                                                                                                                          |

Para evaluar los efectos de la temperatura en el sistema se repetirá el mismo funcionamiento durante los meses de julio a diciembre de 2016.

La misma operación de los pilotos se realizarán en el año 2017 para poder cumplir con el objetivo específico:

- Evaluar los efectos de recirculación del efluente en humedales verticales de grava y corcho,

El sistema tendrá el mismo funcionamiento con la diferencia que el caudal será de 51 L d<sup>-1</sup>, por la cantidad de agua retenida por los muestreadores (3) que se encuentran a distintas profundidades del medio filtrante. El afluente entrará en los humedales en 6 riegos, el cuál se volverá a introducir al sistema en su totalidad para ser distribuido de nueva cuenta en 6 riegos más.

### CALENDARIO DE MUESTREO

La Tabla 12 presenta el calendario previsto para los muestreos en los VF pilotos del IPCT, donde viene indicado tanto el número de muestras como el mes en la que se prevé realizar el muestreo a la entrada y salida de los humedales operando con y sin aireación inducida, y a distintas profundidades del medio filtrante.

**Tabla 12.** Calendario de muestreos IPCT.

| PERIODO 2016                     | VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE HUMEDALES     |                        |           |               |           |
|----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|-----------|---------------|-----------|
|                                  | Entrada Humedal<br>(Depósito de mezcla) | Salida y muestreadores |           |               |           |
|                                  |                                         | VF1g                   | VF2c      | VF3g          | VF4c      |
|                                  |                                         | Con aireación          |           | Sin aireación |           |
| Periodo de estabilización        |                                         |                        |           |               |           |
| Enero                            | 3                                       | 12                     | 12        | 12            | 12        |
| Febrero                          | 3                                       | 12                     | 12        | 12            | 12        |
| Variación de las concentraciones |                                         |                        |           |               |           |
| Marzo (1)                        | 3                                       | 12                     | 12        | 12            | 12        |
| Abril (2)                        | 3                                       | 12                     | 12        | 12            | 12        |
| Mayo (3)                         | 3                                       | 12                     | 12        | 12            | 12        |
| Junio (4)                        | 3                                       | 12                     | 12        | 12            | 12        |
| <b>Muestras Tipo</b>             | <b>18</b>                               | <b>72</b>              | <b>72</b> | <b>72</b>     | <b>72</b> |

Se continuará con el mismo calendario durante los meses de agosto a diciembre con el objetivo de evaluar los efectos de la temperatura en el sistema,

## **TOMA DE MUESTRAS**

La toma de muestras en los humedales se realizara a la entrada del sistema (tanque del ARS), a la salida de cada uno de los VF en funcionamiento (grava y corcho) y en los distintos muestreadores ubicados a distintos niveles del medio filtrante. Es una operación sencilla y rápida, que básicamente consiste en:

- para analizar los parámetros DQO, BBO<sub>5</sub>, nitrógeno y fósforo total se tomará una **muestra de 100 ml**.
- dado que el objetivo del muestreo y análisis en los humedales es determinar la eficiencia de eliminación que presentan, se tomaran sólo **muestras simples por duplicado**.
- los muestreos simples se realizarán durante **tres días consecutivos** al mes.
- previo al muestreo se deben **etiquetar todos los recipientes** donde se almacenarán, con marcador indeleble.
- las muestras se tomarán desde el punto de muestreo que se encuentra en el deposito de salida.
- para tomar la muestra se abre la ventana que se encuentra en la tapa del deposito.
- parámetros como temperatura y pH se pueden tomar directamente en el sitio de muestreo introduciendo directamente las tiras de pH y el termómetro dentro del vaso de precipitados antes de vaciar la muestra al recipiente.

### **5.2.3. REAGRITECH**

#### **FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO**

Los prototipos REAGRITECH permitirán cumplir con los siguientes objetivos:

- determinar los parámetros de diseño para definir la constante de remoción k de primer orden.
- comparar la eficiencia de remoción de nutrientes (nitrógeno) entre dos medios filtrantes diferentes,
- determinar la remoción de plaguicidas en humedales construidos,
- evaluar los efectos de recirculación del efluente en humedales verticales de grava y corcho,

El caudal máximo a tratar en el los prototipos será de 750 L d<sup>-1</sup>. Brindan información diaria de los parámetros pH, REDOX, temperatura, nitratos y conductividad. Adicionalmente las campañas de muestreo se realizarán según la periodicidad mostrada en el punto Calendario de Muestreo del Plan de trabajo.



## CALENDARIO DE MUESTREO

Para cada uno de los prototipos se hará un muestreo simple durante tres días consecutivos en los meses indicados en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Calendario de muestreos REAGRITECH.

| PERIODO 2016         | Validación de los CW |           |           |
|----------------------|----------------------|-----------|-----------|
|                      | Sudanell             | Vilanova  | Bellvis   |
| Enero                | 3                    | 3         | 3         |
| Febrero              | 3                    | 3         | 3         |
| Marzo                | 3                    | 3         | 3         |
| Mayo                 | 3                    | 3         | 3         |
| Julio                | 3                    | 3         | 3         |
| Septiembre           | 3                    | 3         | 3         |
| Diciembre            | 3                    | 3         | 3         |
| <b>Muestras Tipo</b> | <b>21</b>            | <b>21</b> | <b>21</b> |

## TOMA DE MUESTRAS

La toma de muestras en los humedales se hará a la entrada del sistema (segunda cámara del tanque de sedimentación), y a la salida de cada uno de los humedales en funcionamiento (efluentes del humedal vertical, horizontal con grava y horizontal con corcho). es una operación sencilla y rápida, que básicamente consiste en lo siguiente:

- para analizar los parámetros DQO, DBO5, nitrógeno y fósforo total se tomará una muestra de 500 ml.
- dado que el objetivo del muestreo y análisis en los humedales es determinar la eficiencia de eliminación que presentan, se **recomienda tomar sólo muestras simples por duplicado**.
- **los muestreos simples se realizarán durante tres días consecutivos** al mes. Previo al muestreo se deben etiquetar todos los recipientes donde se almacenarán, con marcador indeleble, de acuerdo a lo indicado en el protocolo de muestreo y transporte.
- las muestras se tomarán desde el punto de muestreo que se encuentra en el contenedor. Para tomar la muestra se abre el grifo manualmente, se debe encender la bomba de trasiego, para llevar el agua del depósito de salida deseado, y se deben dejar correr 35 L para promover que se expulsen restos de suciedad acumulados en el tubo y en el grifo de salida, así como el agua que se encuentre dentro de las tuberías.
- posteriormente se acerca un vaso de precipitados a la salida y se llena con agua tratada, se lava el vaso y se repite el procedimiento. finalmente se toma una muestra más de agua y se traspasa al frasco para almacenamiento final.
- parámetros como temperatura y pH se pueden tomar directamente en el sitio de muestreo introduciendo directamente las tiras de pH y el termómetro dentro del vaso de precipitados antes de vaciar la muestra al recipiente.

El material necesario para realizar el muestreo es:

- vaso de precipitados de 500 ml.
- guantes de látex y bata de laboratorio.
- recipientes estériles de 500 ml.
- nevera portátil y bolsas de gel para congelar
- tiras para medir pH y termómetro para medir temperatura

### 5.3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

La propuesta para desarrollar la tesis y cada uno de los temas propuestos en el plan de trabajo se presentan en el siguiente cronograma de actividades (Tabla 14).

**Tabla 14.** Propuesta de plan de actividades.

| Nº  | Actividades                                                                                               | 2014 | 2015 | 2016 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 2017 | 2018 |    |    |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------|------|----|----|----|
|     |                                                                                                           |      |      | 1    | 2 | 3 |   |   |   | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |      |      | 10 | 11 | 12 |
|     |                                                                                                           |      |      |      |   | 1 | 2 | 3 | 4 |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 1   | Busqueda bibliográfica                                                                                    |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 2   | Construcción sistemas experimentales                                                                      |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 2.1 | Pilotos IPCT                                                                                              |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 2.2 | REAGRITECH                                                                                                |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 3   | Muestreos                                                                                                 |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 3.1 | Pilotos IPCT                                                                                              |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Estabilización del sistema. Operación con baja concentración de ARS. Muestra simple al final de cada mes. |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 1. Dosificación de agua norma para dejar en descanso al humedal                                     |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Dosificación de ARS Concentración 1 y operación normal                                                    |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Muestreos al final de la tercer semana                                                                    |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Operación con aireación inducida                                                                          |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Muestreos al final de la cuarta semana                                                                    |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 2. Se repite programa de Ciclo 1 con concentración 2.                                               |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 3. Se repite programa de Ciclo 1 con concentración 3.                                               |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 4. Se repite programa de Ciclo 1 con concentración 4.                                               |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Estabilización del sistema.                                                                               |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 1                                                                                                   |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 2                                                                                                   |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 3                                                                                                   |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | CICLO 4                                                                                                   |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 3.2 | REAGRITECH                                                                                                |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Estabilización de los prototipos                                                                          |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
|     | Muestreos                                                                                                 |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 4   | Análisis de información y escritura de artículos                                                          |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 5   | Envío de artículos para publicar.                                                                         |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 6   | Propuesta de estancia en Dinamarca                                                                        |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 7   | Escritura de tesis                                                                                        |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |
| 8   | Defensa de tesis                                                                                          |      |      |      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |      |    |    |    |

## 5.4. RESULTADOS ESPERADOS Y PUBLICACIONES

### 5.4.1. ARTÍCULOS PROPUESTOS

Se plantea la publicación como primer autor de 5 artículos en revistas indexadas y participar como coautora en artículos de otras líneas de investigación relacionadas con los pilotos IPCT y el proyecto REAGRITECH.

El título provisional de los artículos como autora principal:

1. Parámetros de diseño en humedales verticales y horizontales con grava y corcho para agua de escorrentía agrícola.
2. Remoción de DQO y  $\text{NO}^{-3}$  en humedales verticales de grava y corcho.
3. Recirculación del efluente para mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes en humedales verticales de grava y corcho.
4. Efectos de la aireación inducida en la remoción de contaminantes en humedales verticales de grava y corcho.
5. Remoción de plaguicidas en humedales construidos subsuperficiales.

**La publicación del trabajo “*Design parameters of constructed wetlands for regeneration and reuse of agricultural runoff and drainage water in irrigation*” en el libro de Abstracts del Wetpol** (mencionado en el apartado REAGRITECH del estado del arte) servirá como base para el primer artículo.

**Uno de los primeros artículos donde aparezco como co-autor ha sido publicado en la Revista Ingenierías, de la Universidad de Medellín, Colombia,** lleva por título “*TIC para la determinación de los parámetros operacionales de humedales construidos diseñados para el tratamiento de aguas contaminadas por nitratos*” (también mencionado en el apartado REAGRITECH del estado del arte).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- A. Calera, I. Campos, “El uso de la teledetección en la gestión del agua en la agricultura de regadío. Incorporación de la teledetección a la gestión del agua en la agricultura. Monográfico riegos del alto Aragón. Enero 2010, 13-15.
- Arias, Carlos A; Brix, Hans; Marti, E. Recycling of treated effluents enhances removal of total nitrogen in vertical flow constructed wetlands 2005.
- Ávila, C., García, J., & Garfí, M. (2013). Updating the state of the art regarding wastewater treatment by vertical subsurface flow constructed wetlands, (July).
- A. Gross, Recycled vertical flow constructed wetland ( RVFCW )— a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households, 66, 916–923. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.06.006 (2007).
- A. Pérez, M. Milla, M. Mesa, “Impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en la agricultura”, Cultivos tropicales, 27(1), 11-17, 2006.
- Boog, Johannes; Nivala, Jaime; Aubron, Thomas; Wallace, Scott; van Afferden, Manfred; Müller, Roland Arno. Hydraulic characterization and optimization of total nitrogen removal in an aerated vertical subsurface flow treatment wetland. 2014.
- Brix, H., & Arias, C. a. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. Ecological Engineering, 25(5), 491–500. doi:10.1016/j.ecoleng.2005.07.009
- Colaboradores de Wikipedia. Contaminación difusa [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2014 [consultado: 9 de enero del 2016]. Disponible en <[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Contaminaci%C3%B3n\\_difusa&oldid=78360491](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Contaminaci%C3%B3n_difusa&oldid=78360491)>.
- European Environment Agency Present concentration of nitrate in groundwater bodies in European countries, 2007.
- Fan, J., Wang, W., Zhang, B., Guo, Y., Ngo, H. H., Guo, W., ... Wu, H. (2013). Nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: impact of influent COD/N ratios. Bioresource Technology, 143, 461–6. doi:10.1016/j.biortech.2013.06.038.
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., ... Amann, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. The global nitrogen cycle in the twenty- first century.

- F.G. Freire, L.C. Davies, A.M. Vacas, J.M. Novais, S. Martins-Dias.(2009). Influence of operating conditions on the degradation kinetics of an azo-dye in a vertical flow constructed wetland using a simple mechanistic model.
- Gallegos, A., Aguilar, L., Campos, I., Caro, P., Sahuquillo, S., Pérez, C., Arias, C. A., Montoya, J., Morató, J. "TIC para la determinación de los parámetros operacionales de humedales construidos diseñados para el tratamiento de aguas contaminadas por nitratos", Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, Colombia, Vol. 15, No. 28, Enero-Junio 2016.
- Joan García S. Angelica Corzo H. Depuración con humedales construidos, Guía practica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial, 2008.
- J. Vymazal, "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands", Sci. Total Environ. 380, 48–65, 2007.
- Langergraber, G., Leroch, K., Pressl, A., Sleytr, K., Rohrhofer, R., & Haberl, R. (2009). High-rate nitrogen removal in a two-stage subsurface vertical flow constructed wetland. Desalination, 246(1-3), 55–68. doi:10.1016/j.desal.2008.02.037
- Luederitz, Volker; Eckert, Elke; Lange-Weber, Martina; Lange, Andreas; Gersberg, Richard M. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. 2001.
- Menachem Y. Sklarz, Amit Gross\*, M. Ines M. Soares, Alexander Yakirevich Mathematical model for analysis of recirculating vertical flow constructed wetlands (2009).
- Molle, Pascal; Prost-Boucle, Stéphanie; Lienard, Alain.Potential for total nitrogen removal by combining vertical flow and horizontal flow constructed wetlands: A full-scale experiment study. 2008.
- Molle, P. Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: treatment limits and operation modes, 1–9 (2010).
- Morari, F., & Giardini, L. (2008). Municipal wastewater treatment with vertical flow constructed wetlands for irrigation reuse, 5, 643–653. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.10.014

- OMS. (1989). Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura; medidas de protección de la salud pública. Ginebra. Retrieved from <http://www.who.int/iris/handle/10665/39350>
- Oscar D. Alan Camacho, Luis F. Pérez, Mauricio A. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Edición Nelson Antequera Durán.
- P. Foladori, L. Bruni, S. Tamburini. (2015). Bacteria viability and decay in water and soil of vertical subsurface flow constructed wetlands.
- K. Isermann, "Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication", *Fertil. Res* 26, 253-269, 1990.
- Red ALFA TECSPAR - Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y el Tratamiento de Aguas Residuales; "Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas"; Eds. Jordi Morató, Gustavo Peñuela; ISBN: 978-958-44-5307-5; TECSPAR AML/19.0902/97/666/II-543-FI-FA-FCD financiado por la Comisión Europea.
- Robert H. Kadlec Scott D. Wallace. *Treatment Wetlands*. Second edition, 2009 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. International Standard Book Number-13: 978-1-56670-526-4 (Hardcover)
- R. Ayers, D. West Cot, "La calidad del agua en la agricultura", Estudio FAO, Serie Riego y drenaje. No 29. Rev. Ed. FAO. 85, 1987
- Sklarz, M. Y., Gross, A., Soares, M. I. M., & Yakirevich, A. (2010). Mathematical model for analysis of recirculating vertical flow constructed wetlands. *Water Research*, 44(6), 2010–20. doi:10.1016/j.watres.2009.12.011.
- Zapater, M., Gross, a., & Soares, M. I. M. (2011). Capacity of an on-site recirculating vertical flow constructed wetland to withstand disturbances and highly variable influent quality. *Ecological Engineering*, 37(10), 1572–1577. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.03.033.
- Zurita, F.; De Anda, J.; Belmont, M. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. 2009.



- Saggar, S., Jha, N., Deslippe, J., Bolan, N. S., Luo, J., Giltrap, D. L., ... Tillman, R. W. (2013). Denitrification and N<sub>2</sub>O:N<sub>2</sub> production in temperate grasslands: processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. *The Science of the Total Environment*, 465, 173–95. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.11.050
- Philippot, L., Andert, J., Jones, C. M., Bru, D., & Hallin, S. (2011). Importance of denitrifiers lacking the genes encoding the nitrous oxide reductase for N<sub>2</sub>O emissions from soil. *Global Change Biology*, 17(3), 1497–1504.