

guía

tratamientos avanzados

de aguas residuales urbanas



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



PROGRAMA
incentivo
2010



tragua

guía

tratamientos avanzados

de aguas residuales urbanas

Alberto del Villar García

*Grupo E1 de Economía Ambiental
de la Universidad de Alcalá*

índice

guía
tratamientos
avanzados
de aguas residuales urbanas

índice

1. **Introducción** [6]
2. **Mejores técnicas disponibles. Concepto, utilidad y aplicación a las instalaciones de reutilización** [8]
3. **Criterios de calidad requeridos para la reutilización de las aguas según su uso** [11]
4. **Determinación de los costes de los tratamientos** [16]
5. **Tratamientos analizados** [21]
 - 5.1. **Información sobre los tratamientos y usos de aguas regeneradas** [23]
 - a) Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales [23]
 - b) Depuración y utilización para creación de barrera hidráulica contra la intrusión marina. Primera fase [24]
 - c) Biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor) [24]
 - d) Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación [25]
 - e) Oxidación Húmeda Catalítica [25]
 - f) Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas [26]
 - g) Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR [28]
 - h) Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF/OI para su reutilización en usos industriales [29]
 - i) Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración [30]
 - j) Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales [32]
 - k) Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales [33]
 - 5.2. **Resultados obtenidos** [34]
 - 5.3. **Identificación de los tratamientos con los usos potenciales** [43]
 - a) Calidad 1. Usos urbanos del agua regenerada [43]
 - b) Calidad 2. Usos agrícolas del agua regenerada [44]
 - c) Calidad 3. Usos industriales del agua regenerada [44]
 - d) Calidad 4. Usos recreativos del agua regenerada [45]
 - e) Calidad 5. Usos ambientales del agua regenerada [45]
6. **Conclusiones y recomendaciones** [46]
7. **Bibliografía y referencias** [49]
- Anexo I. Ficha para el análisis financiero** [52]
- Anexo II. Criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos (real decreto 1620/2007)** [57]

agradecimientos

guía
tratamientos
avanzados
de aguas residuales urbanas





A todos los grupos y personas cuya participación ha sido decisiva en la realización de este trabajo. Sin ellos no hubiera sido posible este documento. En particular a:

Óscar Alfranca, Pedro Álvarez Peña, Jesús M. Arsuaga Ferreras, Irene de Bustamante, Vicente Cases López, Pedro Gómez Rodríguez, Rafael van Grieken Salvador, Sixto Malato Rodríguez, Joaquín Melgarejo Moreno, Ángel de Miguel, Inmaculada Ortiz Uribe, Daniel Prats Rico, Manuel Andrés Rodrigo, Arcadio Sotto Díaz, Gloria Tejjón, Ane Urtiaga Mendiá, Aurora Santos López.

introducción

guía
tratamientos
avanzados
de aguas residuales urbanas





La presente guía nace con la pretensión de formalizarse como documento abierto para la incorporación sistemática y gradual de nuevos procesos y sistemas de tratamiento.

El objetivo de este documento es recoger una metodología para la evaluación y síntesis de la información recabada en los distintos grupos de investigación que conforman el Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA sobre los tratamientos de depuración y aplicación en la reutilización.

Este proceso surge de la necesidad de establecer criterios de selección óptimos de sistemas y tratamientos avanzados de acuerdo a las necesidades y recursos disponibles según la situación y el uso de los caudales.

Este documento no pretende establecer ningún tipo de clasificación o valoración entre los distintos tratamientos y procesos. No ha nacido con la finalidad de enjuiciar los trabajos o determinar en una tabla clasificatoria cuales son los mejores tratamientos. Al contrario, pretende ser un una guía para la selección según las oportunidades de recursos disponibles y usos del agua.

Para poder acometer esta tarea se ha hecho necesario establecer un sistema de captación y procesamiento de información, de cada uno de los tratamientos y sistemas de depuración que han sido objeto de estudio e investigación por parte de los distintos grupos. Dicho sistema se sintetizó en un documento estándar¹ que fue remitido a todos los grupos para recoger información de carácter financiero y en relación con la eficacia o rendimiento de los tratamientos.

Las respuestas obtenidas a este proceso de captación de información, a pesar de los esfuerzos por parte de los coordinadores, no han cumplido con las expectativas marcadas desde un principio. A fecha de cierre del proceso, tan sólo 11 tratamientos han sido informados a través de este procedimiento. Incluso, hay que lamentar el nivel de información proporcionado a través de los documentos aportados. La información aportada de carácter financiero puede resultar incompleta en algunos casos, pero en un caso incluso no se acompaña de datos e información acerca de los rendimientos y parámetros observados en algunos tratamientos.

No obstante, existen más que honrosas excepciones donde la información aportada es bastante completa, bien justificada y, en general, bien estructurada de cara a poder realizar análisis de costes en relación a su eficacia. Se agradece, en todo caso, el esfuerzo y la amabilidad de todos aquellos grupos que han aportado información para poder realizar esta tarea.

¹ Ver anexo I. Ficha para el análisis financiero.

mejores técnicas disponibles.
concepto, utilidad y aplicación a
las instalaciones de reutilización

guía

tratamientos
avanzados
de aguas residuales urbanas

2



El concepto de *Mejores Técnicas Disponibles* (MTD) o *Best Available Techniques* (BAT) tiene sus inicios en el V Programa Comunitario de política y actuación en materia de medio ambiente y desarrollo sostenible. Hacia principios de los años noventa del pasado siglo, la Unión Europea reformuló su política ambiental, incluyendo como objetivo básico en los Tratados la promoción de un crecimiento sostenible que respete el medio ambiente.

Fruto de esta nueva orientación ha sido la promulgación de una batería de instrumentos legales en las últimas dos décadas encaminadas a conseguir una mejora de la calidad ambiental en todos los ámbitos y actividades de la unión.

El nacimiento de la Directiva 96/61/CE, relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC), perseguía controlar el impacto que la contaminación tienen sobre los medios receptores más característicos: atmósfera, agua y suelo. La Directiva se ocupa de establecer un sistema integrado de gestión de la contaminación que, a nuestros efectos y para lo que nos ocupa, introdujo en su artículo 3 como sistema preventivo de la contaminación la aplicación de las *mejores técnicas disponibles*. Definición que se recoge de la siguiente manera²:

“Mejores técnicas disponibles: la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente. También se entenderá por:

Técnicas: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada;

Disponibles: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en el Estado miembro correspondiente como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables;

Mejores: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto.”

Es preciso destacar que el legislador comunitario tuvo a suerte matizar este concepto de MTD por el coste económico, estableciendo una doble evaluación en el sentido técnico y en el

² Definición en el artículo 2.11 de la Directiva 96/61/CE.



sentido económico. De esta forma se atenderán aspectos que están relacionados con el consumo de recursos, tales como optimización de recursos, costes económicos, plazos de adecuación, etc.

De esta forma se plantea un sistema de elección o selección de alternativas basados en una triple condición:

- Optimización de los recursos en las mejores condiciones económicas.
- Cumplimiento de los requisitos técnicos de la instalación.
- Cumplimiento de aquellos determinantes ambientales a nivel local.

A partir de estos requisitos, se seleccionaría la mejor alternativa disponible que cumpliera con los tres condicionantes anteriores, y no supusiera un coste excesivo para la empresa u organización. Ello implica la existencia de múltiples soluciones, cuya elección resulta independiente para cada caso y puede consistir en una única alternativa o la combinación de varias.

Estas MTD, basándose en los principios de prevención, se establecerían a partir de los valores y parámetros de reutilización, de acuerdo al potencial uso o destino de los caudales proporcionados por los sistemas de depuración, tomando en consideración las características técnicas de la instalación de que se trate, su implantación geográfica y las condiciones locales ambientales.

Así, lo realmente obligatorio en la utilización de las MTD no sería la aplicación de una determinada técnica o conjunto de éstas, sino de aquellas que permitieran el cumplimiento de los valores o estándares de calidad requeridos para cada uso potencial.

Entonces, toda técnica que potencialmente cumpla los requisitos de calidad según usos establecidos en el Anexo I.A del Real Decreto 1620/2007³, en el punto de entrega de las aguas regeneradas, puede considerarse como sujeto de análisis para entrar en la categoría de MTD.

Ahora bien, en esta selección de tratamientos no será posible determinar a priori aquellos sistemas más adecuados a cada uso ya que los requisitos para formular las MTD establecen la triple condición antes descrita. Por ello, los distintos tratamientos analizados en la presente guía han de considerarse todos ellos como potenciales para ser sujetos de elección en un proceso de establecimiento de alternativas.

³ Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. B.O.E. número 294, 8 de diciembre de 2007.

guía

tratamientos avanzados

de aguas residuales urbanas

3

**critérios de calidad
requeridos para la reutilización
de las aguas según su uso**



De acuerdo al artículo 4 del Real Decreto 1620/2007, las aguas regeneradas pueden utilizarse para todos los usos contemplados en el Anexo I.A, excepto para los siguientes casos⁴:

- Para el consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofe en las que la autoridad sanitaria especificará los niveles de calidad exigidos a dichas aguas y los usos.
- Para los usos propios de la industria alimentaria, salvo para el uso de aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria.
- Para uso en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.
- Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.
- Para el uso recreativo como agua de baño.
- Para el uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos.
- Para el uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos.
- Para cualquier otro uso que la autoridad sanitaria o ambiental considere un riesgo para la salud de las personas o un perjuicio para el medio ambiente, cualquiera que sea el momento en el que se aprecie dicho riesgo o perjuicio.

Los valores y parámetros de calidad requeridos se deben cumplir en los puntos de entrega de las aguas a reutilizar. Se establecen cinco usos potenciales con requisitos diferentes de acuerdo al grado de peligrosidad sanitaria derivado de la utilización de este tipo de recursos.

Para los usos urbanos, se fijan dos criterios de calidad en función del destino final del agua regenerada. Los recursos destinados a usos residenciales (riego de jardines privados o descarga de cisternas) presentan los valores más exigentes requeridos para la reutilización, frente a los usos urbanos de servicios (riego de zonas verdes, baldeo de calles, sistemas de extinción de incendios o lavado industrial de vehículos). En algunos casos, el umbral de los parámetros de contaminación establecidos es un 100% superior a los del primer caso.

Para los usos en procesos de riego agrícola se han fijado hasta tres niveles de calidad de acuerdo al contacto del agua regenerada con la planta y el uso del producto. En un primer caso, las actividades de riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el

⁴ Artículo 4 apartado 4 del Real Decreto 1620/2007.



contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco, los requisitos de calidad del agua regenerada son superiores a los usos urbanos. En un segundo nivel, la aplicación del agua regenerada en actividades de riego de productos para consumo humano, con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior, el riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne, el riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana o la acuicultura, entre otros usos; los requisitos de calidad se rebajan.

Los usos industriales también presentan, al igual que en el caso de los usos urbanos, dos niveles de calidad para la aplicación de recursos de agua regenerada. Un primer nivel de calidad de las aguas aptas para usos en actividades de proceso y limpieza; junto a otro nivel, más exigente en cuanto a parámetros de calidad, destinado a utilizarse en torres de refrigeración y condensadores evaporativos.

Los potenciales usos recreativos de las aguas regeneradas se han establecido en dos grupos. Por una parte, el riego de campos de golf, con requisitos de calidad en los recursos empleados muy exigentes. Por otro lado, el empleo de dichos recursos en estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua; cuyos requisitos de calidad se encuentran más relajados.

Por último, los usos ambientales presentan una variación en los niveles de calidad requeridos mayor, debido al amplio abanico de posibilidades de uso de los caudales de aguas regeneradas. Se pueden dar hasta cuatro niveles de calidad dependiendo de las técnicas empleadas, la proximidad a actividades humanas y el destino del agua. En el caso de la recarga de acuíferos por inyección directa, los parámetros de calidad requeridos son superiores a otros usos; tales como la recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno, el riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público, la silvicultura, o el mantenimiento de caudales mínimos o humedales.

Tabla 1. Relación entre calidades del agua regenerada y los usos potenciales

1. USO URBANO

Calidad 1.1	a) Riego de jardines privados
	b) Descarga de aparatos sanitarios
Calidad 1.2	a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, centros deportivos y similares)
	b) Baldeo de calles
	c) Sistemas contra incendios
	d) Lavado industrial de vehículos



2. USO AGRÍCOLA

- Calidad 2.1 a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.
-
- Calidad 2.2 a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior
b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne
c) Acuicultura
-
- Calidad 2.3 a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana
b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones
c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas
-

3. USO INDUSTRIAL

- Calidad 3.1 a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria
b) Otros usos industriales
c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria
-
- Calidad 3.2 a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos
-

4. USO RECREATIVO

- Calidad 4.1 a) Riego de campos de golf
-
- Calidad 4.2 a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua
-

5. USO AMBIENTAL

- Calidad 5.1 a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno
-
- Calidad 5.2 a) Recarga de acuíferos por inyección directa
-
- Calidad 5.3 a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público
b) Silvicultura
-
- Calidad 5.4 a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares)
-

Fuente: Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.



A partir de estas relaciones, los distintos tratamientos avanzados de depuración y reutilización de aguas regeneradas pueden ser objeto de un primer filtro de viabilidad en el que se establezca su idoneidad para cada aplicación.

De esta forma, podemos establecer un criterio de adecuación en el que se empleen las tecnologías y recursos de una forma más eficiente de acuerdo al destino final del efluente de agua regenerada. No es eficiente disponer de un agua de calidad 1.1 cuando el uso que se le asigna a estos recursos pertenece al apartado 5 (usos ambientales). El coste incurrido en la regeneración de estos recursos sería muy superior a los que corresponderían conforme a los criterios de calidad exigidos.

determinación de los costes de los tratamientos

guía
tratamientos
avanzados
de aguas residuales urbanas

4



Son muchos los parámetros y factores que afectan a la rentabilidad y viabilidad financiera de un proyecto de utilización de aguas regeneradas. Pero básicamente podemos reducir a dos grupos de elementos que, sin obviar los restantes, pudieran permitirnos una rápida aproximación a una valoración sencilla pero eficiente.

A la hora de establecer la viabilidad financiera de un proyecto es preciso conocer con detalle los elementos que conforman los distintos costes que nos afectan. Estos elementos se integran en dos grupos esenciales que determinan; de una parte el capital total invertido (CTI), y de otra el capital de trabajo necesario o coste de producción (mantenimiento y conservación).

El capital Total Invertido esta formado por el capital físico y los costes necesarios para la puesta en funcionamiento. El capital físico está formado por los costes directos derivados de las instalaciones y elementos que conforman las plantas de tratamiento. Los costes indirectos son aquellos costes necesarios para el correcto funcionamiento y que no se sustentan en elementos físicos. Forman parte de los costes indirectos todos aquellos intangibles necesarios para la ejecución de las instalaciones (licencias, transportes, dirección de obra y proyectos, etc.).

Debido a que se pretende realizar estimaciones sobre tratamientos experimentales, en las primeras fases o estadios de desarrollo, se cree conveniente proporcionar una serie de herramientas de estimación de costes sobre modelos basados en índices o factores de ponderación.

De esta forma, se podrían establecer unos valores de referencias para las técnicas y procedimientos empleados que proporcionen una visión lo más realista posible.

Para la estimación del coste de los equipos existen metodologías probadas que de una manera sintética o analítica se aproximan al coste total con márgenes de error muy reducidos o aceptables (10-25%). Son métodos factoriales que utilizan algún parámetro o factor para obtener el montante total. Los más conocidos son el método de Lang, el método de Hang, el método de Cran y el método de Chilton.

El método de Lang supone que el coste de la instalación es un múltiplo del coste del equipo, de tal manera que a través de la agregación del coste de los distintos elementos multiplicados por el factor específico sectorial, alcanza el valor total de la planta o instalación.

$$C = F \times \sum E$$



Siendo:

C: Coste de la planta o instalación.

F: Factor de Lang. Para instalaciones industriales de plantas de fluidos, el valor del factor de Lang se ha estimado en 4,74.

E: Coste de cada uno de los equipos que forman la instalación o planta.

El método de Hang es una variación del método de Lang. Consiste en aplicar la fórmula de Lang de manera individualizada para cada elemento.

$$C = \sum (f_i \times E_i)$$

Siendo:

C: Coste de la planta o instalación.

f_i : Factor de Hang para cada elemento (varía entre 2 y 9,5).

E_i : Coste de cada elemento por separado.

El método de Cran incorpora al análisis dos tipos de factores en relación a la dependencia de los costes directos y de los costes indirectos.

$$C = [\sum (E \times F_D) + I \times F_I] \times (1 + F_N)$$

Siendo:

C: Coste de la planta o instalación.

E: Coste del elemento o equipo por separado.

F_D : Factor de coste directo que depende de cada equipo.

F_I : Factor de coste directo para instrumentos y otros accesorios.

F_N : Factor de coste indirecto.

I: Coste de instrumentos y otros accesorios.

Por último, el método de Chilton parte del valor instalado de cada elemento o equipo y pondera el valor del resto de la instalación a través de unos factores medios. El punto de partida en este método es la estimación de la inversión de los equipos que componen la instalación, a los que se les aplica unos factores ponderados en dos grupos: factores de estimación directos (componentes de las instalaciones determinados de manera individual) y factores de estimación indirectos (tales como dirección de obra, costes de ingeniería, proyectos, etc.)



$$I_F = I_E \left(1 + \sum f_d \right) \times \left(1 + \sum f_i \right)$$

Siendo:

I_F : Inversión o coste de la planta o instalación.

I_E : Inversión o coste del elemento/s principal/es.

f_d : Factor de multiplicación directo de elementos auxiliares y complementarios relacionados con las instalaciones.

f_i : Factor de multiplicación indirecto para elementos y costes accesorios (consultoría, dirección de obra, etc.).

Obtenido el coste del capital total invertido, se puede obtener un indicador que pueda comparar esta magnitud entre alternativas y procesos diferentes. A través del coste anual equivalente (CAE) se calcula en forma de una renta que equilibra el desembolso inicial (o Valor Actual) del bien o elemento objeto de la inversión a lo largo de la vida útil del mismo.

$$CAE = VA \frac{i}{1 - (1+i)^{-t}}$$

Siendo:

CAE: Coste Anual Equivalente.

VA: Valor Actual del bien o elemento objeto de la inversión.

i : Tasa de interés o descuento.

t : tiempo (años) de duración de la inversión o vida útil.

Obtenido el coste de la inversión, procede estimar el coste del capital operativo o de trabajo, esto es, el coste de las operaciones de mantenimiento y conservación necesarias para el correcto funcionamiento y desempeño de las instalaciones.

Están comprendidos en este capítulo todos aquellos costes incurridos en la explotación, funcionamiento, mantenimiento o conservación del proyecto o actuación, que se correspondan con desembolsos, consumos u otras aplicaciones, cuya recurrencia tenga un carácter periódico no superior a un año o ejercicio económico.

A estos efectos puede considerarse como elementos integrados en este capítulo los costes de personal, costes energéticos, servicios de mantenimiento y conservación, consumibles, etc.



guía

tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas

Alguna de estas partidas presenta una problemática particular y pueden suponer un importante elemento de coste en cualquier proyecto. Se trata, sobre todo, de las partidas de costes relativas al personal y a la energía. En ambos casos se trata de elementos sujetos a variaciones y condicionantes importantes que serán objeto de una especial atención. Incluso, si es necesario, a través de un análisis de sensibilidad y de una valoración a través de diferentes escenarios.

Cada una de las partidas de costes se calculará de forma independiente empleando el criterio de capacidad de producción con el que vaya a operar con carácter habitual el proyecto o instalación. Si existe una planificación para la puesta en marcha gradual o diferentes etapas en el proyecto/actuación, se tendrá en cuenta esta hipótesis en el cálculo.

El resultado final será el montante agregado de cada una de las partidas estimadas para este apartado. Esta cifra, junto a la resultante del sistema de estimación por medio del coste anual equivalente (CAE), será el coste del tratamiento o proceso.

guía
**tratamientos
avanzados**
de aguas residuales urbanas

5

tratamientos analizados



Tal y como se ha mencionado, tan sólo se ha recibido información acerca de 11 tipos de tratamientos o proyectos en el marco del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA. También cabe resaltar no sólo el grado de respuesta, también la calidad o nivel de información contenido en algunas respuestas proporcionadas. En algunas ocasiones la disponibilidad de información no resulta del todo suficiente para los propósitos señalados. Desde estas líneas se quiere mostrar nuestro más sincero agradecimiento a aquellos grupos y personas que se han prestado a colaborar en esta tarea.

No obstante, esta escasa información no limita el alcance del análisis pretendido. Los tratamientos analizados representan un amplio espectro de tecnologías que posibilitan asumir ciertos resultados.

Tabla 2. Relación de tratamientos analizados.

1. Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales
2. Reutilización de aguas depuradas para el desarrollo de una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Delta del Llobregat (ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas), Primera Fase.
3. Biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor)
4. Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación
5. Oxidación Húmeda Catalítica
6. Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas
7. Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR
8. Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF/OI para su reutilización en usos industriales
9. Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración
10. Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales
11. Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales

Fuente: Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA.

La amplia variedad de tratamientos permite abarcar casi todos los niveles de calidades que se precisan para poder reutilizar las aguas regeneradas (Tal y como se requiere por el Real Decreto 1620/2007). El nivel de los efluentes posibilita desde el uso urbano, de mayor requerimiento de calidad, hasta los usos ambientales, con menores restricciones, pero con elevados requisitos de eliminación de elementos contaminantes.

El empleo de diferentes tecnologías obedece a criterios muy amplios. Entran a escena en el proceso de decisión respecto la técnica empleada diversidad de factores. El principal factor de decisión es el destino de los efluentes de aguas regeneradas. Las tecnologías



blandas pueden ser aptas para usos con menores requisitos de calidad, pero quedarían descartadas para aquellos usos donde la calidad del agua requerida sea muy elevada, como es el caso de los usos urbanos. Otros factores como son el volumen, los caudales tratados, la climatología, disponibilidad de factores productivos, etc. También son elementos que entran a formar parte del proceso de decisión respecto a las distintas alternativas tecnológicas de los tratamientos que pueden ser aplicados.

5.1. Información sobre los tratamientos y usos de aguas regeneradas

Sin el menor ánimo de ser exhaustivos en las descripciones de los tratamientos⁵ aquí recogidos, se procede a realizar una breve descripción de cada uno de los proyectos de los que se tiene información.

a) Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales

Los filtros verdes son un sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales, adaptado principalmente a pequeñas poblaciones. Se trata de un claro ejemplo de tecnologías blandas que requieren muy poca inversión y de simplificado mantenimiento.

El agua debe someterse a un tratamiento previo, que por lo general consiste en un desbaste, una tamizado de gruesos y finos, desengrasado, y posteriormente es aplicado al terreno de forma controlada, en función de los requerimientos hídricos de la vegetación implantada. El agua será tratada por el trinomio suelo-planta-microorganismos. El agua que no sea evapotranspirada, pasará al acuífero por percolación. Es necesario controlar la calidad del agua después de los primeros metros de suelo, por lo que se colocan una serie de piezómetros o lisímetros de control

Este tipo de tratamiento puede resultar muy eficaz en poblaciones de pequeño tamaño, principalmente por su bajo coste de implantación y mantenimiento. Además, las labores de operación y mantenimiento tienen que ver más con labores agrarias que con las relacionadas con el tratamiento de aguas, por lo que no es necesario personal cualificado.

No obstante, dados los valores y niveles de calidad que ofrecen estos tipos de tratamientos, los hacen adecuados para usos ambientales (nivel de calidad 5 según Real Decreto 1620/2007), ciertos usos recreativos (cuyos requisitos de calidad sean los correspondientes al nivel 4.2) y usos agrícolas (nivel de calidad 2.3, no en todos los casos).

⁵ Se remite a las referencias de cada uno de ellos para una mejor información y ampliación.



Por otro lado, y gracias a la venta de la biomasa cada cierto periodo, se puede tener una serie de ingresos que ayuden al mantenimiento de la planta y reduzcan los costes de explotación.

b) Depuración y utilización para creación de barrera hidráulica contra la intrusión marina.
Primera fase.

El proyecto se basa en la construcción de una barrera hidráulica positiva con el objetivo de frenar la intrusión salina en el acuífero principal del Delta del Llobregat (Barcelona), mediante la inyección de agua depurada regenerada.

El agua que se inyecta en los citados pozos es agua procedente del efluente de la planta depuradora, que posteriormente se somete a un tratamiento adicional de ultrafiltración, ósmosis inversa (solo el 50% del volumen de agua total) y desinfección ultravioleta, alcanzándose así los criterios de calidad óptima para su posterior inyección en el acuífero.

Se vienen inyectando una media diaria de unos 2.500 metros cúbicos, estando previsto que se alcance un volumen de tratamiento de unos 15.000 metros cúbicos diarios que tendrán también otros usos. Tales como el mantenimiento del caudal ecológico del río Llobregat, el mantenimiento de zonas húmedas y la sustitución de caudales de riego agrícola.

El alcance del efecto de la barrera en el acuífero es función principalmente de la distancia del punto de observación al punto de inyección, así como la naturaleza geológica del acuífero. De manera general se aprecia en el agua subterránea un descenso en la conductividad eléctrica y en la salinidad, así como un descenso en las concentraciones de cloruros, sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfatos y amonio.

c) Biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor)

Este proyecto estudia el tratamiento de aguas residuales con biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor), disponiéndose de un MBR piloto compuesto por dos módulos independientes, uno de membrana plana y otro de fibra hueca al que se acopla un sistema de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI). Se han realizado ensayos de comparación entre ambos módulos para estudiar el comportamiento y calidad del permeado bajo diferentes condiciones de carga másica de entrada, sólidos suspendidos en el licor mezcla (MLSS–Mixed Liquor Suspended Solids), intensidades de aireación y flujo de permeado.

Las aplicaciones del agua tratada con MBR pueden ser muy amplias, ya que la calidad final es muy buena y cumple con las especificaciones que debe tener el agua regenerada para la mayo-



ría de los usos. Los caudales regenerados mediante esta tecnología pueden ser objeto de cualquier uso, incluido los de mayores niveles de exigencia de calidad (nivel de calidad 1).

El sistema presenta una ventaja adicional al poder ser utilizado de forma modular, con las ampliaciones necesarias, según demanda.

d) Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación

El sistema consiste en una planta formada por las siguientes unidades de procesamiento y tratamiento: sistema de almacenamiento y bombeo de agua bruta; filtración rápida con lecho de arena; cámara de mezcla de reactivos y ajuste de pH; sistemas de adsorción y oxidación; sistema de separación de lodos (cámara de coagulación, decantadores y filtros de arena). Los sistemas de adsorción y oxidación que se utilizaron han sido los siguientes:

- Adsorción en carbón activado (lechos fijos de carbón activado granular).
- Procesos no fotoquímicos de ozonización: ozono, sistema O_3/H_2O_2 y O_3 /carbón activado (compresor, de aire, generador de ozono, reguladores de caudal, sistema de dosificación de peróxido de hidrógeno y ajuste de pH, columna de burbujas para contacto gas-líquido, lecho fijo de carbón activado, analizadores de ozono en líquido y gas y destructor de ozono residual).
- Sistema Fenton ($Fe(II)/H_2O_2$) (sistema de dosificación de reactivos y ajuste de pH, cámara de mezcla, cámara de oxidación provista con difusores de aire, sistema de separación de lodos mediante coagulación, decantación y filtración sobre arena).
- Procesos fotoquímicos con radiación ultravioleta (254 nm): fotólisis directa, sistema foto-Fenton (UV-C/ $Fe(II)/H_2O_2$), fotocatalisis empleando TiO_2 , fotocatalisis empleando catalizadores magnéticos (sistema de dosificación de reactivos y ajuste de pH, reactor fotoquímico provisto con lámpara UV-C y sistema de separación de lodos).
- Fotocatalisis solar: sistema foto-Fenton, sistema $Fe(III)$ /oxalato, fotocatalisis empleando TiO_2 y fotocatalisis empleando fotocatalizadores magnéticos (sistema de dosificación de reactivos y ajuste de pH, reactor CPC y sistema de separación de lodos y/o catalizador).

e) Oxidación Húmeda Catalítica

Mediante la oxidación húmeda, la materia orgánica en disolución acuosa se oxida con una corriente de aire (enriquecido o no en oxígeno) a temperaturas elevadas (250-400 °C) y



altas presiones (200-300 atm.). Las severas condiciones que requiere afectan de forma importante la economía del proceso. Por este motivo se ha propuesto el empleo de carbón activo como catalizador sin impregnación de metales (lo cual evita los problemas de desactivación por lixiviación de las diferentes fases activas), lo que permite bajar la temperatura y presión de oxígeno necesarias. El CA granular se trata de un catalizador barato. Las condiciones de operación se han fijado entre 130-120°C de temperatura y presiones de oxígeno de 5 bares (presión total de aire 25 bares).

El aire es inyectado mediante un compresor y el agua residual mediante una bomba de líquidos. La mezcla se calienta hasta la temperatura de entrada al reactor mediante un cambiador empleando el calor del efluente caliente para mejorar la economía del proceso. La corriente de entrada al reactor puede alimentarse por cabeza para minimizar costes de bombeo. El reactor es un lecho fijo que contiene en su interior el carbón activo granulado empleado como catalizador. El efluente caliente se enfría en el cambiador de calor cediendo calor a la corriente de alimentación, antes de ser despresurizado mediante una válvula de control. Una vez enfriado se separa la fase líquida y la fase gaseosa.

El mayor inconveniente en la utilización de esta tecnología es el elevado consumo energético requerido, que incrementa los costes de tratamiento de manera considerable. Sin embargo, los caudales regenerados con este sistema presentan unos elevados niveles de calidad que posibilita su utilización en cualquier tipo de uso.

f) Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas

La electrocoagulación es una alternativa a la coagulación que facilita la eliminación de materia coloidal y fósforo, y puede también ayudar a la mejora en la eliminación de materia orgánica y de nitrógeno. Necesita ser combinado con un tratamiento de filtración. Es un tratamiento que ayuda a regular el pH en el efluente de una depuradora y que al contrario que la coagulación química, no incrementa la conductividad del efluente del tratamiento.

La electrolisis con electrodos de diamante conductor de la electricidad permite la desinfección de un agua regenerada y podría permitir la eliminación completa de contaminantes persistentes. En la primera aplicación las necesidades de carga eléctrica son asumibles. En la segunda, a pesar de que es una de las pocas tecnologías que permite la eliminación completa de este tipo de contaminantes, son excesivamente elevadas.

El parámetro de diseño más importante para ambos procesos es la carga eléctrica específica que hay que transferir al agua en tratamiento. Se mide en kAh m^{-3} y su producto con el potencial de celda (medido en V) permite obtener el requerimiento energético del sistema.



La electrolisis con ánodos de diamante conductor (tecnología EADC) permite eliminar la carga orgánica contenida en un agua hasta el nivel que se requiera (no se generan compuestos refractarios al tratamiento), siendo una alternativa tecnológicamente viable incluso para la eliminación de contaminantes prioritarios a nivel de PPB. En el caso de contaminantes difíciles de eliminar, no existen límites tecnológicos de uso para eliminación de materia orgánica, aunque el tratamiento de efluentes con DQO superiores a 20.000 ppm de DQO (industriales) o inferiores a 10 ppm es más económico por otro tipo de tecnologías (evaporación y adsorción respectivamente). De acuerdo con evaluaciones realizadas por nuestro grupo, los costes asociados al tratamiento de refino de DQO de un agua urbana son muy elevados, ya que se requieren cargas que pueden llegar a los 100 kWh m⁻³, lo que conllevaría (asumiendo un potencial de celda de 5 v) unos consumos energéticos desproporcionados (500 kWh m⁻³). Por el contrario, el empleo en desinfección sólo requiere de cargas inferiores a 1 kWh m⁻³ y por tanto de costes energéticos 100 veces inferiores. Un estudio comparativo del uso de esta tecnología electroquímica con respecto al proceso fenton y a la ozonización en eliminación de materia orgánica en efluentes industriales (fuertemente cargados).

El equipamiento principal consiste en electrolisis en una celda electroquímica. El requerimiento de carga de un proceso de electrolisis para un agua urbana estaría alrededor de 1 kWh m⁻³ y la densidad de corriente de operación típica es de 300 A m⁻². En electrocoagulación el requerimiento de carga es de 0.1 kWh m⁻³. La densidad de corriente típica de operación es de 100 A m⁻². Dividiendo ambas magnitudes se obtiene que el área de dimensionamiento típica sería de 1 m²/ (m³/h de agua tratada).

Unas características importantes de los dos procesos electroquímicos son su simplicidad, robustez y su escasa necesidad de reactivos. Todas las tecnologías desarrolladas tienen unas necesidades de mantenimiento mínimas, con escasos elementos móviles (y por tanto con escasas necesidades de lubricación), escasa maquinaria y una gran facilidad de control, ya que la velocidad de los procesos se puede controlar por medio de la regulación de una simple fuente de alimentación o rectificador de corriente. Tan sólo se requiere corriente continua para alimentarlos, y afortunadamente la electricidad es un bien fácil de encontrar, y con el desarrollo de las nuevas fuentes de energía renovable (aerogeneradores, paneles fotovoltaicos, etc.), incluso se pueden aplicar en entornos remotos y aislados. Sin embargo, lo que es un punto a favor de la tecnología implica, a su vez, uno de sus mayores inconvenientes: su uso puede verse favorecido, o desaconsejado, por el precio de la electricidad. Estudios recientes aplicados fundamentalmente a efluentes industriales demuestran que los costes de las tecnologías electroquímicas compiten satisfactoriamente con los de tecnologías equivalentes. En este contexto, los costes energéticos requeridos por estas tecnologías en el tratamiento de regeneración de aguas depuradas deben ser netamente inferiores a los obtenidos cuando se usan en las aplicaciones para las que han sido desarrolladas, por cuando el coste de las tecnologías electroquímicas suele ser proporcional a la



concentración de contaminante a eliminar, y en estas aplicaciones se está incluso órdenes de magnitud por debajo del intervalo de concentraciones para las que se han desarrollado las anteriores aplicaciones.

Los usos potenciales de las aguas regeneradas a través de esta tecnología abarcan todo el espectro de calidades conformadas según el Real Decreto 1620/2007.

g) Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR

El foto-Fenton solar se basa en la utilización de pequeñas cantidades de Fe (algunos mg/L) e hidrógeno peróxido (agua oxigenada) en combinación con radiación solar para eliminar contaminantes y desinfectar efluentes de EDAR y permitir su reutilización.

El proceso Foto-Fenton es un tratamiento fotocatalítico basado en la producción de radicales hidroxilo mediante el reactivo de Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \bullet\text{OH} + \text{H}^+ + \text{OH}^-$) y luz. La velocidad de degradación de contaminantes resulta acelerada por la irradiación con luz Ultravioleta-Visible (longitudes de onda mayores de 300 nm). En estas condiciones, la fotólisis de complejos Fe(III), permite la regeneración de Fe(II): $[\text{Fe}(\text{HO})]^{2+} + \text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \bullet\text{OH}$. Las principales ventajas son:

- El oxidante y el catalizador utilizados son inocuos, comerciales, muy soluble en agua y baratos.
- Es un proceso eficiente con altas conversiones de degradación.
- Es activo hasta una longitud de onda de 600 nm, lo que supone poder realizarlo con energía solar.

El agua debe someterse a un tratamiento previo, que por lo general consiste en un desbaste, una tamizado de gruesos y finos, desengrasado, y posteriormente es enviada a la planta de foto-Fenton. Ahí se le adiciona 5 mg/L de Fe (Como FeSO_4) y 50 mg/L de H_2O_2 , bombeándose a continuación hacia el campo solar. El agua de salida ya no contendrá contaminantes orgánicos (de acuerdo a los límites de detección alcanzados con LC-MS, que son del orden de 1 ng/L) ni patógenos (<1 cfu/100 mL) de acuerdo a normativa contenida en Real Decreto 1620/2007. Es preciso remarcar que el tratamiento no se ha diseñado para disminuir COT, DQO o DBO, si bien estos parámetros se reducen ya que se está aplicando un tratamiento de oxidación avanzada.

La principal variable de diseño es la concentración de contaminantes, ya que la desinfección es conseguida con cierta facilidad mediante este tratamiento. El tiempo de tratamiento (que define la superficie de captadores necesaria, el principal componente de la inversión de capital) y el consumo de H_2O_2 (el principal componente de los costes de operación) serán diferentes de acuerdo a la concentración inicial de contaminantes.



El proceso de foto-Fenton como tratamiento de efluentes de EDAR puede utilizarse para todas y cada una de las aplicaciones recogidas en Real Decreto 1620/2007, siendo preciso estudiar cada caso concreto ya que el coste del tratamiento puede verse reducido si la calidad del agua de salida puede ser algo inferior.

La utilización de procesos basados en el uso de energía solar tiene como valor adicional a las actuales tecnologías avanzadas existentes (ozono, membranas, carbón activo, etc.) para el tratamiento de aguas que se reduce sustancialmente el consumo energético.

Por otro lado, al igual que en el caso de la energía solar térmica, el Mediterráneo goza de unas condiciones de insolación idóneas para la implantación de estas tecnologías, que sumado al estrés hídrico que sufre la región las hace cada vez mas necesarias.

h) Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF/OI para su reutilización en usos industriales

El efluente secundario procedente de EDAR es prefiltrado mediante sistema de anillas autolimpiable con un micraje mínimo de 130 micras. Las aguas prefiltradas son conducidas a una etapa de Ultrafiltración, previa dosificación de coagulante, empleando módulos de membranas del tipo filtración total ("dead end"). El permeado procedente de la etapa de UF es de gran calidad, cumpliendo con los parámetros exigidos para su reutilización en torres de refrigeración industrial. Una parte del agua producida por el sistema UF, puede ser sometida a una etapa de OI de baja presión mediante membranas de bajo ensuciamiento, con el objetivo principal de reducir su conductividad, lo que permite obtener una corriente reutilizable en calderas de vapor industriales.

La tecnología de ultrafiltración permite adecuar la calidad del agua de salida de EDAR a los usos establecidos en el Real Decreto de reutilización, ya que elimina el contenido de sólidos en suspensión, turbidez, E.coli y nematodos intestinales por debajo de los límites establecidos en la normativa, incluida la reutilización industrial en torres de refrigeración.

La tecnología de ósmosis inversa permite reducir la conductividad, y por lo tanto adecuar la calidad del agua a aquellos usos industriales que requieren alta calidad, por ejemplo la generación de vapor a presión.

De esta manera, es posible obtener un elenco de calidades del agua regenerada que puede abarcar prácticamente todos los usos industriales, con estándares de calidad incluso por encima de los establecidos en el real Decreto 1620/2007.



La tecnología de UF/OI se caracteriza por su compacidad y modularidad. Ello implica que no se requieren grandes superficies y espacios para su instalación. Los equipos se construyen sobre bancadas estándar que incluyen todos los elementos de la instalación (módulos de membranas, instrumentación, valvulería, etc.) y que pueden ubicarse directamente en su localización final con mínimas necesidades constructivas adicionales (si bien suelen requerir colocarse bajo cubierta).

En consecuencia, podrían considerarse despreciables los costes relativos al suelo, y a los elementos constructivos necesarios.

Los usos potenciales que pudieran ser destinatarios de los efluentes de las aguas regeneradas mediante estos procesos abarcan todo el abanico de calidades del Real Decreto 1620/2007.

i) Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración

Según las características del agua a tratar, procedente de una EDAR, se propone la combinación de diferentes tecnologías de membranas para la obtención de diversas calidades del agua. Con un caudal de alimentación de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ se propone como etapa inicial una filtración convencional para la retención de partículas en suspensión y elementos coloidales coagulados. A continuación se sitúa una etapa de ultrafiltración (UF) que garantice la retirada de más del 90 % de contaminantes orgánicos (TOC). El principio de la ultrafiltración es la separación física. Es el tamaño de poro de la membrana lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. A nivel técnico consiste en impulsar el agua residual a presión mediante bombas eléctricas y obligar a esta a atravesar unas membranas con una luz de paso de entre 0,1 y 0,01 micras. De esta manera se consigue la separación de micropartículas.

Con el objetivo de mejorar la calidad del agua, suponiendo la presencia de ciertos contaminantes emergentes de bajo peso molecular, se propone la adaptación de un módulo de nanofiltración. Aunque este nuevo elemento supone un apreciable coste adicional, se garantiza así una retirada de sales de más del 90% y la totalidad de contaminantes orgánicos. La nanofiltración (NF) es una técnica que ha prosperado a lo largo de los últimos años y hoy en día es una técnica fundamental aplicada en múltiples pasos de purificación de agua potable, tales como ablandamiento del agua, decoloración y eliminación de microcontaminantes (pesticidas, metales pesados, etc.).

La ultrafiltración se usa como pretratamiento a la tecnología de Nanofiltración. Las ventajas más relevantes que se consiguen utilizando la tecnología de ultrafiltración son:



- Calidad de agua tratada. REUTILIZACIÓN (Agua de Riego).
- Estabilidad. Calidad del permeado estable con independencia de picos de carga.
- Desinfección. Efluente desinfectado tras atravesar una membrana de ultrafiltración.
- Compacidad. Mínimo requerimiento de espacio.
- Modularidad. Sistemas fácilmente ampliables sin necesidad de reformas ni ampliación de reactor biológico.
- Mantenimiento. Sistemas muy automatizados, mantenimiento mínimo.
- Eliminación de *bulking* y espumas de origen filamentosos.

La planta de nanofiltración se incluye, porque en el trabajo de investigación realizado se ha supuesto que el agua de salida de la EDAR, aun presentando parámetros globales aceptables, contiene o es susceptible de contener concentraciones potencialmente peligrosas de sustancias emergentes de bajo peso molecular (farmacéuticos, pesticidas, etc.). La ausencia de esos productos haría innecesaria la planta de nanofiltración.

La tecnología de tratamiento de agua con membranas que se propone muestra unos niveles de eficiencia muy altos. Dicha tecnología consta de tres partes o fases bien diferenciadas: Filtración por filtro de arena/antracita, Ultrafiltración y Nanofiltración.

Se propone la utilización de un sistema de NF con el objetivo de eliminar de la corriente de agua a tratar la posible presencia de contaminantes orgánicos emergentes o prioritarios. En la investigación desarrollada, se dopó el agua proveniente de la EDAR con seis contaminantes farmacéuticos. En todos los casos la retirada de los mismos superó el 90%, aun tratándose de una membrana de NF "abierta". Dicho rendimiento en la eliminación de contaminantes puede ser mejorado (100%) sustituyendo la membrana utilizada por una membrana de NF "cerrada".

En caso de que el agua a tratar no presente la contaminación orgánica anteriormente descrita, no sería necesaria la utilización de un sistema de NF, lo cual abarataría el coste global del proyecto, como mínimo, en un 50%.

Obsérvese en los esquemas de funcionamiento de la planta que se estima en un 70% el caudal de agua tratada que se transforma en agua óptima para su reutilización (es una estimación más bien a la baja). El 30% restante aproximadamente no sería apta y debería considerarse un vertido que, potencialmente, podría tratarse con alguna de las otras técnicas de oxidación avanzada que se proponen en el proyecto.

Creemos que la tecnología que se propone alcanza cuotas de eficacia/eficiencia muy altas, entregando descargas de agua de una calidad óptima para su reutilización, así como para su posible uso en otros tipos de demandas de tan preciado recurso.



La aplicación de esta tecnología a aguas procedentes de una EDAR, dopadas con contaminantes emergentes de tipo farmacéutico mostró niveles de calidad cercanos a los de consumo humano.

Se trataron hasta seis contaminantes emergentes, mostrando un nivel de retención superior al 90%. La salinidad final estuvo alrededor de un 5% del agua tratada y los niveles de COT fueron casi nulos.

j) Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales

La fotocatálisis heterogénea es una técnica de tratamiento y depuración de aguas residuales basada en la irradiación de dióxido de titanio en contacto con el sistema acuoso que se desea tratar. El potencial uso de la luz solar y el empleo de catalizadores de bajo coste hacen de los procesos fotocatalíticos una alternativa muy interesante a las tecnologías empleadas convencionalmente para el tratamiento de aguas.

El proceso fotocatalítico se basa en la irradiación de un óxido semiconductor (normalmente TiO_2) para producir en el sólido la formación de radicales hidroxilo. Estas especies, por su alto poder oxidante, son capaces de degradar la materia orgánica contenida en el agua sometida al tratamiento, consiguiendo en última instancia su completa mineralización. En el ámbito de los procesos de desinfección, el ataque de los radicales hidroxilos conduce a la destrucción de la envoltura celular en los microorganismos, aumentando la permeabilidad y permitiendo el ataque a componentes internos citoplasmáticos como la coenzima A, clave en la respiración, o directamente al ADN.

La eficiencia del proceso está en gran medida relacionada con el aprovechamiento de la radiación, especialmente en caso de utilizar fuentes de radiación artificial. En este sentido es crítico maximizar tanto rendimiento cuántico del catalizador (aprovechamiento de la radiación absorbida) como la eficiencia fotónica del reactor en la captación de la energía.

Se trata de una tecnología especialmente indicada para el tratamiento de caudales de agua relativamente bajos dado que el factor de escala de las tecnologías fotoquímicas es cercano a la unidad.

La fotocatálisis heterogénea ha sido aplicada a una gran variedad de contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica, habiéndose demostrado que es una tecnología especialmente efectiva para el tratamiento fenoles, pesticidas, colorantes, cianuros, y cationes metálicos y para procesos de desinfección de aguas.



Los niveles de calidad del agua regenerada permiten utilizar las caudales en usos de riego e industriales, entre los usos potenciales más rigurosos en cuanto a los niveles permitidos de acuerdo al Real Decreto 1620/2007.

k) Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales

Los procesos Sono-Fenton y Foto-Fenton se basan en el reactivo Fenton, en el que un catalizador de hierro descompone el peróxido de hidrógeno para formar radicales hidroxilo que su vez, descomponen la materia orgánica presente en las aguas a depurar. La presencia tanto de la radiación UV como los ultrasonidos, consigue que se generen una mayor cantidad de radicales, aumentando la eficacia de degradación del proceso combinado.

En este proyecto se estudia la actividad de los sistemas de oxidación basados en el reactivo Fenton combinado con procesos de ultrasonido o radiación UV-visible para la degradación de compuestos farmacéuticos / metabolitos detectados a la salida de estaciones de depuración (EDAR).

Los procesos Fenton pueden aumentar la eficacia de eliminación de los compuestos presentes en aguas, mediante la combinación con ultrasonidos (Sono-Fenton). Estos se basan en dos mecanismos de reacción: uno basado en el ataque de los radicales formados en el proceso de cavitación, y otro basado en la descomposición térmica (pirólisis) en el momento de la implosión de las microcavidades generadas. En el caso de la aplicación de radiación UV (Foto-Fenton) la acción de la radiación UV, favorece la descomposición del compuesto $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$, aumentando la rapidez del proceso.

En ambos casos, se consigue mejorar la eficacia del proceso de oxidación para depuración de aguas.

Se trata de una tecnología especialmente indicada para el tratamiento de caudales de agua relativamente bajos. Los procesos Fenton combinados, han sido aplicados a una gran variedad de contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica, tales como fenoles, pesticidas, colorantes etc.

Se estima un potencial de uso (de acuerdo a los parámetros y niveles de calidad de los caudales regenerados requeridos en el Real Decreto 1620/2007) en actividades de regadío y usos ambientales.



5.2. Resultados obtenidos

A partir de la información recibida correspondiente a los distintos tratamientos se ha elaborado una tabla de rendimientos asociados a fin de poder determinar los usos potenciales de los efluentes regenerados en cada proceso o tratamiento.

La finalidad pretendida no es establecer una clasificación o *ranking* de dichos tratamientos, sino tratar de identificar y relacionar cada uno de ellos con el uso potencial que pudiera destinarse. Medida que pudiera ser considerada dentro del proceso de elección de la mejor tecnología disponible (*MTD* o *BAT*, en siglas en inglés).

El uso/empleo de cada tecnología ha de depender de una serie de factores que se considerarán más adelante. Y siempre considerando la disponibilidad de medios y recursos para poder ser implementados.

Se ha de considerar que un valor cercano al 100% en el rendimiento correspondiente a la eliminación de un parámetro determinado, prácticamente supone la total eliminación de dicho elemento en los efluentes de las aguas regeneradas. En tal caso, este dato implica la total adecuación del agua regenerada para su empleo en aquellos usos más exigentes en la presencia de dicho elemento.

De igual forma, rendimientos por debajo del valor del 70% implicarían reducción de niveles no satisfactorios para aquellos usos más exigentes de acuerdo a la normativa del Real Decreto 1620/2007.

La información recogida no presenta los valores correspondientes a todos los parámetros y contaminantes que pudieran recogerse debido al objetivo marcado en cada uno de los proyectos, en los que pudiera considerarse solamente la reducción o eliminación de un grupo de contaminantes, o tan sólo uno de ellos. Debido a este motivo, los tratamientos aquí relacionados no son plenamente comparables en todos los parámetros posibles de depuración, pero si referidos a los usos potenciales de los efluentes regenerados destinados a reutilización.

Como se ha señalado, rendimientos cercanos al 100% ponen de manifiesto que las aguas regeneradas obtenidas con estos tratamientos son potencialmente utilizables en aquellos usos más estrictos o exigentes con dicho parámetro. En estas circunstancias, a partir de los valores y rendimientos indicados por los grupos de investigación, puede obtenerse una relación de tratamientos con usos potenciales de reutilización.



Tabla 3. Rendimiento tratamientos analizados

PARÁMETROS	Rendimiento (%) ¹											
	1	2	3	4	5	6	7	8a	8b	9	10	11
DQO mg/l	95	99		67	99		50			99		70
DBO5 mg/l	99	60		50	99		20			99		
Turbidez (NTU)			99	82				94	98	99		
TDS (mg/l)								14	98	99		
TSS (mg/l)	95	72	99	54				90	98	99		
VSS (mg/l)				43								
Conductividad (μS/cm)			13					10	98	97		
Salinidad (‰)		36								97		
Coliformes totales (ufc/100ml)			99				99	99	99	99	99	
E. Coli (ufc/100ml)			99					99	99	99		
Cloro (mg/l)		50	80					23	94	50		
SiO ₂ (mg/l)			41					10	93	99		
COT (mg/l)			84	56			25	61	89	95	32	92
Nitrógeno	75			36				58	82	50		
PH									13			
Fósforo	75			33				28	99			
Grasas	95											
Bicarbonatos			68		30			2	90	99		
Carbono inorgánico (Cl) (mg/l)				17								
Productos farmacéuticos dopados (mg/l)				84			99			90		
Proteínas (mg/l)								38	95			
Polisacáridos (mg/l)								62	84			
Sulfatos (mg/l)								1	65			
Calcio (mg/l)								1	99			
Magnesio (mg/l)								18	90			
Potasio (mg/l)								2	84			

Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por los grupos de investigación correspondientes. ⁽¹⁾ 1- Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales. 2- Reutilización de aguas depuradas para el desarrollo de una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Delta del Llobregat. Primera fase (ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas). 3- Biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor). 4- Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación. 5- Oxidación Húmeda Catalítica. 6- Procesos de electrocoagulación/electrolisis para



regeneración de aguas⁶. 7- Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR. 8a- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF para su reutilización en usos industriales. 8b- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF y OI para su reutilización en usos industriales. 9- Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración. 10- Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales. 11- Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.

Tabla 4. Usos potenciales según tratamiento

USOS ⁷	Tratamientos										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Calidad 1.1	a		■					■	■	■	
	b		■				■	■	■	■	
Calidad 1.2	a		■				■	■	■	■	
	b		■				■	■	■	■	
	c		■				■	■	■	■	
	d		■	■			■	■	■	■	
Calidad 2.1	a		■	■			■	■	■	■	
Calidad 2.2	a		■	■	■		■	■	■	■	
	b		■	■	■		■	■	■	■	
	c		■	■	■		■	■	■	■	
Calidad 2.3	a	■	■	■	■	■		■	■	■	■
	b	■	■	■	■	■		■	■	■	■
	c	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Calidad 3.1	a		■	■			■	■	■	■	
	b		■	■			■	■	■	■	
	c		■					■	■	■	
Calidad 3.2	a		■					■	■	■	
Calidad 4.1	a		■	■	■	■		■	■	■	■
Calidad 4.2	a	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Calidad 5.1	a	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Calidad 5.2	a	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Calidad 5.3	a	■	■	■	■	■		■	■	■	■
	b	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Calidad 5.4	a	■	■	■	■	■		■	■	■	■

⁶ Información sobre rendimientos no facilitada.

⁷ Niveles de calidad y requisitos conforme a Real Decreto 1620/2007. Ver ANEXO II. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN SUS USOS (REAL DECRETO 1620/2007).



Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por los grupos de investigación correspondientes. ^() 1- Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales. 2- Reutilización de aguas depuradas para el desarrollo de una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Delta del Llobregat. Primera fase (ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas). 3- Biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor). 4- Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación. 5- Oxidación Húmeda Catalítica. 6- Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas. 7- Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR. 8- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF/OI para su reutilización en usos industriales. 9- Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración. 10- Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales. 11- Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.*

De acuerdo a la información facilitada sobre los rendimientos de los diferentes tratamientos, podemos relacionar cuales son aquellos sistemas más convenientes según el destino de las aguas regeneradas. Cualquier tratamiento, de los analizados, puede ser empleado en usos ambientales, siguiendo los niveles y requisitos de calidad de los efluentes. Sin embargo, los usos del agua regenerada en actividades urbanas e industriales requieren de niveles de calidad más rigurosos, por lo que los sistemas de tratamiento que pueden ser empleados serán menos numerosos.

Consideración aparte es el tratamiento respecto a los costes de los diferentes tratamientos. Dado que la inmensa mayoría de las tecnologías aplicadas se encuentran en fase de experimentación, la información aportada por los diferentes grupos ha de ser analizada con ciertas reservas y precauciones.

Siguiendo las instrucciones proporcionadas en las reuniones anuales de coordinación del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA, los diferentes grupos estimarían el coste de explotación a partir de las necesidades de inversión y de tratamiento conforme a una serie de criterios más o menos homogéneos. Esto quiere decir, que prácticamente para ninguno de los tratamientos aquí señalados, los costes e información de carácter financiero han supuesto corrientes monetarias reales. Siendo, por tanto, cantidades estimadas que se incurrirían en la prestación de estos servicios.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha procurado recoger información que facilitara el proceso de toma de decisiones acerca de la elección entre distintas tecnologías a partir de indicadores de consumo energético, costes de inversión, costes de mantenimiento y coste total.

Como es lógico, se han de establecer las correspondientes precauciones a la hora de poder comparar entre diferentes tratamientos a partir de la información disponible. El proceso de cálculo no ha sido homogéneo y, salvo un caso, el resto de la información aportada se ha basado en estimaciones realizadas por el equipo investigador de cada proyecto.



Esto hace que se presenten ciertas inconsistencias en los resultados y valores de los indicadores obtenidos. Situación, no obstante, que no impide abordar la confección de ciertos criterios para establecer procesos de toma de decisiones relacionadas con la elección de procesos y tratamientos para reutilización de aguas residuales.

Estos criterios para seleccionar técnicas y tecnologías de tratamiento deberían fundamentarse en varios elementos. En primer término, el destino, caudales y uso de los recursos regenerados; en segundo lugar en la calidad del agua a tratar; la disponibilidad de factores productivos, tales como mano de obra o energía; seguido de la adecuación de los tratamientos a las condiciones de los procesos.

Existen elementos de decisión que sobrepasan los criterios técnicos. Hay que tener en cuenta ciertos criterios financieros y socioeconómicos, como es la capacidad de pago o capacidad para afrontar los costes por parte de los gestores de las instalaciones. Tratamientos con costes de inversión muy reducidos, pero que presentan elevados costes de mantenimiento, conservación y explotación, pueden no ser adecuados en determinadas situaciones. Y viceversa, situaciones en los que la disponibilidad financiera para inversión es reducida, pero que presentan alternativas de financiación viables de los costes de explotación de las instalaciones.

Con la información facilitada pueden establecerse algunos parámetros de medida que permitan configurar las decisiones referidas a la elección y adecuación de los tratamientos para ciertas situaciones.

Un primer indicador es el proporcionado por el coste anual equivalente de los tratamientos, separado entre los costes de inversión y los de conservación, mantenimiento y explotación de las instalaciones.



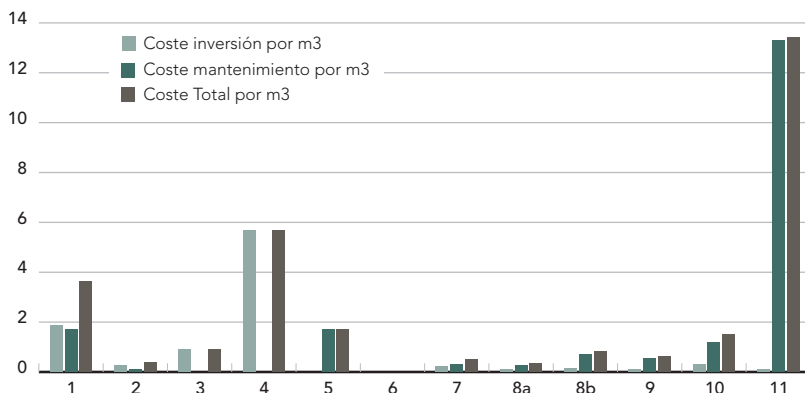
Tabla 5. Información facilitada para el análisis económico y financiero de los distintos tratamientos(*)

PARÁMETROS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								UF	UF+OI		
Volumen (m ³ /año)	502	5.475.000	6.400	3.650	365.000	n/d	365.000	133.152	46.516	86.400	86.400
Inversión (€)	16.363	24.000.000	81.700	200.000	n/d	n/d	1.197.821	122.726	52.325	156.000	465.000
Obra Civil (%)	100%	n/d	79%	30%	n/d	n/d	87%	10%	10%	15%	12%
Instalaciones (%)	0%	n/d	21%	70%	n/d	n/d	13%	90%	90%	85%	88%
Costes Mantenimiento (€)	865	657.000	n/d	n/d	617.763	n/d	110.636	33.943	32.181	45.558	102.872
Consumo energético (kWh/año)	0	n/d	n/d	13.688	5.408.636	0,3 kWh/m ³	146.927	22.400	37.251	61.320	534.360
Uso potencial	Ambiental y riego	Ambiental y riego	Urbano e industrial	Urbano e industrial	Sin especificar	Sin especificar	Urbano e industrial	Urbano e industrial	Urbano e industrial	Urbano e industrial	Riego e Industrial
Coste Anual Equivalente Inversión (€)	946	1.387.922	5.870	20.731	79.482	14.328	6.109	9.021	26.891	8.559	
Costes Mantenimiento (€)	865	657.000		617.763		110.636	33.943	32.181	45.558	102.872	1.148.960
COSTES ANUALES (€)	1.811	2.044.922	5.870	20.731	617.763	190.118	48.271	38.289	54.579	129.763	1.157.519
CAE Inversión por m ³ (€)	1,88	0,25	0,92	5,68	1,69	0,22	0,11	0,13	0,10	0,31	0,10
Costes mantenimiento por m ³ (€)	1,72	0,12				0,30	0,25	0,69	0,53	1,19	13,30
Consumo energético relativo (kWh/m ³)	0,00			3,75	14,82	0,30	0,40	0,17	0,80	0,71	6,18
Coste por m ³ tratado (€)	3,61	0,37	0,92	5,68	1,69	0,52	0,36	0,82	0,63	1,50	13,40

Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por los grupos de investigación correspondientes. (*) 1- Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales. 2- Reutilización de aguas depuradas para el desarrollo de una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Delta del Llobregat. Primera fase (ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas). 3- Biorreactores de membrana (MBR-Membrane Bioreactor). 4- Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación. 5- Oxidación Húmeda Catalítica. 6- Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas. 7- Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR. 8a- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF y OI para su reutilización en usos industriales. 8b- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales. 9- Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración. 10- Aplicación de Fotocatálisis con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales. n/d: no disponible/no facilitada.



Figura 1. Coste medio de los tratamientos analizados



Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por los grupos de investigación correspondientes. Cifras en Euros por metro cúbico. 1- Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales. 2- Reutilización de aguas depuradas para el desarrollo de una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Delta del Llobregat. Primera fase (ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas). 3- Biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor). 4- Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación. 5- Oxidación Húmeda Catalítica. 6- Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas. 7- Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR. 8a- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF para su reutilización en usos industriales. 8b- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF y OI para su reutilización en usos industriales. 9- Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración. 10- Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales. 11- Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.

Este indicador nos proporciona un primer dato acerca del coste medio o unitario (por metro cúbico de agua reutilizable obtenida) de cada uno de los tratamientos. Hay que señalar que no son directamente comparables entre sí todos los tratamientos, dado que existen diferencias respecto a los niveles de calidad de los efluentes tratados, dimensión, cálculos y otras circunstancias que hay que tener en cuenta⁸.

Se ha observado en ciertos tratamientos una correlación entre los costes de inversión y los costes de conservación, mantenimiento y explotación. En aquellos tratamientos con elevada inversión se presentan a continuación unos costes de conservación, mantenimiento y explotación

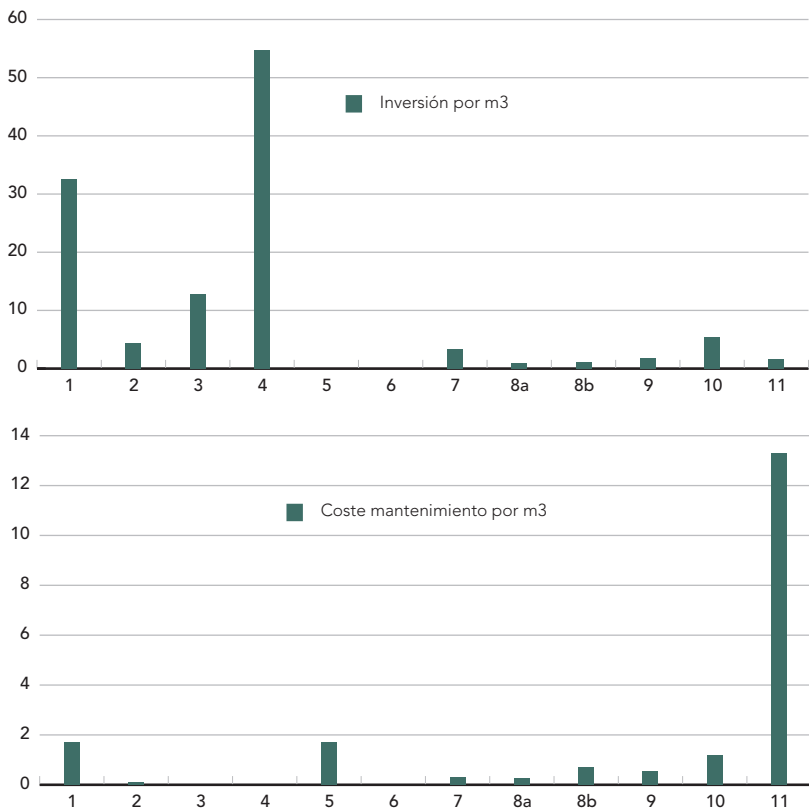
⁸ Entre los que tenemos la falta de información en determinados elementos, como son los costes de mantenimiento y conservación o los costes energéticos.



anuales más reducidos. Y viceversa, algunos tratamientos con baja inversión presentan costes de conservación, mantenimiento y explotación más elevados, respecto a otros tratamientos, al menos en la proporción de costes de inversión respecto a conservación y mantenimiento. Este fenómeno puede ser debido a la existencia de ciertas economías de escala en la dimensión de los proyectos, o a las tecnologías menos consuntivas de recursos una vez instaladas.

En las siguientes figuras se observa este fenómeno descrito. En la medida que la inversión respecto a la capacidad de tratamiento (medida en metros cúbicos de agua regenerada) es mayor, el coste de conservación, mantenimiento y explotación unitario (medido igualmente en términos de €/m³) presenta niveles más reducidos. Es curioso observar como los primeros tratamientos de la lista tienen elevados indicadores de inversión respecto a los últimos tratamientos, mientras que la escala se invierte en el apartado de costes de conservación, mantenimiento y explotación.

Figuras 2 y 3. Inversión por m³ de capacidad de regeneración y coste de conservación, mantenimiento y explotación por m³ regenerado





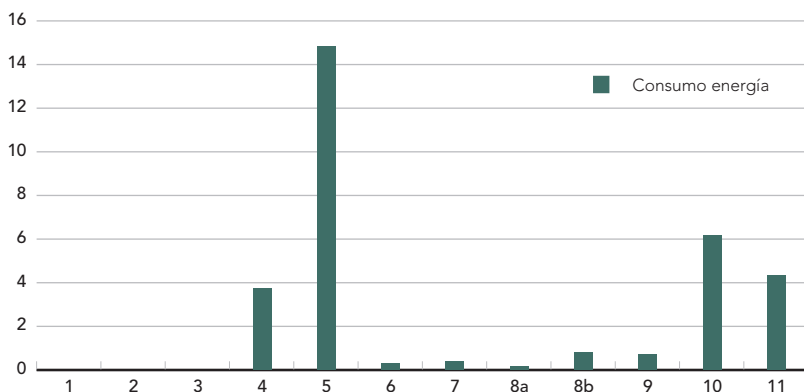
Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por los grupos de investigación correspondientes. Cifras en Euros por metro cúbico. 1- Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales. 2- Reutilización de aguas depuradas para el desarrollo de una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Delta del Llobregat. Primera fase (ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas). 3- Biorreactores de membrana (MBR-Membrane Bioreactor). 4- Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación. 5- Oxidación Húmeda Catalítica. 6- Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas. 7- Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR. 8a- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF para su reutilización en usos industriales. 8b- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF y OI para su reutilización en usos industriales. 9- Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración. 10- Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales. 11- Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.

Este fenómeno será tenido en cuenta en aquellas decisiones referidas a la técnica de tratamiento a adoptar en cuanto la disponibilidad de fondos de inversión (o subvenciones de capital) no presente problemas. Sin embargo, aquellas técnicas y tratamientos con elevados costes de conservación, mantenimiento y explotación deberán tener presente la capacidad de generar recursos financieros para satisfacer los costes de su explotación.

Un elemento del coste de estos tratamientos a tener en cuenta es el que se corresponde con el apartado energético. Bien por su elevado coste, bien sea por su escasez, disponibilidad de energía en determinados entornos, o por motivos ambientales, el consumo energético puede establecerse como un factor más de decisión que debería ponderar en la elección de determinados tratamientos y de acuerdo a los usos posibles del agua regenerada.

En determinadas localizaciones, donde la disponibilidad energética encarece el tratamiento (ya sea por la ausencia de instalaciones o por otro motivo) aquellos tratamientos intensivos en este factor deberían descartarse o, al menos, reconsiderar su estructura y niveles de costes.

Figura 4. Consumo energético medio de los tratamientos analizados





Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por los grupos de investigación correspondientes. Cifras en kWh/m³. 1- Filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales. 2- Reutilización de aguas depuradas para el desarrollo de una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el Delta del Llobregat. Primera fase (ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas). 3- Biorreactores de membrana (MBR–Membrane Bioreactor). 4- Acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación. 5- Oxidación Húmeda Catalítica. 6- Procesos de electrocoagulación/electrolisis para regeneración de aguas. 7- Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR. 8a- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF para su reutilización en usos industriales. 8b- Regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF y OI para su reutilización en usos industriales. 9- Tecnología de Membranas: Ultrafiltración y Nanofiltración. 10- Aplicación de Fotocatálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales. 11- Aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.

No obstante, no toda la información acerca del consumo energético ha sido facilitada para este análisis⁹. Por lo que esta consideración debe tomarse con cautela a partir de la información contenida en este documento.

5.3. Identificación de los tratamientos con los usos potenciales

A partir de la información y los análisis acometidos estamos en disposición de poder presentar una orientación acerca de los tratamientos más adecuados o que pudieran calificarse como *Mejores Técnicas Disponibles* (MTD) o *Best Available Techniques* (BAT), de acuerdo a la adaptación a los usos potenciales del agua regenerada.

En ningún caso quiere decir que los tratamientos señalados no presenten otras alternativas en los usos potenciales o, *sensu contrario*, algún tratamiento no incluido en esta clasificación no pueda emplearse en estos usos. Tan sólo que dichos tratamientos, debido a los requerimientos de calidad y a los rendimientos ofrecidos, pueden presentar niveles más adecuados en la regeneración de aguas residuales que se adaptan a dichos usos.

Siguiendo la clasificación de la calidad del agua obtenida en relación a los usos contemplados en el Real Decreto 1620/2007, podemos asignar cada una de los tratamientos a uno o varios de los apartados de uso, según la calidad requerida y el coste incurrido.

a) Calidad 1. Usos urbanos del agua regenerada

Este uso del agua regenerada es el que, junto con algunos usos industriales, presenta mayores niveles de exigencia en cuanto a la calidad del efluente procedente de las plantas de

⁹ Consultar *Tabla 5* para ver que tratamientos no aportan información referida a este apartado.



guía

tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas

tratamiento utilizado. Sólo aquellos tratamientos que obtengan unos índices de calidad más elevados pueden ser considerados dentro del grupo de *Mejores Técnicas Disponibles* (MTD).

En este caso, los tratamientos de los sistemas de biorreactores de membrana (MBR), Foto-Fenton solar como sistema de tratamiento de efluente de EDAR, la regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías de UF/OI para su reutilización en usos industriales, la tecnología de membranas (Ultrafiltración y Nanofiltración) y la aplicación de Foto-catálisis Heterogénea para el tratamiento y depuración de aguas residuales, proporcionan la calidad requerida de agua regenerada para estos usos.

Suelen ser usos de elevado valor añadido, y el tratamiento requerido para las aguas procedentes de las estaciones depuradoras presenta los costes más elevados. Cualquiera de estos tratamientos puede ser aplicado en otros usos con requerimientos de calidad menos exigentes, pero dados los condicionantes anteriores, es preferible el empleo de otras técnicas y tecnologías menos costosas para usos cuyos parámetros de calidad no sean tan elevados como para los usos urbanos.

b) Calidad 2. Usos agrícolas del agua regenerada

Para la calidad requerida por estos usos, podemos establecer como adecuados los tratamientos apoyados en acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación, la oxidación húmeda catalítica, y la aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.

Estos tres tratamientos alcanzan de forma satisfactoria los niveles de calidad requeridos para poder utilizar el agua regenerada en los usos de regadío.

c) Calidad 3. Usos industriales del agua regenerada

Para estos usos es posible aplicar los mismos tratamientos que en el apartado correspondiente a los usos urbanos, y añadir un tratamiento adicional que sería el correspondiente al acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación.

Todas estas tecnologías cumplen con los requisitos de calidad de sus aguas regeneradas para poder emplearse en estos usos de una manera plenamente satisfactorias. Algunos tratamientos superan, incluso, los niveles de calidad más exigentes.



d) Calidad 4. Usos recreativos del agua regenerada

Para el uso de caudales de agua regenerada en estas actividades, podemos recurrir a los tratamientos correspondientes, en ciertos usos, no en todos ellos; los filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales, los tratamientos basados en ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas, el acoplamiento de sistemas basados en ozono, carbón activo y radiación, la oxidación húmeda catalítica, y la aplicación de procesos Fenton combinados con ultrasonidos (Sono-Fenton) o con UV-Vis (Foto-Fenton) para el tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.

e) Calidad 5. Usos ambientales del agua regenerada

Finalmente, para estos usos, dados los menores requerimientos de calidad del agua regenerada para su uso, el empleo de tecnologías blandas y de bajo coste sería el adecuado para su puesta en marcha.

En este sentido, los tratamientos que se corresponden con el empleo de filtros verdes como sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales, al que se sumarían los tratamientos basados en ósmosis, ultrafiltración y ultravioletas; serían idóneos para el cumplimiento de los criterios y estándares de calidad que se requiere en estos casos.

conclusiones y recomendaciones

guía tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas





De acuerdo a los objetivos propuestos en la presente guía, se ha conseguido establecer una cierta relación entre los tratamientos y su adecuación para el empleo de las aguas regeneradas en determinados usos.

La finalidad pretendida es aportar a todo aquel interesado un memorando para la evaluación de alternativas a considerar en la elección de un sistema de tratamiento para la regeneración de aguas residuales, adaptado a los usos potenciales, según el tipo de tratamiento y los niveles de calidad requeridos (según Real Decreto 1620/2007).

Básicamente, se pone en situación los factores determinantes en la elección entre alternativas de sistemas de tratamientos de regeneración de aguas residuales, relacionando los parámetros de calidad y usos potenciales con la adecuación y viabilidad de las alternativas.

Esta relación se ha obtenido a través de los parámetros de calidad que requiere cada tipo de uso y los niveles que ofrece cada tratamiento. Determinando en estos casos el grado de adecuación para los usos potenciales y cuales son aquellas técnicas que pueden calificarse como *Mejores Técnicas Disponibles* (MTD o BAT en terminología inglesa).

Esto no implica soluciones únicas para cada tratamiento o uso. Esta definición permite establecer relaciones de *adecuación* para cada tratamiento y uso, sin menoscabo de la utilización en otros casos según criterios más amplios de decisión.

La elección de un tratamiento u otro, se enmarca en un proceso de múltiples variables de decisión. Existen elementos de decisión que sobrepasan los criterios técnicos. Ciertos criterios financieros y socioeconómicos, como es la capacidad de pago o capacidad para afrontar los costes por parte de los gestores de las instalaciones, ponen de manifiesto la necesidad de realizar ajustes en los criterios de decisión puramente técnicos. Tratamientos con costes de inversión muy reducidos, pero que presentan elevados costes de mantenimiento, conservación y explotación, pueden no ser adecuados en determinadas situaciones. A pesar de resultar los que mejores niveles de calidad ofrecen en sus aguas regeneradas. Y viceversa, situaciones en los que la disponibilidad financiera para inversión es reducida, pero que presentan alternativas de financiación viables de los costes de explotación de las instalaciones. Bien sea por la posibilidad de traslación a precios a los usuarios, o bien por disponibilidad presupuestaria de los organismos públicos encargados de su gestión.

También ciertos parámetros técnicos afectan al proceso de toma de decisiones. Disponibilidad de terrenos para la ubicación de las instalaciones, disponibilidad energética o coste de dichas instalaciones en ubicaciones alejadas de los centros y redes de distribución energética, etc.



guía

tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas

Todos estos factores presentan circunstancias que deben ser tomadas en consideración en el proceso de toma de decisiones referido a la elección del tratamiento más adecuado para los usos del agua regenerada.

No obstante, es necesario operar con cierta cautela debido a la naturaleza de la información proporcionada para acometer este trabajo. Existen ciertas inconsistencias en la información proporcionada y, en algunos casos, hay ausencias significativas de las mismas. Muchos de los tratamientos estudiados no han pasado de la fase de experimentación y el cálculo de ciertos datos se ha basado en estimaciones.

guía
**tratamientos
avanzados**
de aguas residuales urbanas



bibliografía y referencias



- Ana Zapata Sierra, Sixto Malato Rodríguez, José Antonio Sánchez Pérez (2011), Descontaminación de aguas biorecalcitrantes mediante foto-Fenton solar y oxidación biológica industrial. Editorial CIEMAT, Madrid, Spain.
- D. H. Bremner, R. Molina, F. Martínez, J. A. Melero, Y. Segura (2009), Degradation of phenolic aqueous solutions by high frequency sono-Fenton systems (US- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SBA-15-H}_2\text{O}_2$), *Applied Catalysis Environmental B*, 90, 380-388.
- De Bustamante, I., Lillo, F. J., Sanz, J. M., De Miguel, A., García, E., Carreño, F., Gómez, D., Martín, T., Martínez, F. & Corvea, J. L. (2009), A comparison of different methodologies for designing land application systems: Case study at the Reduena WWTP. *Desalination and Water Treatment*, 4, 98-102.
- Del Villar, A., de Bustamante, I., Gómez, C.M., de Miguel, A. (2011), Land Application Systems and its Assessment on Financial and Economic Criteria: The Experience of CENTA in Sothern Spain. *Ecological Engineering*
- G. Teijón, L. Candela, K. Tamoh, A. Molina-Diaz, A.R. Fernández-Alba (2010), Occurrence of emerging contaminants, priority substances (2008/105/CE) and heavy metals in treated wastewater and groundwater at Depurbaix facility (Barcelona, Spain). *Science of the Total Environment* 408, (17): 3584-3595.
- J. A. Byrne, P Fernandez-Ibañez, P.S.M. Dunlop, D.M.A. Alrousan, J.W.J. Hamilton (2011), Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water: A Review. *International Journal of Photoenergy*, 2011, 1-12.
- J.L. Rodríguez-Gil, M. Catalá, S. González-Alonso, R. Romo Maroto, Y. Varcárcel, Y. Segura, R. Molina, J.A. Melero, F. Martínez (2010), Heterogeneous photo-Fenton treatment for the reduction of pharmaceutical contamination in Madrid rivers and ecotoxicological evaluation by a miniaturized fern spores bioassay. *Chemosphere*, 80, 381-388.
- López-Muñoz, M.J.; Aguado, J.; Arencibia, A.; Pascual, R. (2011), Mercury removal from aqueous solutions of HgCl_2 by heterogeneous photocatalysis with TiO_2 , *Applied Catalysis B: Environmental*, 104, 220-228.
- Marugán, J.; van Grieken, R.; Sordo, C.; Cruz, C. (2008), Kinetics of the photocatalytic disinfection of *Escherichia coli* suspensions. *Applied Catalysis, B: Environmental*, 82, 27-36.
- M.A. Rodrigo, P. Cañizares, C. Buitrón, C. Sáez (2010), Electrochemical technology for the regeneration of urban wastewaters. *Electrochimica Acta*, 55, 8160-8164.



- M.I. Polo-López, I. García-Fernández, I. Oller, P. Fernández-Ibáñez (2011), Solar disinfection of fungal spores in water aided by low concentrations of hydrogen peroxide. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 10, 381-388.
- Ortuño Govern, F.; Niñerola Pla, J.M.; Fraile Maseras, J.; Juárez, I.; Molinero Huguet, J.; Arcos, D. y Pitarch, J.L. (2009), Utilización de agua regenerada en la Barrera Hidráulica contra la Intrusión salina en el acuífero del Llobregat (Barcelona).
- P. Cañizares, R. Paz, C. Sáez, M.A. Rodrigo (2009), Cost of the electrochemical oxidation of wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 90, 410-420.
- P. Cañizares, F. Martínez, C. Jiménez, C. Sáez, M.A. Rodrigo (2009), Technical and economic comparison of conventional and electrochemical coagulation processes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84, 702-710.
- Teijón, G., Tamoh, K., Soler, M.A. y Candela, L. (2008) Resultados preliminares de la puesta en marcha de la primera fase de la barrera hidráulica contra la intrusión marina en el acuífero profundo del delta del Llobregat (Barcelona) contaminantes emergentes. En: F.J. Pérez Torrado y M.C. Cabrera Santana (eds.). VII Congreso Geológico de España. Las Palmas de Gran Canaria. *Geotemas Vol.10.877-880* (ISBN 1567-5172).
- Schiavello, M. (Ed.) (2008), *Photocatalysis and Environment: Trends and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Y. Segura, R. Molina, F. Martínez, J. A. Melero (2009), Integrated heterogeneous sono-photo Fenton processes for the degradation of phenolic aqueous solutions, *Ultrasonics Sonochemistry*, 16, 417-424.

anexo I. ficha para el análisis financiero

guía
tratamientos
avanzados
de aguas residuales urbanas

2



FICHA ANÁLISIS FINANCIERO

TIPOLOGÍA: (señale una categoría)

- Tratamiento avanzado de depuración de aguas residuales.
- Reutilización de aguas residuales.
- Tratamiento avanzado + reutilización.

1. NOMBRE/DENOMINACIÓN DEL PROYECTO

Nombre o denominación de la tecnología y/o aplicación de la actuación.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO (Breve)

Breve descripción de la actuación y su apoyo metodológico y tecnológico. Señalar los principales parámetros de dimensión y capacidad. Uso potencial e interés.

Para información adicional, señalar referencias en publicaciones o contenidos en Internet (URL).

3. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO

Si es posible, mostrar de forma gráfica los procesos e instalaciones. Interés visual y esquemático de la actuación. Indexar referencias si están disponibles a través de la WEB o publicación.



4. PARÁMETROS DEPURACIÓN

(Utilizar los pertinentes para la actuación concreta)

PARÁMETROS	RENDIMIENTOS		
	SALIDA EDAR	SALIDA TRATAMIENTO	%
DQO mg/l			
DBO ₅ mg/l			
Turbidez (NTU)			
TDS (mg/l)			
TSS (mg/l)			
Bicarbonatos (mg/l)			
Conductividad (µS/cm)			
Salinidad (‰)			
Coliformes totales (ufc/100ml)			
E. Coli (ufc/100ml)			
Cloro (mg/l)			
SiO ₂ (mg/l)			
COT (mg/l)			
Otros de interés (señalar)			
...			
...			
Volumen tratado (m ³ anuales/otra)			

Comentarios y descripción

Información adicional para medida de la eficacia/eficiencia. Caudales. Usos potenciales. Factores climáticos...

En caso de reutilización indicar bienes o servicios obtenidos (niveles de recargas de acuíferos -m³/año-, producción vegetal -m³ madera, kg/ha, etc.-, caudales o valores de restauración ambiental logrados, etc.).

5. COSTE INVERSIONES

INVERSIONES	IMPORTE	VIDA ÚTIL
Terrenos (suelo)		
Construcciones		
Equipamiento		
Otros		
TOTAL		



Comentarios e información complementaria

Señalar brevemente los equipamientos (terrenos, maquinaria, instalaciones) necesarios para la puesta en marcha y ejecución de la actuación/proyecto. En tratamientos extensivos señalar la superficie requerida. Descripción de equipos...

Introducir valores monetarios y la vida útil estimada de cada grupo de elementos. Sólo aquellos elementos fijos e indivisibles de las instalaciones (no pequeña maquinaria y herramientas no susceptibles de tener una vida útil más allá de un ejercicio, que se incluirá en el siguiente apartado como costes de mantenimiento y reposición anuales).

6. COSTE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

COSTES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO (ANUAL)	VALOR
Consumo de energía (Kwh/año)	
Coste de la energía (incl. término fijo)	
Personal (Número trabajadores y horas año)	
Coste de personal (i. costes sociales)	
Coste Mantenimiento y Reposición (materiales y reparaciones)	
Eliminación residuos	
Otros costes (administrativos, licencias, financieros, etc.)	
COSTE ANUAL DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO	

Comentarios e información complementaria

Información adicional para medida y dimensionamiento de los tratamientos. Para el consumo energético incluir sólo los correspondientes a las instalaciones. El consumo correspondiente a los equipos de control y autónomos (energía solar) para la investigación no deben incluirse.

Si se dispone de facturación energética independiente en las actuaciones (€), incluirlo en la tabla.

En los costes de personal señalar el número de trabajadores y la dedicación en horas anuales (información para valorar el efecto escala).

La eliminación de residuos se corresponde con aquellos casos en que sea necesario proceder a la evacuación de fangos u otros subproductos no aprovechables en los tratamientos.



7. USO Y APLICACIONES (señalar lo que proceda)

APLICACIONES	ALTO	MEDIO	BAJO	NULO
Usos medioambientales (caudales, recarga, etc.)				
Usos agrarios (regadío)				
Usos urbanos (riego jardines, baldeos, etc.)				
Usos industriales				
Otros				
...				
...				

Comentarios e información complementaria

Descripción de las aplicaciones, volúmenes, etc. Describir el interés económico (si es posible) y alternativas (si son conocidas).

8. COMENTARIOS Y VALORACIÓN GENERAL

Información de interés para el análisis económico y financiero. Valoración general de la actuación y su relevancia frente a otras aplicaciones, procesos o tecnologías.

Incluir bibliografía o referencias de la actuación en publicaciones e Internet.

Persona que cumplimenta la ficha:

Contacto (e-mail, teléfono, etc.):

guía

tratamientos
avanzados
de aguas residuales urbanas

2

anexo II. criterios de calidad para
la reutilización de las aguas según
sus usos (real decreto 1620/2007)



CALIDAD REQUERIDA

USO DEL AGUA	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES ¹	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
1.- USOS URBANOS					
CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL ² a) Riego de jardines privados. ³ b) Descarga de aparatos sanitarios. ³	1 huevo/10 L	0 (UFC ⁴ /100 mL)	10 mg/L	2 UNT ⁵	OTROS CONTAMINANTES ⁶ contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas ⁷ deberá asegurarse el respeto de las NCAs. ⁷ Legionella spp. 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización)
CALIDAD 1.2: SERVICIOS a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares). ⁹ b) Baldeo de calles. ⁹ c) Sistemas contra incendios. ⁹ d) Lavado industrial de vehículos. ⁹	1 huevo/10 L	200 (UFC ⁴ /100 mL)	20 mg/L	10 UNT	

¹ Considerar en todos los grupos de calidad al menos los géneros: *Ancylostoma*, *Trichuris* y *Ascaris*.

² Deben someterse a controles que aseguren el correcto mantenimiento de las instalaciones.

³ Su autorización estará condicionada a la obligatoriedad de la presencia doble circuito señalado en todos sus tramos hasta el punto de uso.

⁴ Unidades Formadoras de Colonias.

⁵ Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

⁶ ver el Anexo II del RD 849/1986, de 11 de abril.

⁷ ver Anexo IV del RD 907/2007, de 6 de julio.

⁸ Norma de calidad ambiental ver el artículo 245.5.a del RD 849/1986, de 11 de abril, modificado por el RD 606/2003 de 23 de mayo.

⁹ Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados.



USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS

2.- USOS AGRÍCOLAS¹

CALIDAD 2.1 ² a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.	1 huevo/10 L	100 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ³ con los siguientes valores: n = 10 m = 100 UFC/100 mL M = 1.000 UFC/100 mL c = 3	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. Legionella spp. 1.000 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización) Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=1.000
--	--------------	---	---------	--------	--

¹ Características del agua regenerada que requieren información adicional: Conductividad 3,0 dS/m ; Relación de Adsorción de Sodio (RAS): 6 meq/L; Boro: 0,5 mg/L; Arsénico: 0,1 mg/L; Berilio: 0,1 mg/L; Cadmio: 0,01 mg/L; Cobalto: 0,05 mg/L; Cromo: 0,1 mg/L; Cobre: 0,2 mg/L; Manganeso: 0,2 mg/L; Molibdeno: 0,01 mg/L; Níquel: 0,2 mg/L; Selenio : 0,02 mg/L; Vanadio: 0,1 mg/L.. Para el cálculo de RAS se utilizará la fórmula:

$$RAS(\text{meq/L}) = \frac{[\text{Na}]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}] + [\text{Mg}]}{2}}}$$

² Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados

³ Siendo n: n° de unidades de la muestra; m: valor límite admisible para el recuento de bacterias; M: valor máximo permitido para el recuento de bacterias; c: número máximo de unidades de muestra cuyo número de bacterias se sitúa entre m y M.



guía

tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
2.- USOS AGRÍCOLAS					
<p>CALIDAD 2.2</p> <p>a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior.</p> <p>b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.</p> <p>c) Acuicultura.</p>	1 huevo/10 L	1.000 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ¹ con los siguientes valores: n = 10 m = 1.000 UFC/100 mL M = 10.000 UFC/100 mL c = 3	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Taenia saginata</i> y <i>Taenia solium</i> : 1 huevo/L (si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne) Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (<i>Salmonella</i> , etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000
<p>CALIDAD 2.3</p> <p>a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana.</p> <p>b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones.</p> <p>c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.</p>	1 huevo/10 L	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> 100 UFC/L

¹ Siendo n: n° de unidades de la muestra; m: valor límite admisible para el recuento de bacterias; M: valor máximo permitido para el recuento de bacterias; c: número máximo de unidades de muestra cuyo número de bacterias se sitúa entre m y M.



USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
3.- USOS INDUSTRIALES					
CALIDAD 3.1 ¹ a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria. b) Otros usos industriales.	No se fija límite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	15 UNT	OTROS CONTAMI- NANTES contenidos en la autorización de vertido aguas resi- duales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respo- to de las NCAs <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L
c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	1 huevo/10 L	1.000 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ² con los siguientes valo- res: n = 10 m = 1.000 UFC/100 mL M = 10.000 UFC/100 mL c = 3	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMI- NANTES contenidos en la autorización de vertido aguas resi- duales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respo- to de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presen- cia/Ausencia (<i>Salmo- nella</i> , etc.) cuando se repite habitualmente que c=3 para M=10.000

¹ Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados

² Siendo n: n° de unidades de la muestra; m: valor límite admisible para el recuento de bacterias; M: valor máximo permitido para el recuento de bacterias; c: número máximo de unidades de muestra cuyo número de bacterias se sitúa entre m y M.



guía

tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
3.- USOS INDUSTRIALES					
CALIDAD 3.2 a) Torres de refrigeración y condensadores evapo- rativos.	1 huevo/10 L	Ausencia UFC/100 mL	5 mg/L	1 UNT	<i>Legionella spp.</i> : Ausencia UFC/L Para su autorización se requerirá: - La aprobación, por la autoridad sanita- ria, del Programa especifico de con- trol de las instalacio- nes contemplado en el Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los crite- rios higiénicosanita- rios para la preven- ción y control de la legionelosis. - Uso exclusivamen- te industrial y en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad públi- ca o comercial.



USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
4.- USOS RECREATIVOS					
CALIDAD 4.1 ¹ a) Riego de campos de golf.	1 huevo/10 L	200 UFC/100 mL	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMI- NANTES contenidos en la autorización de vertido aguas resi- duales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respec- to de las NCAs. Si el riego se aplica directamente a la zona del suelo (goteo, microasper- sión) se fijan los crite- rios del grupo de Calidad 2.3 <i>Legionella spp.</i> 100 UFC/L (si existe ries- go de aerosolización)
CALIDAD 4.2 a) Estanques, masas de agua y caudales circulan- tes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua.	No se fija límite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMI- NANTES contenidos en la autorización de vertido aguas resi- duales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respec- to de las NCAs. P _T : 2 mg P/L (en agua estancada)

¹ Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados.



guía

tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
5.- USOS AMBIENTALES					
CALIDAD 5.1 a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	No se fija límite	1.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	NT ¹ : 10 mg N/L NO ₃ : 25 mg NO ₃ /L Art. 257 a 259 del RD 849/1986
CALIDAD 5.2 a) Recarga de acuíferos por inyección directa.	1 huevo/10 L	0 UFC/100 mL	10 mg/L	2 UNT	
CALIDAD 5.3 a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. b) Silvicultura.	No se fija límite	No se fija límite	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.

¹ Nitrógeno total, suma del nitrógeno inorgánico y orgánico presente en la muestra.

to the 1990s. The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

The 1990s were a period of rapid growth in the number of publications in the field, and the 2000s saw a continuation of this trend. The 2010s have seen a further increase in the number of publications, and the 2020s are likely to see a similar trend.

entidades participantes



Universidad
de Alcalá

instituto
imdea
agua

guía

tratamientos avanzados

de aguas residuales urbanas



w w w . c o n s o l i d e r - t r a g u a . c o m