



Life
ECOGRANULARWATER



(LIFE16 ENV/ES/196)

Proyecto cofinanciado por el
Programa LIFE de la Unión Europea.

Guía de Instalación y Mantenimiento de un Sistema de Desnitrificación Biológica en Agua Potable basado en la tecnología Aeróbica Secuencial Granular

Proyecto LIFE ECOGRANULARWATER

Proyecto seleccionado y financiado por la Unión Europea para la implantación de una tecnología biológica innovadora para la eliminación de nitratos en agua potable para el consumo humano



(LIFE16 ENV/ES/196)

Proyecto cofinanciado por el
Programa LIFE de la Unión Europea.

Guía de Instalación y Mantenimiento de un Sistema de Desnitrificación Biológica en Agua Potable basado en la tecnología Aeróbica Secuencial Granular.

Proyecto LIFE ECOGRANULARWATER

Proyecto seleccionado y financiado por la Unión Europea para la implantación de una tecnología biológica innovadora para la eliminación de nitratos en agua potable para el consumo humano.

EDITA:

Diputación Provincial de Granada. Servicio del Ciclo Integral del Agua.

AUTORES:

Jesús González López.
Alejandro González Martínez.
Miguel Hurtado Martínez.
Alfonso Ruiz Pérez.
Francisco Javier García Martínez.

COORDINACIÓN DE LA EDICIÓN:

Caridad Ruiz Valero.
Beatriz Rodríguez Centeno.

DISEÑO, MAQUETACIÓN E IMPRESIÓN:

PÚLSAR. Diseño Gráfico y Publicidad.

DEPÓSITO LEGAL:

GR 1657-2021

INFORMACIÓN DE CONTACTO:

Diputación de Granada.
C/ Periodista Barrios Talavera, 1.
18014. Granada.

El manual de funcionamiento que se detalla a continuación se engloba dentro del proyecto europeo LIFE ECOGRANULARWATER (LIFE16 ENV/ES/196). Este proyecto se fundamenta en la implantación de un sistema demostrativo para la eliminación de compuestos nitrogenados en aguas subterráneas mediante el uso de una tecnología Aeróbica Granular Secuencial. Se trata de un proyecto del programa LIFE de la convocatoria de 2016. Su fecha de inicio se sitúa en el 1 de septiembre de 2017, y se ha desarrollado por la Diputación de Granada, la Universidad de Granada, la Universidad de Aalto en Finlandia y las empresas españolas Construcciones Otero y GEDAR.

El objetivo general de este proyecto ha sido el desarrollo e implantación de una novedosa tecnología de desnitrificación biológica para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con nitratos. Este sistema basa su funcionamiento en la tecnología Aeróbica Granular Secuencial, la cual consiste en el uso de microorganismos que bajo ciertas condiciones de operación forman unos agregados esféricos llamados gránulos. Estos gránulos están formados exclusivamente por microorganismos, y en consecuencia no están fijados a ninguna superficie o soporte, estando confinados en biorreactores y bajo determinadas condiciones de operación hacen posible la desnitrificación de forma eficiente y segura.

El proyecto LIFE ECOGRANULARWATER surgió con el propósito de implantar la tecnología Aeróbica Granular Secuencial para la eliminación de compuestos nitrogenados y otros contaminantes en pequeños municipios que posean problemas de contaminación por nitratos en sus aguas de abastecimiento. Este proyecto contempla la implantación de una planta piloto a escala real en el municipio de Torre Cardela, Granada (España). En consecuencia, esta tecnología se engloba en una línea de proyectos enfocados a mejorar la calidad de las aguas subterráneas en pequeños municipios. Se trata de un proyecto basado en la filosofía de tratamientos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, generando muy bajo impacto ambiental en el proceso de eliminación de estos contaminantes. En este sentido, se puede afirmar que esta tecnología se basa exclusivamente en métodos biológicos para dar solución a uno de los principales problemas de las aguas subterráneas, como es el caso de la contaminación por nitratos. Una tecnología de bajo coste, fácil de implantar en pequeños municipios con reducidos ingresos municipales.



ÍNDICE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
2. TECNOLOGÍA PROPUESTA	15
3. DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y SU FUNCIONAMIENTO	21
3.1. Descripción de la instalación	21
3.2. Componentes de la instalación	23
3.3. Inoculación de la instalación	29
3.4. Funcionamiento de la instalación	30
4. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PLANTA	37
4.1. Consumo de materia orgánica en los biorreactores	37
4.2. Análisis de la cantidad de biomasa presente en el sistema y proceso de granulación	38
4.3. Eliminación de nitratos	39
5. ORIENTACIONES PARA DIMENSIONAR UNA PLANTA	41
6. TAREAS DE MANTENIMIENTO	49
7. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y SOLUCIONES ADOPTADAS	55
8. VENTAJAS Y CONCLUSIONES	59
8.1. Ventajas frente a otros sistemas de desnitrificación	59
8.2. Conclusiones	61
9. INFORMACIÓN ÚTIL	63
9.1. Referencias bibliográficas	63
9.2. Información complementaria	65



1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN.

El agua subterránea es un importante recurso para la población mundial, y proporciona abastecimiento a un tercio de la población general, de ahí la importancia de conservarla en buenas características y evitar su contaminación y degradación (Fillinger *et al.*, 2021).

Los recursos hídricos subterráneos abastecen al 20% de la demanda en ciudades con más de 20.000 habitantes en España, sin embargo, esta cifra se eleva hasta el 70% de los suministros urbanos en ciudades con menos de 20.000 habitantes, en las cuales su único sustento es el agua subterránea (De Stefano *et al.*, 2015).

Hasta el 80% del agua bombeada desde el subsuelo en España se destina al riego de cultivos, datos que nos demuestran la gran dependencia que tiene España de las aguas subterráneas. Esta circunstancia se repite con frecuencia en la mayoría de los países mediterráneos que poseen gran escasez de precipitaciones, lo cual unido a su desigual distribución a lo largo del año, genera importantes periodos de sequía en los cuales se hace imprescindible el abastecimiento mediante aguas subterráneas.

Uno de los principales problemas encontrados en las aguas subterráneas es la presencia de contaminantes que degradan su calidad y las hacen inutilizables para ciertos usos como el consumo humano, siendo los compuestos nitrogenados uno de los principales contaminantes encontrados.

La contaminación de las aguas subterráneas por nitratos tiene diversos orígenes relacionados con la actividad humana en las inmediaciones de las masas de agua. Esta contaminación puede estar localizada en un punto determinado de la superficie como consecuencia de ciertas actividades que provocan vertidos, como el caso de efluentes de aguas residuales, ciertas actividades industriales, etc. Pero en la mayor parte de las masas de agua, esta contaminación suele proceder de fuentes de contaminación difusa.

La contaminación puntual se da como consecuencia de un foco emisor que genera una zona de contaminación en sus inmediaciones. En este caso nos encontramos con vertidos procedentes de distintas instalaciones que generan una pluma de contaminación, que afecta solamente a zonas en las inmediaciones del punto de vertido en un primer momento. Pero como consecuencia del movimiento natural del agua a través del acuífero, los contaminantes se distribuyen por este, afectando a zonas más amplias (Figura 1).

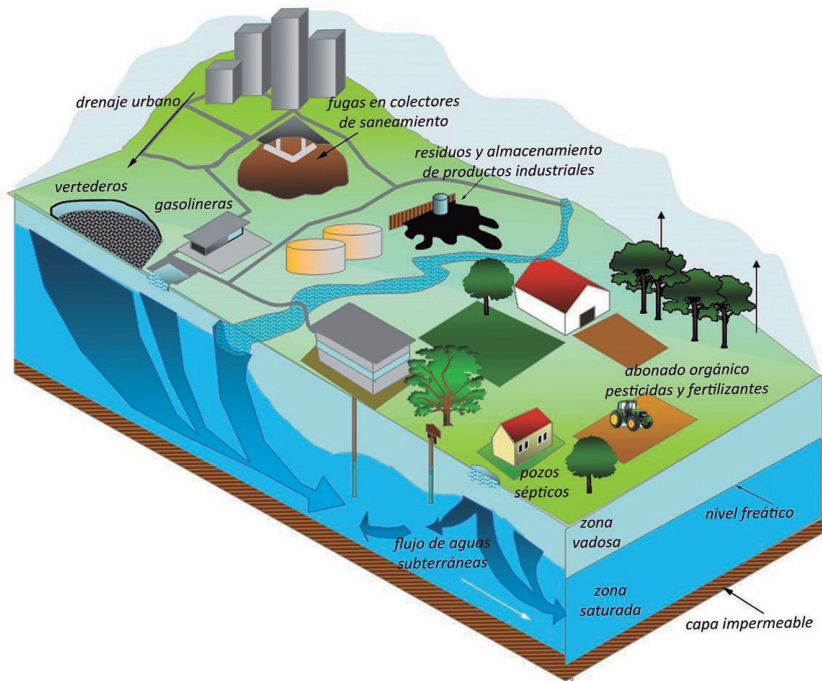


Figura 1: Fuentes de contaminación puntual y difusa en aguas subterráneas.
(Fuente: Página web del proyecto LIFE RURAL SUPPLIES).

En segundo lugar, nos encontramos con la contaminación difusa por nitratos en el agua subterránea. Esta se produce debido a fuentes de contaminación que no se encuentran localizadas en un punto concreto, con una extensión determinada, sino que afectan a grandes áreas como es el caso de los cultivos extensivos. Consecuentemente, si no se realiza una adecuada gestión de los fertilizantes y determinados compuestos que se suministran a los cultivos, se puede ocasionar una contaminación por un excesivo uso de estos, que acaban infiltrándose en las aguas subterráneas y contaminándolas. Cabe resaltar que uno de los principales compuestos que es adicionado a los cultivos es el Nitrógeno, en forma de distintas formulaciones, que tras el paso por el suelo se convierte en nitratos que son acumulados en las masas de agua subterráneas (Figura 1).

La contaminación por nitratos es un importante problema en pequeños municipios, en los cuales las zonas de recarga de los acuíferos se encuentran ocupadas por actividades agrícolas y ganaderas, las cuales si no se realizan de forma correcta provocan un exceso de compuestos nitrogenados que son lavados por las precipitaciones y acaban introduciéndose en las masas de agua subterráneas. Esto ocasiona una degradación de su calidad y puede llegar a convertirlas en no aptas para el consumo humano si se superan los valores de nitratos exigidos por la legislación en materia de agua de consumo.

En el sentido mencionado, la presencia de elevadas concentraciones de nitrato en el agua de consumo puede generar importantes problemas de salud, habiéndose descrito y relacionado con diversas patologías del tracto digestivo, así como en el desarrollo de metahemoglobinemia en niños (Vaishali *et al.*, 2015). Es por ello que la directiva Marco de Aguas, cuyo objetivo es conseguir una mejora en la calidad de las aguas, junto con la Directiva 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación causada por nitratos de origen agrícola, y la Directiva sobre nitratos (91/676/CEE), establecen que valores por encima de los 50 mg/L de nitrato en

aguas, afectan fuertemente a su calidad, haciéndolas no aptas para el consumo humano, y recomendando no exceder el nivel de 25 mg/L.

Dentro de España y en concreto en Andalucía podemos encontrar numerosos municipios (muchos de ellos de pequeño tamaño) que poseen problemas de contaminación por nitratos en las aguas subterráneas utilizadas para el abastecimiento, con concentraciones de nitratos superiores a 50 mg/L. Una de estas localidades es el municipio de Torre Cardela, ubicado en la provincia de Granada (Figura 3), siendo además destacable que la zona donde se localiza este municipio está catalogado como vulnerable por nitratos.

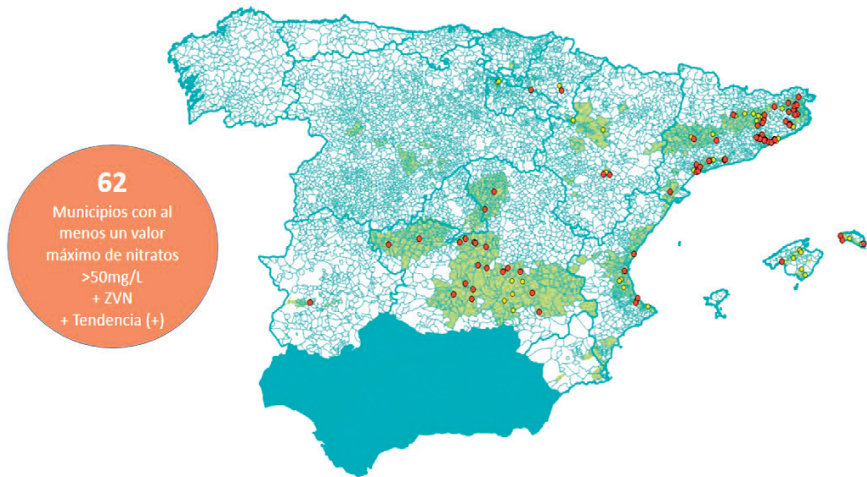


Figura 2: Municipios con problemas de contaminación por nitratos en España.

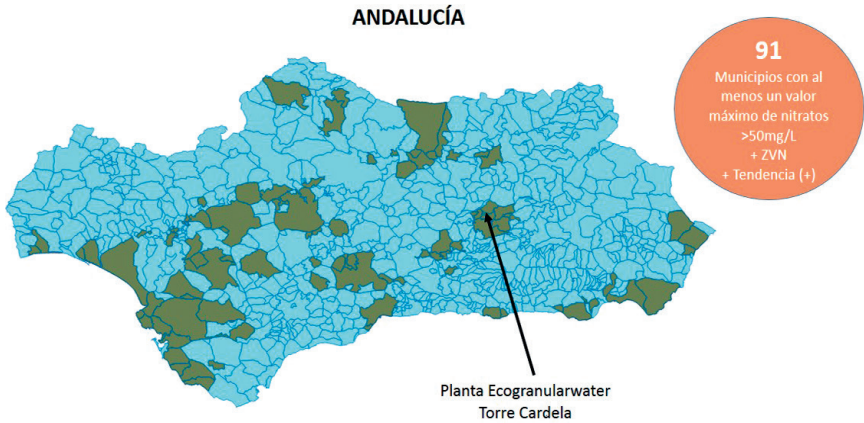


Figura 3: Municipios con problemas de contaminación por nitratos en Andalucía.

Analizada la legislación vigente y bajo las consideraciones antes mencionadas, surge el proyecto LIFE ECOGRANULARWATER, destinado al tratamiento de aguas subterráneas destinadas al consumo humano, en municipios con problemas de contaminación por nitratos, con el claro objetivo de aportar a pequeños municipios con baja disponibilidad de recursos de un sistema de bajo coste y sostenibilidad ambiental. Se trata de una tecnología modular fácil y rápida de implantar y que permite solucionar problemas de eliminación de nitratos en municipios, con rentas bajas que no pueden permitirse la instalación de tecnologías más costosas. En el mismo sentido, ha sido un objetivo establecer sistemas con bajos impactos ambientales mediante la utilización de fuentes de energía renovables.



2. TECNOLOGÍA PROPUESTA

2. TECNOLOGÍA PROPUESTA.

En primer lugar, parece obligado explicar en qué consiste la Tecnología Aeróbica Granular Secuencial y su aplicación concreta al tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con nitratos. En este sentido, esta tecnología basa su funcionamiento en el uso de microorganismos desnitrificantes heterotróficos para la eliminación de compuestos nitrogenados, aunque a diferencia de otros sistemas biológicos desnitrificantes, como es el caso de los biofiltros, la tecnología granular permite la formación de agregados microbianos (gránulos) formados bajo ciertas condiciones hidrodinámicas en biorreactores secuenciales (SBR). Esta estructura granular determina una estratificación de las comunidades microbianas que los hacen idóneos para el proceso de desnitrificación biológica. Ello es debido a la estructura compacta del gránulo, que genera un gradiente de oxígeno decreciente desde el exterior hacia el interior de este. En la Figura 4, se muestra una fotografía de gránulos aeróbicos producidos en un reactor SBR durante el tratamiento de un agua subterránea contaminada con nitratos. Igualmente, en la Figura 4, se muestra la estratificación de un granulo aeróbico, donde se aprecian las distintas zonas aeróbicas, anóxicas y anaerobias y la ubicación de distintos procesos biológicos.

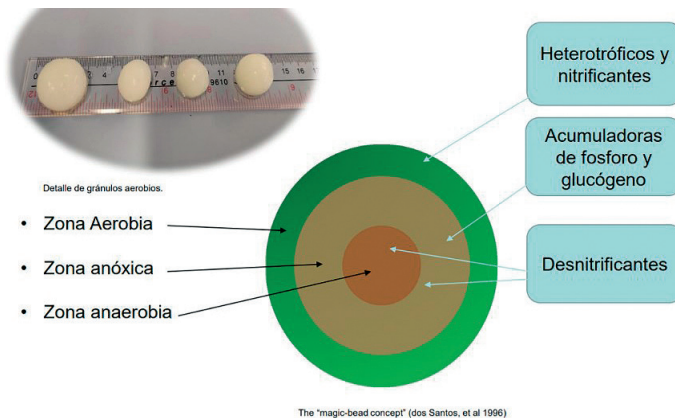


Figura 4: Detalle de las distintas zonas y procesos biológicos que ocurren en un gránulo aerobio.

La tecnología granular aeróbica, está fundamentalmente desarrollada para ser utilizada en reactores cilíndricos de base troncocónica que permiten un correcto movimiento y desarrollo de los microorganismos confinados en el interior de los biorreactores (Figura 5). Los reactores son aireados desde su base consiguiendo un correcto movimiento de los gránulos en el interior de este, tal como se muestra en la Figura 5. En el caso concreto de sistemas construidos para el tratamiento de aguas para su posterior consumo humano todos los materiales constructivos deben de respetar la normativa vigente en relación con tal aspecto. Evidentemente, el sistema será diseñado y construido en función de las necesidades de la población que se quiera abastecer y del caudal de agua que se necesite tratar.

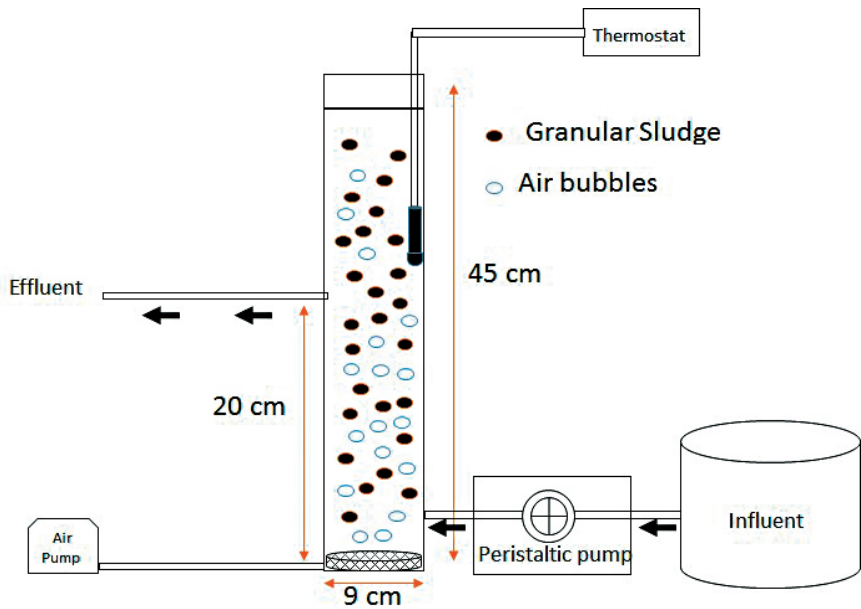


Figura 5: Diagrama de una planta SBR granular aeróbica donde se indican los principales elementos que componen esta tecnología (Muñoz-Palazon *et al.* 2018).

Como hemos mencionado con anterioridad, la desnitrificación que tiene lugar en los sistemas granulares aeróbicos es de naturaleza heterotrófica. Los microorganismos encargados de realizar el proceso de desnitrificación biológica han de tener en el agua una relación carbono-nitrógeno adecuada. En el caso del agua subterránea contaminada con nitratos, esta relación estaría desequilibrada por el exceso de nitrógeno. Es por ello que, para que se produzca el proceso en aguas oligotróficas –caso de las aguas subterráneas–, es necesaria la adición de una fuente de carbono externa, que permita conseguir una correcta relación carbono-nitrógeno y, de esta manera, un eficiente proceso de desnitrificación.

Con carácter general, las fuentes de carbono más comúnmente utilizadas en sistemas biológicos para la eliminación de nitratos son el metanol y el acetato. En el caso concreto de nuestra propuesta, después de una amplia experimentación, se seleccionó el acetato sódico de calidad alimentaria, estableciéndose como adecuada la relación C/N 1/1.

Composición de la solución de nutrientes.

Para que se produzca de forma correcta el proceso de desnitrificación biológica en un agua con las características antes mencionadas, es necesaria la adición de una fuente de carbono orgánica y una serie de sales minerales en muy bajas concentraciones. En nuestro caso, hemos establecido, después de una extensa investigación, una composición de compuestos que, adicionados al agua subterránea, permite que la desnitrificación tenga lugar de forma muy eficaz (Tabla 1).

REACTIVO	CANTIDAD (mg/L)
Acetato de sodio Anhidro ($C_2H_3NaO_2$)	100
Magnesio sulfato heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	7
Dipotasio hidrógeno fosfato (K_2HPO_4)	7,2
Monopotasio hidrógeno fosfato (KH_2PO_4)	2,1
Cloruro de potasio (KCl)	3,1

Tabla 1: Composición del suplemento nutricional adicionado a un agua subterránea para que pueda desarrollarse de forma adecuada un proceso de desnitrificación heterotrófica.

La cantidad de materia orgánica y sales que se adicione al agua subterránea puede sufrir modificaciones en función de la concentración de nitrato en el agua y en general de la composición mineral que posea la masa de agua a tratar. Es por ello por lo que el agua a tratar debe ser previamente caracterizada en relación con su posible concentración de nitratos, materia orgánica y composición mineral, de forma que se mantenga la relación C/N en 1/1 y las concentraciones de oligoelementos se encuentren en márgenes idóneos para el crecimiento microbiano.

La relación C/N resulta de especial importancia en los procesos de desnitrificación heterotrófica, ya que los microorganismos desnitrificantes consumen de forma simultánea nitrato y materia orgánica. Si este equilibrio se rompe se producirán fallos en el sistema, bien inhibiéndose la correcta eliminación del nitrato, si la cantidad de materia orgánica es insuficiente, o generándose en el agua tratada un exceso de materia orgánica que a todas luces es indeseable.

Como se puede observar en la Tabla 1, en nuestro suplemento nutricional se utilizó acetato sódico de calidad alimentaria como fuente de carbono.

La selección de este compuesto fue objeto de una amplia experimentación previa, estableciéndose la idoneidad de esta sustancia en base a que su coste es muy bajo y, lo que es más importante, debido a que su uso no supone ningún riesgo para la salud. Además, cabe destacar cómo la materia orgánica utilizada en el proceso es consumida de forma eficiente por la comunidad microbiana presente en los biorreactores, alcanzándose valores de consumo prácticamente del 100% una vez el sistema alcanza la estabilidad (Figura 21). En cuanto al resto de los componentes, que son sales minerales a muy bajas concentraciones, todas ellas poseen calidad alimentaria.

		VOLUMEN DEL BIORREACTOR (L)
REACTIVO	CANTIDAD A APLICAR (mg)	
<i>Acetato de sodio Anhidro</i> (C ₂ H ₃ NaO ₂)		
<i>Magnesio sulfato heptahidratado</i> (MgSO ₄ *7H ₂ O)		
<i>Dipotasio hidrógeno fosfato</i> (K ₂ HPO ₄)		
<i>Monopotasio hidrógeno fosfato</i> (KH ₂ PO ₄)		
<i>Cloruro de potasio</i> (KCl)		

Figura 6: Ejemplo de hoja de trabajo para el operario.



3. INFRAESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO

3. DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y SU FUNCIONAMIENTO.

A continuación, se procederá a describir los principales elementos que componen la planta granular aeróbica ubicada en la localidad de Torre Cardela para la eliminación de nitrato en agua subterránea (Figura 7). Igualmente, se realizará una descripción de los parámetros de diseño y operación.

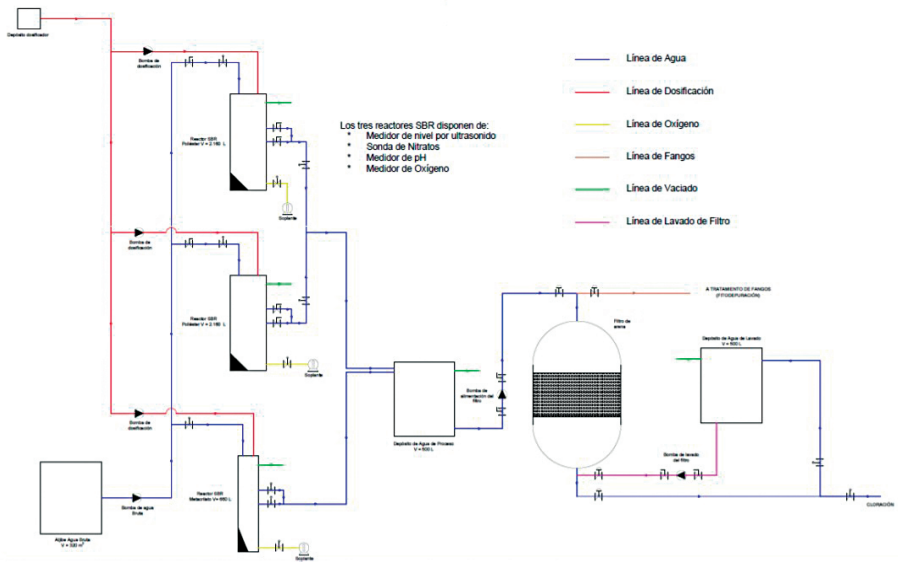


Figura 7. Esquema de la planta experimental SBR granular aeróbica para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con nitrato.

3.1. Descripción de la instalación.

El sistema está diseñado y construido en base al modelo de laboratorio mostrado en la Figura 5, pero adaptando las dimensiones en función de la cantidad de agua que se desee tratar, respetando en todo momento la relación altura-diámetro.

El sistema está formado por un conjunto de 3 reactores cilíndricos de base troncocónica conectados en paralelo y operando de forma secuencial en ciclos. El mantenimiento de esta relación altura volumen es muy importante, ya que deseamos conseguir reactores con morfología cilíndrica para un correcto funcionamiento y un óptimo movimiento de la biomasa en el interior de estos. Concretamente, en nuestra instalación se construyó un reactor de 660 L de capacidad con una altura de 4 metros y un diámetro de 0,5 metros, así como dos reactores de 2.163 L de capacidad con una altura de 3 metros y un diámetro de 1 metro.

Otro parámetro de diseño en los reactores es la morfología de la base. Esta ha de ser troncocónica con el difusor centrado en uno de los laterales para conseguir un adecuado movimiento hidrodinámico de los gránulos en el interior de este, tal y como se muestra en la Figura 8.

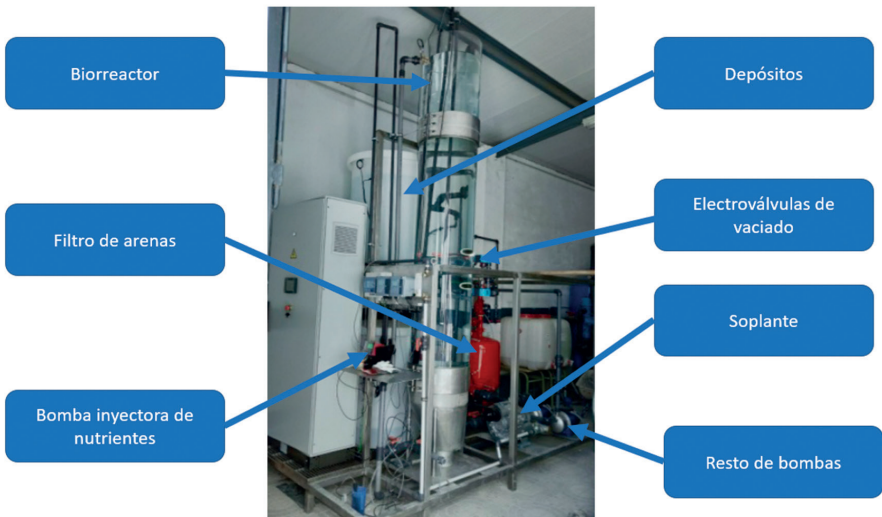


Figura 8. Visión general de la instalación donde se puede observar la base troncocónica de los reactores.

El diseño y dimensionamiento del sistema de dosificación del complemento nutricional también debe considerarse como una parte esencial del sistema. Para ello, mediante una bomba inyectora, se suplementa de forma continua a los reactores desde un depósito externo que contiene una solución concentrada, tanto la fuente de carbono como de sales minerales en cantidad suficiente para alcanzar los valores descritos en la Tabla 1.

La instalación construida ha sido diseñada de forma modular, lo que permite poder adicionar tantos reactores como sea necesario para suplir las necesidades de agua. Por tanto, se trata de un sistema con una alta versatilidad, es decir, se puede modificar tanto el tamaño de los reactores como el número de estos en función de la cantidad de agua que se desee tratar y del espacio disponible en las instalaciones. Actualmente, como ya hemos mencionado, la instalación cuenta con tres reactores, de 660 L (1 reactor) y 2.163 L (2 reactores) de capacidad, aunque sería posible la construcción de otras unidades si fuera necesario.

3.2. Componentes de la instalación.

La estación depuradora de aguas potables está compuesta por los siguientes elementos principales:

- **Biorreactores:** Se trata de depósitos cilíndricos con base troncocónica con un volumen de 660 L (un biorreactor) y 2.163 L (dos biorreactores), en los cuales la aireación se realiza desde la parte inferior a través de un difusor de burbuja fina. Los reactores son llenados con el agua a tratar por su parte superior. Poseen una abertura en una determinada cota (50% o 60% del volumen) del biorreactor que permite vaciar el volumen estipulado de agua del biorreactor en función de las condiciones de operación que se deseen implantar en el sistema. También poseen diferentes sondas de medición (oxígeno disuelto,

nitratos, amonio, pH, temperatura y potencial redox) situadas en la parte superior del biorreactor, tal como se muestra en la Figura 9.



Figura 9: Detalle de las sondas y sistemas de medición en uno de los biorreactores.

■ **Depósitos intermedios:** La instalación posee dos depósitos intermedios para la realización de las operaciones de vaciado y filtrado de los biorreactores. El agua tratada, una vez finalizado el tiempo estipulado y necesario para que se produzca la separación física del agua y la biomasa por decantación dentro de los biorreactores, pasa a un depósito donde se va acumulando para ser filtrada a continuación. El segundo depósito es similar al primero y es donde se acumula el agua filtrada, manteniendo siempre una cantidad necesaria para las operaciones de limpieza del sistema de filtración (Figura 10).



Figura 10: Depósito 500 L para el almacenamiento del agua tratada.

- **Depósito de almacenamiento de nutrientes:** La instalación ha de poseer un depósito de almacenamiento de nutrientes, con tapa hermética y dotado de un sistema mecánico de agitación, con el fin de preparar la solución de nutrientes en su interior y dosificarla desde él a cada uno de los reactores al inicio de cada ciclo de operación (Figura 11).



Figura 11: Depósito para el almacenamiento de nutrientes.

- **Filtro de vidrio reciclado:** Tras el proceso de decantación de la biomasa granular en los biorreactores, el agua puede contener pequeñas partículas que han escapado de la etapa de decantación anterior y que han de ser eliminadas mediante la filtración. Es por ello que la instalación cuenta con un filtro de vidrio reciclado (Figura 12).



Figura 12. Sistema de filtración, mediante un filtro de vidrio reciclado.

- **Soplantes:** El sistema posee un sistema de aireación capaz de producir el movimiento completo de toda la columna de agua para mantener la biomasa en suspensión durante la etapa de aireación. Los aireadores se encuentran localizados en la parte inferior troncocónica de los reactores.
- **Bombas:** La planta posee un conjunto de bombas que junto a las soplantes hacen posible las distintas operaciones de la instalación, como es el caso de llenado de los biorreactores, o la operación de filtración.

- **Bombas de alimentación:** El sistema posee tres bombas inyectoras mediante las cuales es suministrado el complemento de nutrientes a cada uno de los biorreactores, desde el tanque de almacenamiento de la solución de nutrientes (Figura 13).



Figura 13: Bomba inyectora dosificadora de reactivos.

- **Conducciones y válvulas:** La instalación posee una serie de válvulas conectadas al sistema automático de control que controlan los vaciados y llenados del sistema, así como el resto de las canalizaciones y conducciones entre los distintos elementos de la instalación.
- **Sistema de control:** Toda la planta se mantiene en funcionamiento gracias a un sistema de control automatizado que regula todos los tiempos y etapas de la instalación, permitiendo su funcionamiento autónomo, así como un telecontrol del proceso a distancia (Figura 14). Este sistema de control también posee las medidas de seguridad necesarias para que no se produzcan vaciados accidentales de los biorreactores.



Figura 14: Sistema de control de la instalación.

- Sistema de fitodepuración:** La instalación no produce ningún tipo de corriente de rechazo, pero el sistema de filtración por vidrio reciclado ha de ser limpiado de forma periódica, realizando las pertinentes operaciones de contra lavado. Este proceso genera una pequeña cantidad de fango que ha de ser tratada por un pequeño humedal instalado a las afueras de la planta de tratamiento (Figura 15).



Figura 15: Sistema de fitodepuración.

3.3. Inoculación de la instalación.

Una vez diseñada y construida la instalación, se procede a realizar la inoculación con la biomasa granular previamente formada, con el objeto de favorecer la rápida puesta en marcha del sistema. Concretamente, cada uno de los reactores granulares actualmente instalados fueron inoculados con 6 L de gránulos maduros previamente formados en el Instituto de Investigación del Agua de la Universidad de Granada.

Tras la inoculación hay que seguir una serie de premisas durante los primeros 15 días para lograr el óptimo crecimiento de la biomasa hasta alcanzar la estabilidad del sistema (Hurtado-Martinez *et al.*, 2021).

- 1. Tiempo de decantación:** Tras la inoculación, y con el objetivo de no perder biomasa y lograr un rápido crecimiento de la cantidad de gránulos en el sistema, la velocidad de decantación ha de ser de 10 minutos durante los 3 primeros días, 7 minutos durante los próximos 7 días, 5 minutos durante los próximos 5 días, y finalmente reducirla hasta los 3 minutos, valor establecido para el sistema.
- 2. Cantidad de materia orgánica:** Durante la primera semana de operación es conveniente adicionar el doble de materia orgánica de la necesaria por el sistema, para lograr un fuerte crecimiento de la biomasa recién inoculada.

A continuación, se realizará una bajada de la materia orgánica del 25% en la segunda semana de operación y otra bajada del 25% la tercera semana, alcanzando la concentración de materia orgánica de 100 mg/L de acetato sódico en la cuarta semana de operación.

Siguiendo la estrategia anterior se puede poner en funcionamiento el sistema en aproximadamente un mes de operación, dependiendo del volumen del mismo y de las condiciones de la zona. No obstante, han

de establecerse los rendimientos adecuados de eliminación de materia orgánica y nitratos adecuados antes de poner la instalación en su estado de estabilidad. Una vez alcanzada la misma, se puede considerar que el sistema está listo para su operación.

3.4. Funcionamiento de la instalación.

La instalación basa su funcionamiento en el seguimiento de una secuencia cíclica de operación, en la cual el sistema va pasando por una serie de etapas de funcionamiento para lograr un correcto proceso de eliminación de nitratos. A este proceso se le denomina ciclo de operación del sistema.

Cabe destacar el funcionamiento del sistema en paralelo. Así, el sistema funciona de forma modular con distintos reactores en paralelo, de tal modo que pueden estar operando los diferentes reactores en una etapa distinta del ciclo de operación, con lo cual la producción de agua tratada no se ve interrumpida. Es decir, un reactor puede estar aireando, mientras otro está en la etapa de vaciado, y así con todas las combinaciones posibles.

El sistema funciona de forma secuencial por etapas que están basadas en el tiempo de retención hidráulica del mismo, es decir, el tiempo que tarda en renovarse toda el agua del reactor. Este tiempo es determinado en función de las características del agua a tratar, y fundamentalmente del nivel de nitratos que posea el agua.

El sistema funciona siguiendo una serie de etapas que se detallan a continuación (ciclos de operación):

1. Etapa de llenado.

En ella los biorreactores son llenados con agua bruta procedente de las captaciones de suministro por la parte superior de los biorreactores. Este llenado está controlado por el sistema informático de la instalación, el

cual controla tanto las electroválvulas de llenado, así como la bomba de alimentación de agua y los sensores de nivel de los biorreactores. Todos estos elementos se sincronizan de manera automática para lograr un óptimo proceso de llenado (Figura 16).

El llenado es controlado de forma automática mediante la instalación de sensores de ultrasonidos que detectan de forma automática cuándo el reactor está lleno para evitar un derrame. Durante esta etapa, el reactor contiene entre un 40% y un 50% de volumen de agua del ciclo anterior, conjuntamente con la biomasa granular decantada, tal como se esquematiza en la Figura 16.

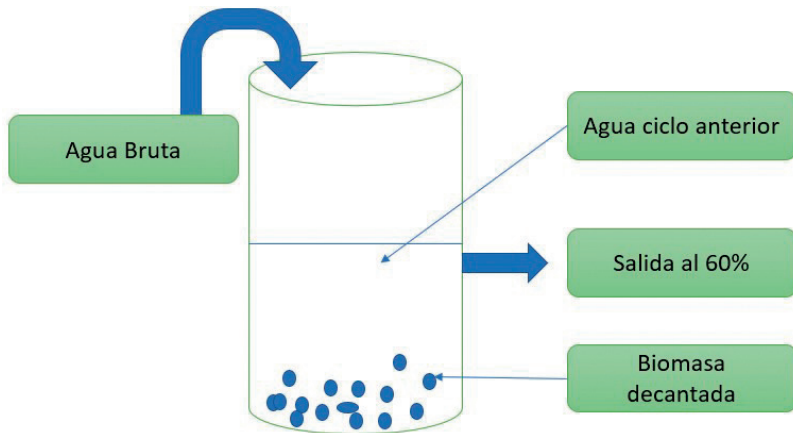


Figura 16: Etapa de llenado.

2. Etapa de aireación.

Tras el llenado de los biorreactores da comienzo de forma automática la etapa de aireación. En ella, el biorreactor es aireado desde su parte inferior por medio de un difusor de burbuja fina conectado a un sistema de aireación mediante una soplante. La soplante, al ser activada, produce la resuspensión de la biomasa decantada en el fondo del biorreactor, y a su

vez activa el sistema automático de dosificación de nutrientes para que se produzca una mezcla efectiva de estos en el interior del biorreactor (Figura 17).

Esta etapa tendrá una duración determinada en función de las condiciones del agua que se pretende tratar, y en ella se mantienen en contacto aire y agua a tratar, biomasa y nutrientes durante un tiempo estipulado. Para el caso de la planta real ubicada en Torre Cardela, este tiempo se estipuló en 2 horas, tiempo necesario para que se consuman en su totalidad los nutrientes adicionados, y se produzca una efectiva eliminación de los compuestos nitrogenados.

Como hemos indicado con anterioridad, la duración de esta etapa podrá ser modificada en función de las características que posea nuestra agua a tratar. En el caso de estudio que nos ocupa, el agua subterránea posee una concentración de nitratos no superior a los 60 mg/L. Es por ello por lo que las condiciones de operación (ciclos de 2 horas) se ajustaron a los valores anteriormente mencionados. Para el caso de agua que posea más cantidad de nitratos, este tiempo ha de ser modificado, así como la cantidad de nutrientes adicionados para que el sistema mantenga un correcto equilibrio.

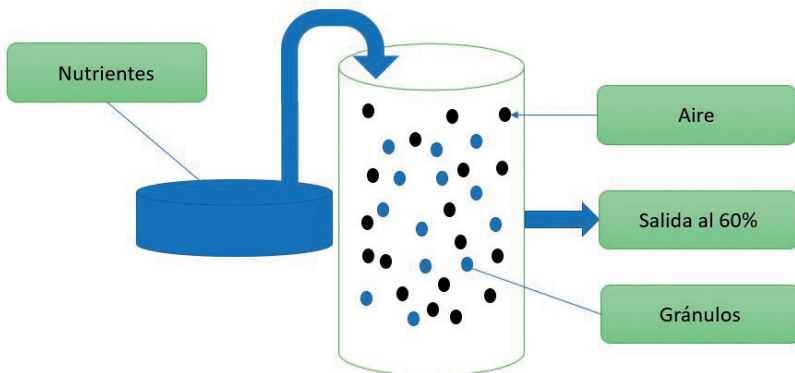


Figura 17: Esquema de la etapa de aireación.

3. Etapa de decantación.

Transcurrido el tiempo estipulado de aireación, esta se detiene y la biomasa granular decanta al fondo del biorreactor o biorreactores, produciéndose una separación física entre el agua y la biomasa.

Para el caso de nuestro sistema, este tiempo fue estipulado en 3 min, tiempo más que suficiente para producir una eficiente separación entre agua y biomasa granular. Este tiempo de decantación depende de cuan densa sea la biomasa granular. Cuanto más densa sea, mayor velocidad de decantación tendrá y menor podrá ser este tiempo.

Es muy importante dejar el tiempo justo de decantación en el sistema, ya que si este es demasiado corto corremos el riesgo de perder parte de la biomasa granular en la etapa de vaciado, y si este es demasiado amplio se puede producir una deficiente eliminación de los microorganismos filamentosos, que interfieren en el proceso de formación de los gránulos y causan una desestabilización del sistema.

En la Figura 18 se puede observar un esquema de la separación física que se produce en esta etapa entre el agua y la biomasa.

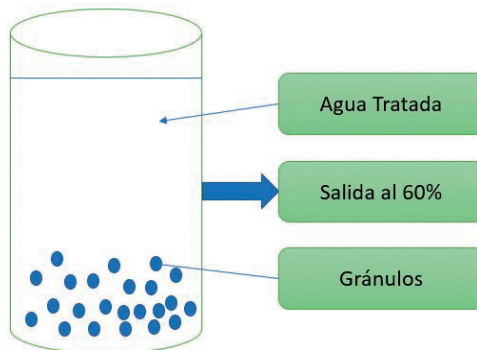


Figura 18: Esquema de la etapa de decantación.

4. Etapa de vaciado.

Una vez concluido el tiempo de decantación estipulado, necesario para la separación física entre agua y biomasa, el sistema de control realiza la apertura de la electroválvula de vaciado del biorreactor, produciéndose la descarga del agua tratada hacia el depósito previo a la filtración. Los biorreactores están diseñados con dos salidas, una al 60% del volumen total del biorreactor y otra al 50%. En el sistema estudiado, se ha comprobado que utilizando la salida al 60% del volumen total se producen buenos resultados, y permite tratar un 10% más de agua en cada ciclo operacional. Cabe resaltar que en este sistema el volumen operacional por ciclo no es el 100% del volumen del reactor, ya que parte del agua se conserva dentro del reactor junto con la biomasa para seguir tratando agua en el siguiente ciclo. Esto se consigue situando la salida del biorreactor a una determinada cota, salvando el agua y la biomasa que queda por debajo de dicha cota en cada ciclo de vaciado, tal y como se esquematiza en la Figura 19.

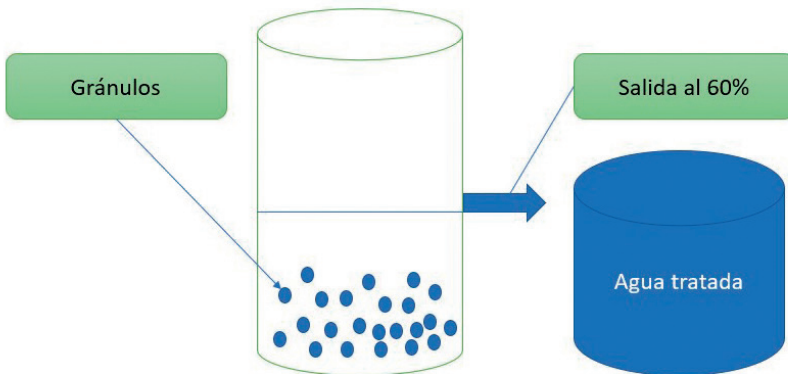


Figura 19: Esquema de la etapa de vaciado.

5. Etapa de filtración y desinfección.

Conjuntamente a la etapa de vaciado se produce la filtración de agua de salida por medio de un filtro de vidrio reciclado y su desinfección con hipoclorito de sodio antes de ser vertida a la red. Una vez concluida la etapa de vaciado, da comienzo un nuevo ciclo de operación en el biorreactor, iniciándose de nuevo la etapa de llenado.



Figura 20: Bombas inyectoras de nutrientes y medidores multiparamétricos.



4. RESULTADOS OBTENIDOS

4. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PLANTA.

A continuación, se muestran los resultados alcanzados durante la fase de monitorización de los biorreactores.

4.1. Consumo de materia orgánica en los biorreactores.

Para que se produzca el adecuado proceso de desnitrificación biológica en aguas potables contaminadas con nitratos, es necesaria una correcta relación de carbono-nitrógeno en las mismas. Debido al carácter oligotrófico del agua subterránea contaminada, es necesaria la adición de una fuente de carbono, con lo cual una fuente de carbono externa ha de ser adicionada.

Diferentes fuentes de carbono fueron probadas en el sistema, llegando a la conclusión de que el acetato de sodio de calidad alimentaria poseía tanto las mejores características para el microorganismo, así como de transporte y almacenamiento.

En la Figura 21 podemos observar la capacidad del sistema para eliminar la materia orgánica adicionada durante el proceso de desnitrificación heterotrófica. Se puede comprobar cómo el rendimiento va aumentando desde la inoculación del sistema con gránulos desnitrificantes hasta que alcanza condiciones de estabilidad, en las cuales ya estaría listo para tratar agua sin que se produzca salida de materia orgánica en el agua tratada.

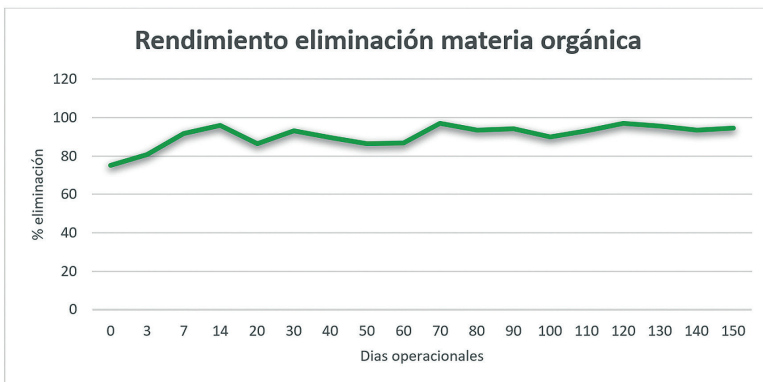


Figura 21: Rendimiento de eliminación de materia orgánica del sistema durante 150 días de operación.

4.2. Análisis de la cantidad de biomasa presente en el sistema y proceso de granulación.

Los biorreactores fueron inoculados con gránulos desnitrificantes, observándose un aumento de la biomasa hasta alcanzar unas condiciones de estabilidad y una concentración entre 0,2 y 0,25 g/L, detectándose cómo el sistema es capaz de autorregularse, con lo cual no es necesaria la nueva adición de gránulos o la retirada de exceso de estos del interior del sistema, salvo que ocurra algún tipo de accidente en la operación de este.

El tamaño de los gránulos también fue medido a lo largo del proceso para determinar si estos sufrían algún tipo de cambio morfológico durante el tiempo de operación, consiguiéndose un tamaño medio de gránulo en torno a los 7 mm una vez alcanzada la estabilidad del sistema.

Junto al tamaño, la velocidad de decantación de la biomasa granular también fue medida. Este parámetro es muy importante en este tipo de sistema, ya que nos informa cuan densa es la biomasa. Cuanto más densa es la biomasa, más rápido decanta al fondo de los biorreactores y más efectiva es la separación entre agua y biomasa, consiguiéndose un mayor gradiente de oxígeno en el interior del gránulo y haciendo más efectivo el proceso de eliminación de nitratos.

4.3. Eliminación de nitratos.

El objetivo principal de esta tecnología es la eliminación de los compuestos nitrogenados de las aguas de consumo humano, en especial nos centramos en el nitrato. Este se encuentra en exceso en multitud de acuíferos de España, Europa y del mundo en general, de ahí la importancia de lograr tecnologías que sean capaces de eliminarlo, generando un mínimo impacto ambiental.

Este sistema biológico logra buenos rendimientos de eliminación de nitrato, consiguiendo producir un agua de salida con una media de 20 – 25 mg/L de nitrato como se muestra en la Figura 19, partiendo de un agua con 60 mg/L de nitrato, con lo cual logra rendimientos de eliminación superiores al 60% (Figura 22).

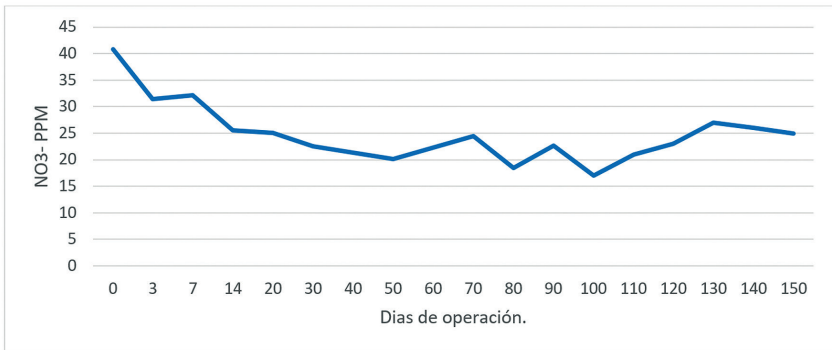


Figura 22: Concentración de nitrato en el agua tratada.

Esta reducción en los valores de nitrato nos permite realizar procesos de mezcla con el agua bruta sin tratar, logrando los valores de nitrato recomendados por la legislación sin la necesidad de tratar toda el agua que va a consumir la población por el sistema, con el consiguiente ahorro de reactivos y energía.



5. DIMENSIÓN DE LA PLANTA

5. ORIENTACIONES PARA DIMENSIONAR UNA PLANTA.

Para lograr un óptimo funcionamiento de una tecnología biológica mediante el uso de Sistemas Aeróbicos Granulares Secuenciales, es muy importante el diseño de los biorreactores, así como los parámetros operacionales del sistema. Como consecuencia de la naturaleza modular de la instalación, se permite modificar multitud de parámetros en función de las necesidades del lugar en el que se pretende instalar la tecnología.

A continuación, se muestran una serie de pasos resumidos en los que se indican las etapas que se deben seguir a la hora de decidir implantar dicha tecnología en un determinado lugar:

1. Caracterización del agua a tratar y comportamiento del acuífero.

En primer lugar, hay que conocer muy bien las características del agua a tratar, realizando las pertinentes analíticas a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente largo, para conocer cómo se comportan los nitratos en la masa de agua que pretende ser tratada. Es muy importante saber si estos niveles de nitratos se mantienen dentro de unos límites, si se mantienen constantes, o si estos niveles se ven modificados con los ciclos de precipitación anuales.

Para saber cómo se comportarán los nitratos en nuestra masa de agua se debe conocer el comportamiento del sistema hídrico de la zona. Es conveniente estudiar el comportamiento del acuífero a lo largo de distintas épocas del año. Esto nos permitirá saber los ciclos de recarga que posee, así como la naturaleza de los materiales que lo forman. Algunos acuíferos poseen una porosidad elevada, y esto se traduce en picos de contaminación puntual tras una precipitación intensa que produce un lavado de los contaminantes de forma muy rápida, mientras que otros

poseen una porosidad menor y, en consecuencia, una velocidad de movimiento del agua más lenta que atenúa estos picos de contaminación.

Para determinar la cantidad media de nitratos que posee la masa de agua, así como su comportamiento en distintos meses del año, se ha de realizar un muestreo periódico en distintos puntos para conocer dicha información.

2. Cálculo del caudal de agua.

Como paso previo a la construcción de una instalación es fundamental conocer la **cantidad de agua que se necesita** para el abastecimiento a una determinada población. Una vez conocido el caudal objetivo podemos comenzar a calcular el volumen necesario que ha de tener la instalación.

Para el caso de la planta instalada en la población de Torre Cardela (Granada), se pretende dar suministro a 500 habitantes, con una dotación de abastecimiento de 132 L por habitante/día. Conocido este dato, la dotación que necesitamos conseguir para el municipio, en este caso, es de 66.000 L/día.

También debemos conocer **el valor de nitratos que posee el agua a tratar** y establecer la eficiencia de eliminación, pudiéndose realizar una mezcla de agua tratada con agua bruta en la relación adecuada para conseguir un agua de abastecimiento que cumpla con la normativa vigente.

3. Cálculo de la cantidad de nutrientes por ciclo de operación.

Una vez conocido el nivel de nitratos que posee la masa de agua en cuestión, podemos establecer una estrategia de administración de

nutrientes en función de la cantidad de nitratos presentes en la misma, manteniendo en todo caso la relación carbono nitrógeno 1:1. Esto se traduce en que, si el agua posee más nitratos que la utilizada en nuestro estudio, la cantidad de carbono ha de aumentarse de forma proporcional y si posee unos niveles inferiores podría ser modificada la cantidad de nutrientes suministrada.

Para administrar esos nutrientes nos basamos en la tabla 1 mostrada en apartados anteriores de este documento, donde se expresa la cantidad de materia orgánica y sales minerales necesarios por el sistema por litro de agua tratada.

Con ello calcularíamos la cantidad de agua que trataría la planta por día y procederíamos a realizar la disolución de las sales minerales en el depósito de almacenamiento y distribución, diseñado para tal fin.

4. Preparación de la solución de nutrientes.

Para preparar la solución de nutrientes hay que seguir los pasos indicados en la siguiente figura:



En primer lugar, hay que saber el volumen de agua que trata por día el sistema completo de desnitrificación biológica. Para ello debemos tener en cuenta el número de reactores que posee nuestra instalación, así como el volumen tratado por ciclo y el número de ciclos que realizan al día dichos reactores, en función del tiempo de operación estipulado. Con todos estos datos se podrá establecer la producción diaria de agua de nuestra instalación.

Conocido ese valor y con la tabla mostrada en apartados anteriores, se puede calcular la cantidad de sales necesarias para un día de operación, multiplicándose ese valor por el número de días para los cuales se desee preparar dicha solución.

A continuación, ha de calcularse la concentración a la cual se va a preparar la solución de sales. Esta debe estar concentrada en un volumen de agua menor por razones de operación. Para la planta actualmente instalada, la concentración de la solución es tal que 1 L de dicha solución concentrada, sirviendo para tratar 188,75 litros de agua bruta. Conocido este dato y el volumen operacional por cada ciclo de los biorreactores, podremos ajustar el tiempo de dosificación de reactivos por parte de la bomba inyectora, en función del caudal impuesto a ella.



5. Diseño de los reactores y demás equipos de la instalación.

Una vez conocida la cantidad de agua que necesitamos tratar por día, se debe de proceder al dimensionamiento de los biorreactores. En este sentido, cabe destacar la alta versatilidad que posee este tipo de sistema, ya que los reactores se pueden dimensionar de distintos tamaños en función de las características que posea la instalación, siempre respetándose la proporción entre anchura del reactor y altura para conseguir una eficiente granulación.

La planta ubicada en Torre Cardela posee dos tipos de reactores distintos, fabricados en distintos materiales.

Un reactor fue construido en acero y metacrilato para observar el correcto proceso de granulación, tal como se muestra en la Figura 23. Los reactores instalados posteriormente fueron de un volumen mayor y en un material de más fácil manejo que el metacrilato (poliéster con fibra de vidrio), pero respetando en todo caso la morfología troncocónica de la base para conseguir el óptimo proceso de granulación (Figura 24).

Esta es una de las principales ventajas del sistema, ya que al ser modular nos permite replicar y colocar en paralelo tantos reactores como sean necesarios para el proceso, así como ampliar o disminuir el número de estos en función del desarrollo de la población.

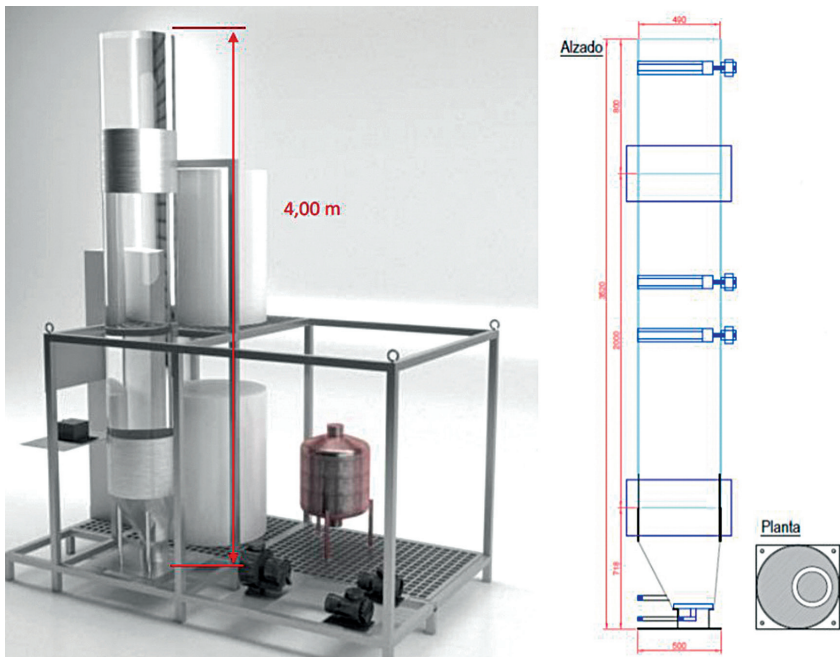


Figura 23: Biorreactor construido en metacrilato.

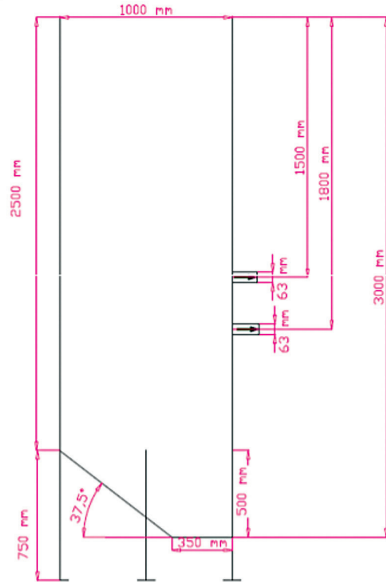


Figura 24: Biorreactores construidos en poliéster-fibra de vidrio.

Una vez se han diseñado los biorreactores, ha de construirse el **sistema de aireación** que permita el establecimiento de la corriente hidrodinámica que a su vez permita la granulación. Este es realizado con una o varias soplantes en función del número de biorreactores que se instalen. El caudal de aire debe ser lo suficientemente elevado para asegurarnos un óptimo movimiento turbulento de toda la columna de agua.

El **sistema de filtración** también ha de ser diseñado y escalado, con un tamaño suficiente para tratar el caudal de salida de los biorreactores. En este punto, ha de preverse la instalación de dos tanques de almacenamiento, uno para el agua bruta de salida de los biorreactores, y otro para el agua tratada de los biorreactores. El depósito de agua bruta tiene la función de almacenar el agua mientras se va filtrando, permitiendo el funcionamiento en paralelo de varios equipos. Por su parte, el tanque post filtrado tiene el objetivo de almacenar agua en su interior para proceder a las operaciones de limpieza del sistema de filtración.

El **sistema de desinfección** posee el objetivo de asegurar la total ausencia de microorganismos viables en el agua de salida. Para este proceso se ha previsto un sistema de desinfección a la salida de los biorreactores, que actuará de forma conjunta con el sistema de filtración para lograr un óptimo tratamiento del agua.

Con el objetivo de conseguir menos emisiones de gases de efecto invernadero, se ha contemplado la instalación de un sistema de **abastecimiento energético** consistente en energía solar fotovoltaica (Figura 25) para el funcionamiento de las instalaciones. En esta misma línea, también se contempla la instalación de un pequeño **humedal artificial** para el tratamiento de los lodos procedentes de la limpieza del sistema de filtración. Este sistema es de dimensiones muy reducidas debido al bajo volumen de lodos producido por esta instalación, que ha de ser escalado en función del volumen de agua que ha de tratar la instalación en cuestión.



Figura 25: Instalación fotovoltaica para abastecimiento de las instalaciones.

Cabe destacar las obras de ingeniería civil necesarias para la construcción de depósitos de abastecimiento para las instalaciones, en el caso de instalaciones nuevas, o la adaptación de los existentes en el caso de instalaciones ya construidas previamente y donde se pretende instalar el sistema.



6. TAREAS DE MANTENIMIENTO

6. TAREAS DE MANTENIMIENTO.

El sistema de tratamiento biológico descrito en esta guía requiere muy poco mantenimiento, pero han de realizarse ciertas operaciones en los equipos, que se detallan a continuación.

1 Limpieza de las sondas y sensores.

El sistema posee una serie de sondas y sensores de medición, anteriormente mencionados, situados en la parte superior de cada uno de los reactores y en el depósito del agua municipal para determinación de los nitratos en línea. También posee sensores de caudal a la salida de los distintos biorreactores y demás elementos de seguridad del sistema. Estas sondas nos dan información a tiempo real de la cantidad de nitratos presentes tanto en el depósito municipal como en cada uno de los reactores. Junto a ellas, se encuentran instaladas otro tipo de sondas que nos dan información complementaria, como es el caso del pH y oxígeno disuelto.

Estas sondas están en contacto con el agua y la biomasa granular, en el caso de las situadas en el interior de los biorreactores. Debido a ello, pueden acumular biopelícula microbiana y demás incrustaciones que interfieren en el óptimo funcionamiento. Por ello, han de ser limpiadas y calibradas de forma periódica siguiendo las indicaciones establecidas por el fabricante para cada una de ellas. Junto a las sondas, es muy importante realizar una revisión periódica de los caudalímetros que miden el agua de salida de cada biorreactor, ya que no solamente se trata de elementos informativos, sino que forman parte del sistema de seguridad de la instalación para evitar el vaciado accidental de los biorreactores. Por ello, deben estar limpios y calibrados para que, en caso de salida accidental del agua, inmediatamente paren el sistema para evitar pérdidas de biomasa.

Junto a esta limpieza se realizará un calibrado y sustitución de los sensores de medición si se encontraran estropeados. Para ello, se deben consultar los manuales del fabricante.

2 Mantenimiento de las electroválvulas de llenado y vaciado.

Este es un elemento de vital importancia en el sistema, por ello ha de ser prestada una elevada atención a su correcto funcionamiento. Estos equipos controlan cuándo se vacía o llena el biorreactor y han de tener un adecuado mantenimiento para evitar fallos. Han de seguirse las instrucciones del fabricante para su limpieza y mantenimiento, así como su sustitución cuando se encuentren estropeadas.

3 Limpieza de tanques de almacenamiento y depósitos intermedios.

La planta posee dos depósitos intermedios de 500 L de capacidad, así como otro depósito de 1.000 L para el almacenamiento de las sales minerales y un depósito de almacenamiento de hipoclorito de sodio para la desinfección post filtrado.

El depósito de 500 L previo al sistema de filtrado recibe el agua de salida de los biorreactores sin filtrar, por lo que pueden acumularse partículas e incrustaciones, siendo conveniente realizar una limpieza de este cada 15 días con una solución de hipoclorito y agua a presión.

El depósito de 500 L post filtrado recibe el agua filtrada y desinfectada lista para su uso, por lo tanto, no suele presentar incrustaciones pero, aun así, ha de limpiarse y desinfectarse cada 15 días con una solución de hipoclorito y agua a presión, de igual forma que el depósito previo a la filtración.

El depósito de almacenamiento de nutrientes es el encargado de almacenar la solución de nutrientes de la cual se abastece el sistema. Se trata de un depósito hermético perfectamente cerrado para evitar el crecimiento de microorganismos en su interior. Debe de limpiarse una vez por semana con una solución de hipoclorito de sodio y agua a presión, asegurándose de eliminar todos los restos de hipoclorito antes de verter de nuevo la solución de nutrientes en su interior.

El depósito de almacenamiento del desinfectante es usado para su desinfección automática, conteniendo una solución de hipoclorito de sodio. Es recomendable su limpieza una vez al mes como medida de precaución.

4 Limpieza del sistema de filtración.

Este sistema es el encargado de eliminar las partículas que pueden escapar al proceso de decantación que ocurre en el interior de los biorreactores. Aunque el sistema posee una limpieza automática mediante un contra lavado de la arena, es conveniente realizar una desinfección interna del filtro según las indicaciones del fabricante, para evitar el crecimiento de microorganismos en el interior del material filtrante. También ha de ser sustituido el material filtrante de forma periódica siguiendo las indicaciones del fabricante.

5 Revisión y limpieza del difusor de aireación y soplantes.

El difusor situado en la base de los reactores ha de ser sustituido cuando finalice la vida útil establecida por el fabricante o cuando se detecte un cambio en la emisión de burbujas.

Junto al difusor, también han de ser revisadas las soplantes que suministran aire, siendo sustituidas o reparadas si se detecta una disminución del flujo de aire.

6 Revisión del sistema de dosificación.

El sistema de dosificación de nutrientes es fundamental para el correcto funcionamiento de la planta, por ello ha de revisarse de forma periódica comprobando que la dosificación añadida al reactor es la correcta, y procediendo a su calibrado si se detectan anomalías.

7 Medición de forma periódica de los nitratos a la salida de los biorreactores.

Aunque el sistema está dotado de sondas de medición de nitratos en línea, que mide este parámetro en continuo tanto a la entrada como a la salida de los biorreactores, es conveniente realizar mediciones de este parámetro una vez por semana, para corroborar que los datos arrojados por las sondas son los correctos. Si estos datos no fuesen correctos, se procederá al recalibrado de las sondas o a su sustitución si se encuentran estropeadas.

8 Control microbiológico.

Aunque el sistema posee todas las medidas de desinfección establecidas por la legislación, es conveniente realizar un análisis microbiológico de forma periódica para asegurar el correcto funcionamiento del sistema, siguiendo las indicaciones sanitarias en materia de agua potable.



Figura 26: Depósito de nutrientes y vista de la planta potabilizadora.



7. PROBLEMAS Y SOLUCIONES

7. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y SOLUCIONES ADOPTADAS.

Durante el desarrollo de esta experiencia han surgido problemas técnicos y de operación que nos han servido para aprender y mejorar las instalaciones y el proceso biológico de eliminación de nitratos.

Uno de los principales retos de este proyecto fueron las dimensiones físicas existentes en la instalación donde debía ser instalada la tecnología. Esta tecnología convive junto a un sistema de ósmosis inversa, sistema que se viene utilizando en la actualidad para eliminar los nitratos presentes en las aguas subterráneas del municipio. Ambos sistemas conviven en la misma instalación de dimensiones reducidas, junto al sistema de abastecimiento por energía solar de la nueva instalación. Esto supuso un importante reto a la hora de construir los reactores, ya que además del poco espacio físico disponible teníamos el problema del techo de la instalación que nos limitaba en altura. Por ello, a la hora de ampliar la planta para dar suministro al municipio para 500 habitantes, se optó por un diseño de reactores distinto al ya instalado de metacrilato. Si se instalaban réplicas de este reactor de metacrilato, el espacio necesario hubiera sido mayor, teniendo problemas para su implantación en el interior de la estructura existente. Por ello, se optó por un diseño de reactor de mayor volumen con un sistema de aireación adecuado y respetando la base troncocónica del mismo para lograr un óptimo movimiento de los gránulos en el interior de estos.

El segundo reto importante al que nos enfrentamos fue el fallo en una de las electroválvulas de salida que ocasionó la pérdida de la biomasa granular en uno de los biorreactores. Este fallo fue ocasionado por la apertura de la electroválvula de salida durante la fase de aireación sin esperar el tiempo de decantación necesario, con la consiguiente pérdida

de la biomasa que se encontraba en suspensión. Para evitar que este tipo de accidentes se repitiera de nuevo, se dotó al sistema informático de una serie de herramientas para evitar estos accidentes.

En primer lugar, se instaló la consigna de que la electroválvula de vaciado no se puede abrir hasta pasado un tiempo mínimo de decantación, con esto conseguimos que siempre exista un tiempo de retardo entre la orden de apertura de la electroválvula, y la apertura física de la misma.

El segundo elemento de seguridad fue la instalación de caudalímetros a la salida de los biorreactores. Este elemento nos permite detectar si se está produciendo la salida de agua en una etapa diferente a la del vaciado, o si el caudal de salida del reactor es anómalo, procediendo a la parada instantánea de este si algún parámetro es anómalo. Esto nos permite asegurar la biomasa para evitar su pérdida accidental.

Otra de las medidas implantadas en el sistema fue la identificación mediante contraseña de todo el personal que accede a la instalación, tanto de forma remota como en la pantalla existente en las instalaciones. Esto permite la rápida identificación del personal y evita que cualquier persona no autorizada modifique parámetros del sistema.

Todas estas medidas de telecontrol dotan a la instalación de la seguridad necesaria para evitar accidentes y pérdida de la biomasa granular de los biorreactores.

A pesar de las medidas de seguridad antes mencionadas, pueden producirse fallos físicos en el sistema, por ejemplo, la rotura de una electroválvula de salida que ocasione la pérdida de la biomasa. Por ello, el sistema está diseñado para operar con distintos reactores en paralelo, de tal modo que, si uno queda inutilizado por algún fallo, se pueden seguir usando el resto, y se puede usar parte de la biomasa de estos reactores para inocular de nuevo el que la ha perdido por un accidente. De este

modo siempre aseguramos que la instalación no se para por completo ante un posible fallo en alguno de los reactores.

Por último, nos centraremos en el abastecimiento energético de la instalación y los problemas que pueden surgir al respecto.

La actual planta posee un sistema de alimentación a través de energía solar, la cual recarga una serie de acumuladores instalados en las propias dependencias de la instalación, y que permiten el abastecimiento de los biorreactores. Este sistema consume poca cantidad de energía, pero aun así la necesita para su funcionamiento. Para asegurar que la instalación no detenga su producción, esta cuenta con un sistema de abastecimiento dual, es decir, se abastece de la energía procedente de las placas solares, pero no está desconectada de la red eléctrica de la zona, de tal modo que, si falla la energía solar, la planta automáticamente se conecta a la red eléctrica hasta que se resuelve el fallo. De este modo la instalación siempre cuenta con energía para su funcionamiento.

La purga del sistema no suele ser necesaria, ya que, debido a la naturaleza oligotrófica del agua potable y a la dosificación justa de reactivo, el sistema siempre se mantiene en un equilibrio y no se suele producir un exceso de biomasa. Aun así, el sistema está dotado con salidas inferiores, mediante las cuales se podría realizar una purga del sistema, si la cantidad de biomasa fuese excesiva.



8. VENTAJAS Y CONCLUSIONES

8. VENTAJAS Y CONCLUSIONES.

8.1. Ventajas frente a otros sistemas de desnitrificación.

El municipio en el cual se encuentra instalada la tecnología biológica, cuenta desde hace varios años con un sistema físico de eliminación de nitratos basado en una ósmosis inversa. Esta tecnología es utilizada por muchos municipios, ya que es un sistema muy efectivo para la eliminación de nitratos y otros muchos componentes de las aguas.

Dicha tecnología basa su funcionamiento en un sistema de membranas, por las cuales se fuerza a pasar el agua para retirar distintos compuestos. Este proceso requiere grandes cantidades de energía, ya que el agua es forzada a pasar en contra del gradiente natural, con elevadas presiones, con el consiguiente gasto energético que esto genera.

El segundo problema que posee esta tecnología es la corriente de rechazo que genera. Este sistema concentra los contaminantes retirados del agua en una corriente de rechazo que ha de ser tratada. Esto ocasiona que para tratar una determinada cantidad de agua se ha de desechar una parte del agua que ingresa mediante esa corriente de rechazo; esta cantidad es lo que se denomina corriente de rechazo. Esto genera importantes problemas en pequeños municipios que poseen pocos recursos para el tratamiento de ese efluente contaminado, y que además se encuentran en zonas con un alto déficit de precipitación y pocos recursos hídricos disponibles.

Como alternativa a estos sistemas físicos, surgen las tecnologías biológicas y en particular, los Sistemas Aeróbicos Secuenciales Granulares.

La principal ventaja que poseen estos sistemas respecto al actual sistema de ósmosis inversa instalado en la zona, es el considerable ahorro energético. El sistema LIFE ECOGRANULARWATER consume muy poca cantidad de energía, tanto es así que puede abastecerse mediante el uso de placas solares, reduciendo aún más los costes de operación.

La segunda ventaja es el ahorro de agua para la zona. Al no poseer una corriente de rechazo, toda el agua tratada puede ser usada sin necesidad de descartar ninguna parte. Por tanto, no genera efluentes contaminados o residuo alguno, siendo totalmente respetuosa con el medio ambiente. El único residuo generado es la poca cantidad de agua de limpieza del sistema de filtración, que es tratada mediante un humedal artificial.

Estas características hacen que el sistema tenga cero emisiones de gases de efecto invernadero si se utiliza energía solar para su funcionamiento.



Figura 27: ETAP de Torre Cardela.

8.2. Conclusiones.

Las principales conclusiones que se pueden extraer de esta tecnología se podrían resumir en:

- 1) Mediante la implantación de la tecnología LIFE ECOGRANULARWATER, se da solución a distintos problemas ambientales relacionados con la contaminación de las aguas subterráneas destinadas al consumo humano.
- 2) Se ha desarrollado una tecnología que se engloba en la línea de los proyectos LIFE, destinados a dar solución a problemas ambientales mediante el uso de un método asequible y totalmente respetuoso con el medio ambiente.
- 3) Se ha desarrollado una tecnología de naturaleza biológica fácil de instalar en pequeños municipios que posean problemas de contaminación por nitratos.
- 4) La tecnología LIFE ECOGRANULARWATER permite la eficiente eliminación de nitratos de un agua subterránea sin la producción significativa de residuos, pudiéndose abastecer con energías renovables y consiguiendo el objetivo de generar cero emisiones de gases de efecto invernadero.
- 5) La tecnología LIFE ECOGRANULARWATER logra un considerable ahorro energético, mucho mayor que otras tecnologías fisicoquímicas como es el caso de la ósmosis inversa.
- 6) Se trata de un sistema dotado de una alta versatilidad, tanto en el caso del volumen de agua a tratar, como en el caso de la cantidad de nitratos que posea el agua que debe ser tratada. En el primer caso, nos permite instalar más o menos réplicas de los biorreactores en función del volumen de agua que se desea tratar. En segundo lugar, modificando la cantidad de materia orgánica y la duración de los ciclos de operación, nos permite tratar influentes con muy diversa concentración de nitratos.

LIFE ECOGRANULARWATER es un proyecto de la iniciativa "Agua Potable" aprobado dentro del marco prioritario "Medio Ambiente y Eficiencia en el Uso de Recursos" del Programa LIFE, convocatoria 2016.

¿Qué?

Demstrar la eficacia de una tecnología para la **eliminación de contaminantes del agua** destilado a abastecimiento humano (arseno, fosfatos, pesticidas, etc) en pequeñas poblaciones.

¿Cómo?

Utilizando **tecnología granular aerobia** basada en procesos biológicos que eliminan dichos contaminantes del agua en condiciones de total seguridad.



¿Por qué?

Porque los actuales subestaciones de los que se abastecen muchas poblaciones no poseen los niveles de filtros necesarios para la eliminación que establece los estándares de calidad para el agua de consumo humano.



¿Dónde?

La tecnología ha sido instalada en la localidad de **Torre Cardada**, municipio de la provincia de Gerona y perteneciente a la comarca de los Montes Orientales. Se trata de una localidad escasamente agrícola que cuenta con una población de 813 habitantes.

¿Qué hemos conseguido?

1. Diseñar, instalar y operar una **planta biológica de potabilización** formada por 3 biorreactores que funcionan con granulación y operados en continuo. Fase: filtración, decantación y floculación.

2. Obtener un **rendimiento** en eliminación de nitrato del agua subterránea en torno al 80% y de materia orgánica por encima del 95%.

3. **Eliminar los nitros** del agua con total ausencia de olor y sabor. Fase: filtración y decantación. Fase: filtración y decantación.

Reducción de los costes de explotación con un coste de explotación de 0,15 €/litro.



Tecnología innovadora basada en métodos biológicos para la **eliminación de nitratos, pesticidas y otros contaminantes** presentes en las aguas subterráneas destinadas a consumo humano.



Proyecto cofinanciado por el programa LIFE de la Unión Europea.

Impulsado por la investigación, **fomentando** la economía local y el empleo. **Propugnando** soluciones más sostenibles en Europa.

9. INFORMACIÓN ÚTIL

9. INFORMACIÓN ÚTIL.

9.1. Referencias bibliográficas.

- Ashok, V., & Hait, S. (2015). Remediation of nitrate-contaminated water by solid-phase denitrification process—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(11), 8075–8093. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4334-9>
- Ayuntamiento de Abegondo. (2021). Life Rural Supplies. Soluciones sostenibles para pequeñas redes de abastecimiento (LIFE12 ENV/ES/000557). <https://ruralsupplies.eu/>
- De Stefano, L., Fornés, J. M., López-Geta, J. A., & Villarroya, F. (2014). Groundwater use in Spain: an overview in light of the EU Water Framework Directive. *International Journal of Water Resources Development*, 31. <https://doi.org/10.1080/07900627.2014.938260>
- Directive 91/676/EEC of the European Parliament and the Council of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources, 1991 O.J. (L 375) 1-8. <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj>
- European Commission. Directorate-General for Environment. (2000). 'Nitrates' Directive 91/676/EEC. Status and trends of aquatic environment and agricultural practice: Development guide for Member States' reports. Office for Official Publications of the European Communities.

- Fillinger, L., Hug, K., & Griebler, C. (2021). Aquifer recharge viewed through the lens of microbial community ecology: Initial disturbance response, and impacts of species sorting versus mass effects on microbial community assembly in groundwater during riverbank filtration. *Water Research*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116631>
- Hurtado-Martinez, M., Muñoz-Palazon, B., Gonzalez-Martinez, A., Manzanera, M., & Gonzalez-Lopez, J. (2021). Groundwater Nitrate Removal Performance of Selected *Pseudomonas* Strains Carrying nosZ Gene in Aerobic Granular Sequential Batch Reactors. *Water*, 13(8), 1119. <https://doi.org/10.3390/w13081119>
- Hurtado-Martinez, M., Muñoz-Palazon, B., Robles-Arenas, V. M., Gonzalez-Martinez, A., & Gonzalez-Lopez, J. (2021). Biological nitrate removal from groundwater by an aerobic granular technology to supply drinking water at pilot-scale. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101786. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101786>
- Muñoz-Palazon, B., Pesciaroli, C., Rodriguez-Sanchez, A., Gonzalez-Lopez, J., & Gonzalez-Martinez, A. (2018). Pollutants degradation performance and microbial community structure of aerobic granular sludge systems using inoculums adapted at mild and low temperature. *Chemosphere*, 204, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.062>
- Muñoz-Palazon, B., Rodriguez-Sanchez, A., Hurtado-Martinez, M., Gonzalez-Lopez, J., Pfetzing, P., & Gonzalez-Martinez, A. (2020). Performance and microbial community structure of aerobic granular bioreactors at different operational temperature. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101110. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101110>

9.2. Información complementaria.

- Diputación Provincial de Granada.
www.dipgra.es
Dirección: Periodista Barrios Talavera, 1, 18014 Granada.
Teléfono: 958 24 73 46.
- GEDAR. Gestión de Aguas y Residuos.
www.gedar.es
Dirección: C/ Industria (Pol. Ind. la Rosa), 1.
18330 Chauchina, Granada.
Teléfono: 958 44 75 06.
- Instituto de investigación del Agua.
www.institutodelagua.es
Dirección: Edificio Fray Luis de Granada. C/ Ramón y Cajal, 4.
18003 Granada.
Teléfono: 958 24 83 21.
- Página web del Proyecto LIFE ECOGRANULARWATER.
www.lifecogranularwater.com



Esta Guía se edita dentro del proyecto Life ECOGRANULARWATER, Proyecto demostrativo para el tratamiento de agua subterránea con un sistema innovador basado en tecnología granular aeróbica.

Dicho proyecto se fundamenta en el desarrollo de una novedosa tecnología biológica para la eliminación de compuestos nitrogenados en aguas subterráneas destinadas al consumo humano.

www.lifeecogranularwater.com

Beneficiarios Asociados



Coordinador

