

**REUTILIZACIÓN DEL AGUA Y
GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**
Aspectos conceptuales, técnicos, reglamentarios y de gestión

Rafael Mujeriego
Catedrático de Ingeniería Ambiental (jubilado)
Universidad Politécnica de Cataluña
rafael.mujeriego@upc.edu

RESUMEN

La reutilización planificada del agua, o simplemente reutilización del agua, es un componente esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos, en cuanto que puede contribuir de forma significativa a aumentar su disponibilidad y su fiabilidad. El agua regenerada ofrece una garantía de suministro muy superior a la de las fuentes convencionales, especialmente en zonas semi-áridas. Los Organismos de Cuenca ofrecen un marco óptimo para implantar la gestión integrada de los recursos hídricos, permitiendo que los requisitos económicos y financieros de la reutilización se integren en el balance global de costes y beneficios de la cuenca. La regeneración de agua para usos no potables ha adquirido un gran desarrollo en numerosas partes del mundo, en particular en las zonas costeras e insulares españolas, donde ha alcanzado unas excelentes cotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y del público en general. La reutilización potable indirecta (RPI) es un concepto innovador con un objetivo claro: generar una fuente no convencional, alternativa o nueva de agua, más fiable frente a la irregularidad meteorológica (mayor auto-suficiencia), dotándola de una de las dos opciones de “naturalidad” posibles: un acuífero costero o un embalse de regulación. La regeneración potable directa (RPD), es una versión aún más innovadora, en cuanto que prescinde de esas opciones de naturalidad, que comienza a ser considerada como una alternativa necesaria en determinadas zonas del mundo desarrollado, especialmente ante la necesidad de disponer de recursos durante las sequías plurianuales y de mejorar la eficiencia energética de los sistemas de tratamiento y distribución del agua. El progreso de la reutilización del agua no depende únicamente de los avances tecnológicos. La existencia de un marco legal y reglamentario específico y de una voluntad política de llevarla a cabo son factores determinantes de su desarrollo. La estrategia de convocar Paneles de expertos seguida en California, en un marco de receptividad de las instituciones responsables de salud pública y de recursos hídricos, ha resultado en un desarrollo espectacular de normativas pioneras para diversas formas de reutilización. Las infraestructuras de regeneración básica disponibles en la Región de Murcia y en el Consorci d’Aigües Costa Brava Girona, y de regeneración avanzada disponibles en el Área Metropolitana de Barcelona y en el Camp de Tarragona ofrecen unos referentes inigualables para implantar un ambicioso programa de seguimiento e investigación con el que impulsar la auto-suficiencia y generar una nueva competencia científica y técnica internacional. El apoyo de las instituciones de salud pública y protección ambiental es esencial para conseguir la aceptación del agua regenerada por parte de todos los usuarios y así satisfacer las necesidades de agua para abastecimiento público, preservación ambiental, regadío y uso industrial. La gestión del agua regenerada debe plantearse desde una nueva perspectiva: estimar su valor, en lugar de limitarse a cuantificar su coste. El mayor coste de las opciones alternativas, como trasvases, desalinización y medidas de urgencia para paliar las sequías ha puesto de manifiesto las considerables ventajas de la reutilización planificada del agua.

INTRODUCCIÓN

La reutilización incidental del agua es un componente intrínseco del ciclo hidrológico. El vertido de efluentes depurados a los cursos de agua y su dilución con los caudales circulantes han permitido durante siglos que las aguas residuales depuradas hayan sido reutilizadas incidentalmente en puntos aguas abajo de los cauces para aprovechamientos urbanos, agrícolas e industriales. La reutilización planificada del agua, o simplemente reutilización

del agua, tiene un origen más reciente (mitad del siglo XX) y supone el aprovechamiento directo de esos efluentes, con un mayor o menor grado de depuración y tratamiento, mediante su transporte hasta el punto de utilización, evitando el vertido o la dilución en los cursos naturales de agua.

El notable desarrollo alcanzado por la reutilización del agua, especialmente en países con recursos hídricos suficientes, se ha debido a dos causas fundamentales: 1) la necesidad de ampliar los abastecimientos de agua y 2) la necesidad de mejorar la gestión de los vertidos de efluentes depurados. El incremento registrado por las dotaciones de agua de abastecimiento, junto con los aumentos de población experimentados en numerosas zonas urbanas, especialmente de carácter metropolitano, y la mayor sensibilidad ambiental respecto a la protección de los cursos naturales de agua han hecho que las fuentes de abastecimiento tradicionales sean insuficientes para atender las actuales demandas de agua. Las distancias crecientes entre las nuevas fuentes de abastecimiento y los núcleos urbanos, las limitaciones ambientales para construir nuevos embalses y las reiteradas sequías plurianuales han llevado a numerosas poblaciones a plantearse la utilización de sus efluentes depurados como fuente adicional de agua para aprovechamientos de muy diversos tipos de calidad. Por otra parte, las crecientes exigencias sanitarias y ambientales sobre la calidad de las aguas continentales y marinas, junto con los requisitos de ubicación y los niveles de tratamiento cada vez más estrictos impuestos a los vertidos de efluentes depurados han hecho que la aplicación de un tratamiento adicional pueda convertirlos en una nueva fuente de suministro de agua, económica y segura tanto desde el punto sanitario como ambiental.

El objetivo general de este capítulo es analizar el papel que la regeneración y la reutilización del agua tienen en la gestión integrada de los recursos hídricos, especialmente en relación con su capacidad para promover la fiabilidad y la autosuficiencia de los recursos hídricos en zonas semi-áridas y con déficits crónicos, como las zonas costeras mediterráneas españolas. Los objetivos específicos de este capítulo son: 1) describir el marco conceptual de la reutilización planificada, 2) analizar los beneficios y las exigencias de la reutilización planificada, 3) presentar las normativas de calidad aplicables al agua regenerada, 4) analizar la fiabilidad requerida a los procesos de regeneración, 5) presentar los diferentes usos del agua regenerada y los procesos de tratamiento utilizados para la regeneración básica y la regeneración avanzada del agua, 6) analizar el papel de la reutilización del agua para riego agrícola, uso industrial y especialmente la reutilización potable, 7) describir el papel de la reutilización en zonas costeras, los costes de la reutilización en España y las nuevas formas de gestión integrada que ello está propiciando, y 8) analizar las consecuencias que las intensas sequías plurianuales están teniendo en el desarrollo normativo y práctico de la reutilización para los más diversos usos.

LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

El proceso de tratamiento necesario para que un agua depurada pueda ser reutilizada se denomina generalmente regeneración y se realiza en una estación de regeneración de agua (ERA). Al producto resultante de dicho tratamiento se le denomina agua regenerada. De acuerdo con su significado etimológico, la regeneración de un agua consiste en devolverle, parcial o totalmente, el nivel de calidad que tenía antes de ser utilizada, de igual manera que la regeneración de suelos y la regeneración de playas tratan de restaurar el estado y la forma

que tenían en el pasado (Asano *et al.*, 2006; Mujeriego, 2007, 1990). El diccionario de la RAE incluye una acepción tecnológica de la palabra regenerar que refleja muy bien este significado: “*someter las materias desechadas a determinados tratamientos para su reutilización*”.

La implantación de un proyecto de regeneración de agua tiene dos requisitos esenciales y complementarios: 1) definir los niveles de calidad aplicables a cada uno de los posibles usos que se piense dar al agua regenerada y 2) identificar los procesos de tratamiento recomendados para alcanzar los niveles de calidad del agua regenerada aplicables a cada uno de los usos previstos. La elaboración y la aprobación de los niveles de calidad aplicables al agua regenerada constituyen generalmente la faceta más discutida de todo programa de reutilización, debido a la dificultad de establecer una relación causal entre la calidad del agua regenerada y los posibles efectos sobre la salud pública y el medio ambiente. Prueba de ello son la diversidad y la heterogeneidad de los criterios y las normas de calidad establecidas por diversos países y organizaciones internacionales sobre la reutilización del agua (USEPA, 2012; OMS, 2006; Ministerio de la Presidencia, 2007; Ministère de la Santé et des Sports, 2014). El reciente Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua para riego agrícola, ilustra los planes de gestión de riesgos que deben establecerse para conseguir la aceptación y el aprovechamiento del agua regenerada para riego agrícola de productos de consumo humano.

La reutilización de un agua regenerada consiste en ponerla a disposición de los usuarios, de modo que puedan utilizarla para un aprovechamiento concreto. El aprovechamiento de un agua regenerada requiere normalmente: 1) su transporte desde la ERA hasta el lugar de utilización, 2) su almacenamiento o regulación temporal para ajustar el caudal suministrado por la ERA a los caudales utilizados por los usuarios y 3) la definición de unas normas de utilización del agua (buenas prácticas de uso) que permitan minimizar los posibles riesgos directos o indirectos para el medio ambiente, las personas que la utilizan o incluso la consumen, la población circundante al lugar de uso y los consumidores de cualquier producto cultivado con el agua regenerada. Estos tres elementos constituyen el núcleo central de un programa de reutilización del agua.

BENEFICIOS DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

El balance hídrico anual de una zona geográfica se obtiene como diferencia entre el aporte de agua constituido por las precipitaciones, los ríos y los acuíferos de la zona, además de los posibles trasvases desde otras zonas, y las pérdidas irre recuperables de agua producidas por su evaporación a la atmósfera o su vertido al mar. Cualquier actuación destinada a conservar agua que consiga reducir esas pérdidas irre recuperables mejorará la disponibilidad de agua para su aprovechamiento a lo largo del año. Por este motivo, la regeneración y la reutilización del agua únicamente resultarán en un incremento neto de los recursos hídricos aprovechables en un territorio cuando con ello se evite que esas aguas se pierden de forma irre recuperable, mediante su vertido al mar desde una población costera o por evapotranspiración desde zonas del interior (Pettygrove y Asano, 1984; Mujeriego, 1990). Aunque la reutilización del agua en territorios interiores (lejos de la costa) no permite la creación neta de recursos hídricos, sí ofrece la posibilidad de una mejor gestión del agua,

mediante la sustitución de aguas superficiales por aguas regeneradas para aquellos usos que no requieran un agua de calidad mejor que la de las superficiales.

La gestión integrada de los recursos hídricos permite utilizar el agua regenerada de muy diversas formas: 1) para reducir los consumos de recursos convencionales, mediante su sustitución por aguas regeneradas y 2) para ampliar la disponibilidad de los recursos convencionales disponibles. La designación del agua regenerada como recurso no convencional, alternativo o nuevo recurso (*NEWater* en Singapur) trata de enfatizar una o varias de esas posibles formas de gestión del agua regenerada.

La reutilización planificada del agua puede tener múltiples beneficios, entre los que cabe destacar los siguientes:

1. Una nueva fuente de suministro de agua, capaz de aportar recursos hídricos adicionales, bien sea en forma de recursos netos, o bien de recursos alternativos que permitan liberar recursos de agua de mejor calidad, que pueden así destinarse a usos más exigentes como el abastecimiento público.
2. Una mayor fiabilidad (garantía) de suministro. Los caudales de agua depurada (materia prima para la regeneración) tienen una garantía mucho mayor que los de la mayoría de las fuentes naturales de agua, especialmente en zonas semi-áridas como las mediterráneas españolas.
3. Un aprovechamiento de los elementos nutritivos contenidos en el agua regenerada, especialmente cuando ésta se utiliza para riego agrícola y de jardinería.
4. Un carácter local y fiable de esta nueva fuente de suministro. Los flujos de agua regenerada suelen estar próximos a las zonas urbanas, lo que evita que deban plantearse trasvases desde otras zonas. No obstante, esta misma característica puede limitar el uso del agua regenerada en zonas agrícolas que estén alejadas de los núcleos urbanos que las producen.
5. Una disminución de los costes de tratamiento y de vertido de los efluentes depurados.
6. Una reducción del aporte de contaminantes a los cursos naturales de agua, en particular cuando la reutilización se efectúa mediante riego agrícola, de jardinería o forestal.
7. Un ahorro energético, al evitar la necesidad de aportes adicionales de agua desde zonas alejadas a la ERA.
8. Una reducción de las aportaciones de dióxido de carbono a la atmósfera, en razón de los menores consumos energéticos.
9. El aplazamiento, la reducción o incluso la supresión de instalaciones adicionales de tratamiento de agua de abastecimiento.

En definitiva, la reutilización del agua ofrece una fiabilidad (garantía) de suministro muy superior a la de las fuentes convencionales, asegurando la disponibilidad de caudales especialmente durante la temporada estival, permitiendo un aprovechamiento de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) contenidos en el agua regenerada y potenciando una gestión más eficiente de los recursos hídricos, haciendo posible que las aguas superficiales de buena calidad puedan utilizarse para usos más exigentes como el abastecimiento público. La proximidad de los caudales de agua regenerada a los núcleos urbanos ofrece una posibilidad de abastecimiento local y fiable, hasta llegar a una reutilización potable indirecta (RPI) o directa (RPD), propiciando así un aumento de su autosuficiencia hídrica y reduciendo su

dependencia de trasvases de agua desde cuencas externas, tanto si estos trasvases son tradicionales o nuevos.

La reutilización del agua constituye, junto con la regulación en embalses en derivación y en acuíferos subterráneos y el uso eficiente del agua, una de las estrategias básicas de la gestión integrada de los recursos en zonas semi-áridas como las del sur de California (Mujeriego, 2004).

NORMAS DE CALIDAD: RD 1620/2007

Uno de los factores determinantes de la implantación y el desarrollo de la reutilización del agua es el establecimiento de unas normas de calidad del agua regenerada para cada uno de los posibles tipos de aprovechamientos que se contemplen. La aprobación del RD 1620/2007 (BOE, 2007), en el que se estableció el régimen jurídico de la reutilización del agua en España y las normas de calidad aplicables al agua regenerada para diversos usos, fue una etapa esencial del desarrollo coordinado de esta actividad en España. Mientras que el régimen jurídico aplicable a la gestión del agua regenerada se enmarcó en los Organismos de Cuenca requeridos por la Directiva Marco del Agua (DOCE, 2000), nuestras Confederaciones Hidrográficas, los límites de calidad del agua regenerada para los posibles usos estuvieron inspirados básicamente en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y los criterios establecidos en la Ley del Agua de California, posteriormente recogidos por la Agencia de Protección Medioambiental de los EEUU (USEPA, 2012); esos límites de calidad ya habían sido adoptados y aplicados por comunidades autónomas como Cataluña, País Vasco, Baleares, Andalucía y Región de Murcia durante la implantación de proyectos de reutilización en décadas anteriores.

La aprobación del RD 1620/2007 significó la culminación de más de 20 años de debates y proyectos, plasmada en los procedimientos administrativos requeridos para utilizar el agua regenerada y los niveles de calidad del agua regenerada requeridos para diversos usos. Esas normas de calidad han sido ampliamente debatidas y cuestionadas, en unos casos por considerarlas demasiado restrictivas y en otros por estar necesitadas de un análisis de riesgo microbiológico y químico, pero sin llegar a plantear las adaptaciones prácticas adecuadas. Esa dinámica responde en gran medida a un tradicional deseo de perfección, falto del pragmatismo necesario para avanzar progresivamente en la actualización, la renovación, la adaptación y la fundamentación del texto inicial del RD 1620/2007, y a la escasa prioridad de nuestra comunidad hídrica por consolidar conocimientos y experiencias en manuales propios, con normas prácticas para diseñar y explotar sucesivas generaciones de proyectos de reutilización.

A esas circunstancias se sumó, durante la segunda década del siglo XXI, la expectativa de disponer de unas normas de calidad aprobadas por la Unión Europea, que satisfagan las expectativas de los usuarios y respalden la legitimidad del uso de agua regenerada. En junio de 2018, la Comisión Europea presentó una propuesta de normativa de requisitos mínimos de calidad para riego agrícola (EC, 2018), para su debate y aprobación por los diferentes Estados miembros. El texto normativo definitivo, en forma de Reglamento (DOUE, 2020), fue aprobado el 25 de mayo de 2020 y entrará en vigor tres años después, el 25 de mayo de 2023. El contenido del Reglamento UE 2020/741 se analiza en un apartado posterior.

El transporte del agua regenerada desde la ERA hasta el punto de reutilización es el requisito que mayor impacto económico puede tener en los proyectos de reutilización no potable, en cuanto que requiere con frecuencia la construcción de una nueva o doble red de distribución, especialmente cuando se reutiliza agua en zonas agrícolas, urbanas o industriales que no disponen de una red de distribución específica previa. Por motivos económicos, la implantación de una red de distribución de agua regenerada para usos no potables suele realizarse de forma progresiva (en mancha de aceite), empezando por los usuarios más próximos y con mayor consumo de agua, y extendiéndola después a zonas urbanas o agrícolas más alejadas y con menores consumos de agua.

Las normas de utilización del agua regenerada son un componente esencial de cualquier estrategia de protección de la salud pública y la calidad ambiental. En general, cuanto mayores sean las restricciones impuestas al uso del agua, referidas al posible contacto con personas, animales o productos comestibles, mayor será el nivel de calidad exigido al agua regenerada. De este modo, mientras que la utilización de agua regenerada para riego de jardinería por aspersión en zonas de uso público suele exigir una filtración y una desinfección del efluente secundario, el riego agrícola mediante emisores enterrados puede realizarse con agua depurada y sometida únicamente a un tratamiento mecánico, suficiente para evitar la obturación de los orificios (goteros) de salida del agua.

Las autoridades sanitarias dedican una especial atención a la definición de las normas de utilización del agua regenerada, tales como: 1) la señalización mediante carteles bien visibles en los que se indique el tipo de agua utilizada, 2) la adopción normalizada del color morado para las conducciones y los dispositivos de control, 3) la instalación de dispositivos anti-retorno, 4) la inspección de las conexiones a la red de agua regenerada, para evitar interconexiones con la red de abastecimiento público, 5) la exigencia de determinados horarios de riego y de tipos de aspersores, 6) la prohibición de instalar grifos exteriores y 7) la posible utilización de tamaños de conducciones y de bocas de conexión de mangueras, diferentes de los utilizados para el agua de abastecimiento público. A este respecto, la aparición progresiva de contadores en el punto de conexión del agua regenerada constituye una indicación clara del objetivo esencial de estos sistemas de distribución: la optimización del aprovechamiento del agua, en lugar de su evacuación y vertido mediante riego. La señalización utilizada actualmente en California y Florida transmite una percepción muy positiva y cotidiana de la reutilización, mediante anuncios tales como *“Este sistema de riego (o de fluxores en los lavabos) utiliza agua regenerada, con objeto de ahorrar agua”*.

REGLAMENTO UE 2020/741

El Reglamento UE 2020/741 (DOUE, 2020) sobre requisitos mínimos para riego agrícola con agua regenerada, en especial para riego de productos de consumo humano, fue aprobado el 25 de mayo de 2020 y entrará en el 25 de mayo de 2023. Este texto normativo fue el resultado de una propuesta inicial de la Comisión Europea presentada en junio de 2018, para su debate y aprobación posterior por los diferentes Estados miembros (EM). El contenido normativo del Reglamento, así como su alcance y exigencias se analizan con detalle en el informe “El Plan de Gestión de Riesgos” elaborado por Mujeriego *et al.* (2020) como aportación de ASERSA al SuWaNu Europe Project, European Commission-Research Executive Agency, Grant Agreement No. 818088.

El Reglamento UE 2020/741 relativo al riego agrícola con agua regenerada ofrece un marco de referencia efectivo con el que promover una mejor gestión integrada de los recursos hídricos, impulsar el ahorro de agua y la economía circular, y posibilitar una aceptación pública cada vez más amplia de este tipo de reutilización de agua, así como de los productos agrícolas de consumo humano cultivados con agua regenerada. El Reglamento tiene también el objetivo esencial de asegurar la movilidad de los productos agrícolas en el territorio de la UE, evitando la posibilidad de que puedan plantearse barreras comerciales o de otro tipo, basadas en un rechazo infundado de los productos agrícolas cultivados con agua regenerada.

La reutilización de agua para riego de productos agrícolas de consumo humano es una práctica con notable tradición en diversos Estados Miembros (EM), en especial los más meridionales, debido fundamentalmente a la menor disponibilidad natural de recursos y las intensas irregularidades meteorológicas propias de esas zonas semi-áridas. La creciente disponibilidad de efluentes depurados, tras la aplicación de las exigencias contenidas en la [Directiva 91/271/EEC](#), han ofrecido a muchas poblaciones costeras mediterráneas la oportunidad de plantearse la regeneración y la reutilización de esos efluentes, en lugar de verterlos al medio marino, y de disponer así de una opción muy favorable para aumentar de forma neta los recursos disponibles para riego agrícola. Estudios realizados por la [Comisión Europea en 2014](#) mostraron que España era el EM con mayor potencial de reutilización de toda la UE, con unos caudales estimados de 550 hm³/año en 2014 y un potencial de reutilización de hasta 1.200 hm³/año en los años siguientes.

La propuesta de Reglamento europeo (publicada en diciembre 2019) planteaba tres retos principales para su implantación satisfactoria: 1) el cumplimiento de unos requisitos de calidad del agua regenerada para riego agrícola de productos de consumo humano, en términos principalmente de *E. coli* y turbiedad, 2) la realización de un proceso de validación de los procesos de regeneración, basados en unos rendimientos de eliminación de organismos indicadores (bacterias y virus) que pueden ser sustituidos por los correspondientes organismos patógenos de interés y 3) la realización de un Plan de Gestión de Riesgos (PGR), que se analiza con detalle en los siguientes párrafos.

Aunque la adopción del PGR supondrá una tarea novedosa para el sector de la regeneración del agua en los EM, en relación con normativas propias o previas que no lo contemplan, los sectores de la potabilización y la depuración en los EM disponen de extensos conocimientos y de amplia experiencia en el campo de la gestión de riesgos, al igual que el sector de la reutilización de otros Estados pioneros como California, donde se viene aplicando desde hace varias décadas.

La correcta aplicación del futuro Reglamento europeo requerirá asegurar que se incluyen dos especificaciones muy concretas de las que carece por el momento y que pueden dificultar su futura aplicación práctica:

1. La identificación inequívoca del número de muestras de agua a tener en cuenta para verificar que el agua regenerada satisface las normas de calidad establecidas en el Anexo I, así como para realizar el proceso de validación incluido en ese mismo Anexo.
2. La adopción de una terminología inequívoca, moderna y realista sobre los calificativos aplicables al “riesgo” asociado con el uso de agua regenerada para riego agrícola. El calificativo más utilizado en otras normativas nacionales e internacionales, tanto sobre

agua como sobre otros factores, es el de “aceptable”, “inocuo” o asociado a un cierto número de DALY. Sin duda, la pretensión de asegurar “un riesgo nulo”, como requiere el Anexo II del Reglamento, es cuando menos irreal e imposible de satisfacer y ofrece una faceta normativa muy controvertida y difícil de superar.

Los protocolos de comprobación del rendimiento de los procesos de tratamiento que se utilizan en España, aplicados durante períodos ininterrumpidos de 1 a 2 semanas, y ocasionalmente de hasta 3 semanas, utilizando muestras compuestas de 24-horas (con posibilidad de muestras puntuales), habrían de servir de referencia para el establecimiento del número y el tipo de muestras utilizadas para completar el proceso de validación de los procesos de regeneración requeridos por el Reglamento. Por otra parte, la consideración de los conceptos de “riesgo aceptable”, adoptado por las recomendaciones de la OMS (2006), y de “inocuidad”, adoptado por la norma ISO 22.000, habrían de ser de gran ayuda para avanzar en la definición del riesgo atribuible al uso de agua regenerada para riego agrícola.

En cuanto al tema de principal interés para la elaboración y la aplicación de un PGR, el texto reglamentario (Artículo 5.3) incluye la previsión de que un PGR “*podrá abarcar uno o más de un sistema de reutilización de agua*” ofreciendo así la posibilidad de que un EM pueda elaborar un único PGR para su aplicación a todas las estaciones de regeneración de agua y los proyectos de riego agrícola de su territorio. Siempre cabría la posibilidad de hacer adaptaciones particulares en función de las peculiaridades del territorio y los cultivos considerados. Es lógico pensar que los peligros potenciales que la presencia de un cierto contaminante del agua regenerada puede suponer para un determinado cultivo no guarda relación con la ubicación geográfica o la demográfica de las estaciones de regeneración y los campos de cultivo agrícola, ni con el tipo de especies o variedades agrícolas cultivadas.

Una estrategia globalizadora como esa permitiría optimizar notablemente los esfuerzos científicos y técnicos necesarios para redactar y actualizar el PGR de los EM y facilitar la conveniente colaboración con entidades europeas especializadas como la Agencia Europea del Medio Ambiente. Siguiendo esa misma estrategia de optimización y coordinación, cabría incluso plantear la posibilidad de que fuera la Agencia Europea del Medio Ambiente la que elaborara el núcleo fundamental del futuro PGR, al que los diferentes EM podrían posteriormente incorporar los condicionantes propios de sus actividades agrícolas. Sería una estrategia muy similar a la que plantea el Reglamento para redactar el marco de referencia de los permisos o autorizaciones que las autoridades competentes de los EM habrán de establecer en sus proyectos de reutilización de agua regenerada para riego agrícola.

Por último, conviene resaltar la importancia trascendental de que las “autoridades competentes” encargadas de elaborar y supervisar la elaboración de los PGR adopten una visión realista, pragmática, visionaria y sólidamente basada en los extensos conocimientos y experiencias disponibles en los EM, y en otros Estados pioneros en reutilización, tanto para riego como para consumo humano indirecto y directo. De ese modo, será posible generar y aplicar unos PGR que ofrezcan una protección “aceptable” de la salud humana, animal y medioambiental, como se hace para muchas otras actividades humanas. Todo ello sin incurrir en una precaución injustificada, basada en prejuicios y temores que no se corresponden con la realidad científica y experimental.

El uso de agua regenerada para riego agrícola se viene practicando desde hace décadas en países líderes en ciencia, tecnología y economía; dificultar innecesariamente su implantación en los EM nos colocaría en una posición de gran desventaja ante los retos de la irregularidad meteorológica, la escasez de recursos y la sostenibilidad ante el cambio climático.

La necesidad de incorporar directamente el Reglamento UE 2020/741 en nuestro ordenamiento legislativo hará necesaria una adaptación del RD 1620/2007, especialmente en lo referente a las normas de calidad y los procesos de autorización de los proyectos de reutilización para riego agrícola. Por otra parte, el RD 1620/2007 incluye normativas relativas a otros cuatro usos diferentes del agua regenerada que no tendrían que verse afectados necesariamente por los requisitos del Reglamento UE 202/741. Conviene resaltar que la exigencia más importante del Reglamento es el establecimiento de un Plan de Gestión de Riesgos para cada proyecto de reutilización, que implicará la aplicación de un Plan de Seguridad del Agua (Water Safety Plan) como forma de asegurar la fiabilidad del proceso de regeneración para satisfacer las normas de calidad requeridas por el Reglamento.

Como se analiza en apartados posteriores, la experiencia acumulada en California sobre la convocatoria de Paneles de expertos, en un marco de gran receptividad por parte de las instituciones responsables de salud pública y de recursos hídricos, ha resultado en un desarrollo espectacular de normativas pioneras no solo para la regeneración básica para riego agrícola y de jardinería, sino también para la regeneración avanzada de agua con la que recargar acuíferos y embalses, e incluso en la reutilización potable directa en los próximos años.

FIABILIDAD DEL PROCESO DE REGENERACIÓN

Una exigencia característica de los proyectos de reutilización de agua es la necesidad de asegurar una fiabilidad notable del proceso de regeneración y una gestión adecuada del sistema de reutilización del agua. La circunstancia de que la reutilización del agua suela plantearse en muchos casos como la única fuente alternativa de agua para el aprovechamiento considerado, sin la protección que la dilución con agua de mejor calidad puede ofrecer y, sobre todo, el que la reutilización de un agua conlleve en muchos casos la posibilidad de un contacto directo con personas, animales o plantas, que pueden verse afectados en su salud o desarrollo, hacen que la fiabilidad de las estaciones de regeneración de agua deba ser elevada y constituya un elemento esencial tanto de su concepción como de su explotación y mantenimiento.

La fiabilidad de los procesos de regeneración pasa así a constituir un elemento esencial de la concepción y la explotación del sistema de reutilización, con prioridad sobre el rendimiento y la eficacia de los propios procesos, que han de satisfacer las normas de calidad establecidas para el agua regenerada. En definitiva, la regeneración del agua se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad, de modo muy similar al que se adopta en las instalaciones de potabilización de agua de abastecimiento público, mediante la implantación de los “*Planes de Seguridad del Agua*”. La producción y la distribución de este producto deben plantearse en un marco más amplio que el tradicional de lucha contra la contaminación, y con una nueva mentalidad en la concepción y la explotación de los procesos de regeneración, diferente a la adoptada generalmente en la

depuración del agua residual, cuyo resultado final suele considerarse un residuo líquido o sólido. Esta forma de plantear la regeneración del agua ha hecho que la reutilización del agua haya pasado a ser un elemento esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos.

La creciente sensibilidad ambiental y sobre todo la protección sanitaria de las poblaciones en posible contacto con el agua regenerada están propiciando que la calidad sanitaria del agua regenerada se aproxime cada vez más, especialmente en zonas desarrolladas, a la “calidad analítica” de un agua potable, aunque ello no implique el consumo humano del agua regenerada. Esta tendencia está haciendo que la producción de agua regenerada se plantee como una actividad asimilable a la producción de alimentos (agua potable en este caso), tanto en cuanto a la calidad de las instalaciones de producción como en la formación, las responsabilidades de los operarios y los controles de calidad aplicables al proceso de regeneración. Esta adaptación es especialmente evidente en los proyectos pioneros de RPI, en los que el agua regenerada es devuelta a un medio natural controlado (acuífero o embalse), manteniendo o mejorando sus niveles de calidad, para que pueda ser posteriormente utilizada como materia prima en la producción de agua de consumo humano.

TIPOS DE REUTILIZACIÓN

Atendiendo a la posible ingestión del agua regenerada por parte de las personas, la reutilización se clasifica en: 1) reutilización para usos no potables y 2) reutilización para usos potables. La segunda categoría incluye las utilidades en que el agua regenerada puede ser ingerida (directa o indirectamente) por las personas en algún momento, mientras que la primera engloba todas las demás. Es importante señalar que, hasta el momento, los proyectos de regeneración para usos no potables son los que han adquirido un mayor desarrollo en numerosas partes del mundo, donde han alcanzado unas excelentes cotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y del público en general. Esto es especialmente aplicable en zonas semi-áridas desarrolladas, donde los recursos hídricos son cada vez más limitados e irregulares y donde la protección ambiental es una prioridad cada vez más destacada. No obstante, el episodio de sequía plurianual registrado en California entre 2012 y 2017 impulsó de forma espectacular la opción de la RPI, como forma de obtener una fuente fiable de agua para consumo humano. El agua regenerada se almacena en acuíferos subterráneos sobre-explotados, de los que posteriormente se puede extraer con regularidad al margen de los déficits pluviométricos locales y las interrupciones de los trasvases desde fuentes mucho más alejadas, afectadas igualmente por la falta de lluvia.

El agua regenerada se emplea para múltiples aprovechamientos, que pueden clasificarse en usos no potables: 1) el riego agrícola, de jardinería y forestal, 2) la preservación y la mejora del medio natural (humedales), 3) los usos ornamentales y recreativos, 4) los usos industriales (refrigeración, agua para producción de vapor, lavado de vagones de ferrocarril), 5) los usos urbanos (jardinería, suministro de aparatos sanitarios, lucha contra incendios, baldeo de calles y lavado de automóviles), a los que se han venido a añadir los usos potables como 6) la recarga de acuíferos, mediante infiltración o inyección, y la recarga de embalses, en ambos casos para su RPI posterior, y 7) la incorporación directa del agua al sistema de abastecimiento para consumo humano, dando lugar a la RPD. La reutilización agrícola y de jardinería constituye el aprovechamiento más extendido del agua regenerada, tanto para cultivos hortícolas (consumo directo) como para cultivos con procesamiento posterior,

cereales, cítricos y viñedos, y tanto mediante riego por aspersión, micro-aspersión y goteo como por riego por inundación.

Como se ha indicado, la reutilización potable del agua puede adoptar dos versiones bien diferenciadas: la RPI, en la que se incluye un amortiguador ambiental, bien sea un acuífero o un embalse, y la RPD, en la que el agua regenerada se utiliza directamente como fuente de agua de abastecimiento. A su vez, la RPD puede adoptar dos formas de incorporar el agua regenerada a la red de abastecimiento, bien sea introduciéndola en la cabecera de la estación potabilizadora de agua, para que se mezcle con los caudales de otras fuentes convencionales antes de su potabilización, o bien mediante su incorporación directa a la red de distribución de agua de consumo público, aguas abajo de la estación potabilizadora de agua existente. Una faceta muy importante de esta última opción es asegurar que los caudales de agua regenerada se mezclan uniformemente con los caudales potabilizados a partir de fuentes convencionales de agua; todo ello con objeto de asegurar que todos los consumidores reciben un agua de la misma composición, con una fracción similar de agua regenerada, evitando así la percepción de una posible discriminación en la composición del agua recibida por los diferentes usuarios.

Como ejemplos ilustrativos de la capacidad de regeneración y de los caudales de agua regenerados (absolutos y relativos) actualmente en diversas zonas del mundo, cabe citar que la reutilización planificada de agua en el Consorci d'Aigües Costa Brava Girona durante el año 2020 fue de 2,4 hm³/año, lo que representó un 8 % de los 31 hm³/año de agua depurada en sus instalaciones; esa cota había alcanzado un 20 % en 2006, para un caudal de efluente depurado de 30 hm³/año. En la Región de Murcia, la reutilización para riego agrícola alcanza un 95 % de los 110 hm³ de efluente depurado anualmente en sus instalaciones; aproximadamente un 50 % se reutiliza incidentalmente (vertido a cauce público y posterior extracción) y otro 50 % se reutiliza de forma planificada.

En California, la reutilización del agua en 2019 alcanzó un caudal de 850 hm³/año (880 hm³/año en 2015; 825 hm³/año en 2009; 650 hm³/año en 2001 y 330 hm³/año en 1987), lo que representa una disminución anual del 3,8 % con respecto a 2015. Conviene indicar que el "[Informe Volumétrico Anual 2019](#)" de California no incluye la categoría de usos destinados a "sistemas naturales/restauración" que sí había sido incluida en anteriores valoraciones. La razón de esa exclusión es que los usos en cuestión no figuran estrictamente entre los aprovechamientos considerados como reutilización por las normas vigentes.

[En 2020, Florida](#) disponía de 413 estaciones depuradoras con capacidad para regenerar agua utilizando los 2.240 hm³/año de efluentes depurados en sus instalaciones. Los 408 proyectos de reutilización existentes usaron 1.220 hm³ anuales de agua regenerada, lo que representa un aprovechamiento del 55 % del efluente depurado. Todo ello sitúa a Florida en el primer puesto de la reutilización en los EEUU, con un uso de 57 m³/hab.año (21,5 millones de habitantes en 2019), mientras que California había alcanzado 21 m³/hab.año en 2019 (39,5 millones de habitantes en 2020). Florida había reutilizado 915 hm³/año en 2006 y 810 hm³/año en 2001.

Como se puede observar, los caudales de agua regenerada reutilizados anualmente en esas zonas son importantes. Aunque en 2019 el porcentaje de reutilización total en California se situaba en torno al 25 %, la proporción en las zonas semi-áridas del sur del Estado es superior

a esa cifra, en razón del creciente interés por la RPI. En este contexto, el 8 % alcanzado por el Consorci d'Aigües Costa Brava Girona en 2020 y del 95 % en la Región de Murcia en 2019 muestran la relevancia relativa que la reutilización del agua tiene en cada territorio.

PROCESOS DE REGENERACIÓN

El proceso de tratamiento necesario para obtener un agua regenerada que satisfaga unos criterios de calidad similares a los propuestos por el RD 1620/2007 (BOE, 2007), la USEPA (2012) o el Reglamento UE 2020/741 (DOUE, 2020) para el riego agrícola o de jardinería en zonas públicas, sin ningún tipo de restricción en cuanto a la exposición y el contacto del público con el agua regenerada, consta fundamentalmente de cuatro elementos principales:

1. La implantación de un programa de control de vertidos a la red de saneamiento que asegure la ausencia de contaminantes que puedan limitar o impedir la reutilización posterior del agua regenerada. La segregación de los posibles flujos contaminantes y la supresión de esas aportaciones al afluente del proceso de regeneración es la forma más eficiente de evitar la presencia de contaminantes en el agua regenerada resultante.
2. Un tratamiento biológico secundario capaz de producir un efluente acorde o mejor que el requerido por los límites de calidad establecidos en la Directiva 91/271 (DOCU, 1991), con un contenido de MES inferior a 35 mg/l y una DBO₅ inferior a 25 mg/l.
3. Un tratamiento posterior destinado a eliminar la MES del efluente secundario y desinfectar efectivamente el efluente regenerado. Este proceso de tratamiento constituye propiamente la fase de regeneración del agua. El alcance y el rendimiento del proceso de regeneración aumentan a medida que la utilización posterior del agua involucra contaminantes adicionales para los cultivos y los consumidores, y especialmente cuando se plantea para usos potables (indirectos o directos). El proceso de regeneración puede adoptar alternativas que incluyen desde procesos naturales hasta procesos convencionales y otros más tecnificados, y que pueden implantarse en instalaciones centralizadas o bien descentralizadas y próximas al punto de uso.
4. Un depósito regulador (construido o natural, como un acuífero) de los caudales de agua regenerada, a fin de equilibrar la producción de la ERA con el consumo de los usuarios, asegurando además una cierta reserva de agua regenerada.

Este proceso de regeneración, que podemos designar como “regeneración básica” para la reutilización no potable, ha de complementarse con otros procesos de tratamiento del agua, más sofisticados y específicos, tanto de tipo mecánico, físico y químico como de tipo natural, cuando se trata de realizar la RPI o la RPD. A este conjunto coordinado de procesos adicionales se le suele designar como “regeneración avanzada”. El objetivo principal de la regeneración avanzada suele ser la disminución del contenido de materia orgánica disuelta, de la que forman parte numerosos contaminantes emergentes de interés como los antibióticos, los disruptores endocrinos, los productos de higiene personal y los compuestos orgánicos indeseables, así como de microorganismos patógenos como los virus. La utilización de membranas de ósmosis inversa, como forma de rebajar el contenido de esos contaminantes hasta niveles casi indetectables, comporta necesariamente la disminución de las sales disueltas y la mejora de la calidad inorgánica del agua. Conviene resaltar que, aunque la desmineralización del agua mediante procesos de ósmosis es el medio elegido actualmente para su regeneración avanzada, la principal preocupación del tratamiento aplicado no es normalmente el contenido salino del agua, sino su contenido de materia

orgánica disuelta. Cabe pensar que, en un futuro, será posible disponer de procesos eficaces para disminuir el contenido de esos contaminantes emergentes, sin tener necesariamente que desmineralizar el agua. Uno de los procesos técnicos que mayor interés despierta para alcanzar ese objetivo es la filtración en carbón activado granular, ampliamente conocido en el sector de la potabilización del agua para la supresión de olores y sabores.

La mayoría, sino la totalidad, de los procesos utilizados para la regeneración del agua son adaptaciones de los procesos usados para su potabilización, a partir fuentes superficiales afectadas por aportaciones de contaminantes (urbanos, industriales, agrícolas) vertidos en puntos aguas arriba de las captaciones. El tratado sobre *Water reuse: issues, technologies and applications*, publicado por Asano *et al.* (2006) contiene una descripción detallada de los diferentes procesos utilizados y en fase de adaptación para la regeneración del agua. El objetivo de calidad más frecuente de los procesos de regeneración básica para riego sin restricción (usos no potables) es la inactivación de los microorganismos patógenos contenidos en el agua afluente (efluente depurado), aunque también puede incluir la reducción de aquellos compuestos químicos contenidos en el agua que puedan ser problemáticos para la calidad de los cultivos o los suelos.

La implantación de la reutilización avanzada de agua, para producir un agua de calidad suficiente para su RPI o incluso RPD comporta inversiones y gastos de explotación y mantenimiento claramente superiores a los de las ERA de regeneración básica. En ciertos casos, es frecuente la creación de empresas mixtas (abastecimiento y saneamiento), en cuanto que los beneficios de la reutilización son múltiples, alcanzando tanto al sector del abastecimiento como al del saneamiento. En otros casos, la responsabilidad del proyecto es asumida por las Agencias del Agua, que por su propia naturaleza se ocupan de la gestión integrada del agua, incluyendo el saneamiento y el abastecimiento. Un ejemplo del primer caso es el proyecto Groundwater Replenishment System (GWRS) promovido por las entidades de abastecimiento (OCWD) y saneamiento (OCSD) del Orange County en California. Un ejemplo del segundo caso es el proyecto de regeneración de agua del Área Metropolitana de Barcelona, impulsado por la Agencia Catalana del Agua y operado por la empresa mixta de la propia Área Metropolitana de Barcelona. En otros casos, como el del Consorci de Aguas de la Costa Brava Girona o la Región de Murcia (ESAMUR), son las propias entidades las que han impulsado los proyectos y se ocupan de su explotación, en colaboración con los usuarios.

REUTILIZACIÓN DE AGUA PARA RIEGO

Cada aprovechamiento de agua regenerada tiene unas exigencias específicas de calidad físico-química y microbiológica, derivadas del destino directo o indirecto previsto para el agua utilizada. Así, el riego de parques y jardines conlleva unas exigencias de calidad físico-química del agua que permitan asegurar el normal desarrollo y mantenimiento de las especies vegetales que se desea regar. Entre los parámetros de calidad más evidentes aparecen la salinidad (medida generalmente en términos de su conductividad eléctrica), su contenido de cloruros y su contenido de boro. Estas limitaciones están claramente definidas en los manuales y estudios de riego agrícola y de jardinería, algunos de los cuales se han convertido en documentos de referencia en el campo del riego con agua regenerada (Levine y Asano, 2004; Asano, 1998; Mujeriego, 1990), y de las buenas prácticas de gestión de la

jardinería y del cultivo agrícola en general (Sala y Millet, 1995). Los límites establecidos en estas normas no son generalmente estrictos y varían en función de las especies vegetales en cuestión. La experiencia agronómica disponible permite ajustar el uso del agua regenerada a las posibles oscilaciones de estos parámetros de calidad, sin por ello alterar significativamente la calidad de los cultivos regados.

Mientras que la existencia de redes secundarias de distribución de agua regenerada para regadío es muy limitada, o inexistente en Europa, la explotación de redes secundarias de este tipo de agua de riego es una práctica muy común en numerosos municipios de California, Florida e incluso Japón, donde constituye una faceta cotidiana de los servicios de distribución de agua y saneamiento, y donde el público acepta e incluso promueve abiertamente esta práctica dentro de sus municipios. Las Jornadas sobre La Integración del Agua Regenerada en la Gestión de los Recursos, celebradas en octubre de 2005 en Lloret de Mar, Girona (CCB, 2005), puso de manifiesto la existencia de este tipo de redes en la Mancomunidad del Sureste de Gran Canaria para aguas de riego, así como los planes para implantarlas en la Costa del Sol Occidental para el riego de campos de golf. Municipios como Calvià en la isla de Mallorca, El Prat de Llobregat en la provincia de Barcelona y Tossa de Mar y Lloret de Mar en la provincia de Girona disponen desde hace varios años de una red complementaria a la de abastecimiento de agua para consumo humano, mediante la que pueden suministrar agua regenerada para usos urbanos y domésticos de carácter no potable, como son el riego de jardines y el suministro de cisternas de inodoros.

Los criterios básicos que deben guiar la instalación y el mantenimiento de una red secundaria de distribución de agua regenerada no potable son: 1) asegurar que no se produce ninguna interconexión, accidental o de otro tipo, entre la red secundaria de agua regenerada y la red de abastecimiento de agua potable y 2) asegurar la estanqueidad de la red secundaria. La exigencia de evitar las interconexiones directas entre las conducciones de la red secundaria y la red de abastecimiento de agua potable es uno de los objetivos prioritarios de cualquier municipio en que exista tal duplicidad de redes de distribución de agua.

Los criterios adoptados por el sector del agua en los EEUU para satisfacer estas exigencias han sido: 1) utilizar conducciones de calidad similar a las de la red de abastecimiento, aunque pudiendo adoptar distintos tipos de válvulas en los puntos de uso domiciliario y 2) codificar las conducciones de agua regenerada destinada a usos no potables mediante el uso de un color diferenciado, el color morado, junto con una indicación impresa sobre la propia tubería en la que pueda leerse "*agua regenerada*". Una codificación como ésta es actualmente común en los conductos de gas (amarillo), de agua potable (azul) o de agua acondicionada para la industria (verde). Además de esta codificación, los servicios municipales de dichos proyectos se ocupan de asegurar que las conexiones de los usuarios a la red de agua potable y la de agua regenerada para riego se realizan adecuadamente, evitando interconexiones accidentales.

REUTILIZACIÓN INDUSTRIAL

El reciclado interno del agua es una práctica frecuente en las instalaciones industriales. El efluente de un proceso puede ser utilizado en otro cuyas exigencias de calidad son menores. De este modo, el agua puede seguir un flujo a contracorriente del seguido por los productos

del proceso industrial: el agua de mejor calidad se utiliza para las aplicaciones más exigentes y el efluente con una calidad cada vez menor se puede utilizar para las aplicaciones menos exigentes, como la limpieza de materias primas, vehículos e incluso vías de circulación. Las crecientes exigencias de calidad aplicables a los efluentes industriales, como forma de asegurar la protección ambiental, han llevado a la implantación de procesos de depuración industriales cada vez más intensos y amplios, que permiten obtener unos efluentes de calidad suficiente para su reutilización en ciertas etapas de la propia industria. Los episodios de sequía registrados en zonas semiáridas, especialmente costeras y con suministros insuficientes, han potenciado todavía más el interés por impulsar los procesos de depuración y de reciclado como forma de asegurar la fiabilidad (garantía) del suministro. Por último, los numerosos incentivos económicos e incluso comerciales y de percepción de los consumidores han suscitado el interés de las empresas por potenciar su imagen corporativa pasando a ser protagonistas destacados en el reciclado de sus aguas de proceso (con acreditaciones reconocidas) y en la reducción de las demandas de agua externas, como forma de respetar el medio ambiente, las poblaciones limítrofes e incluso disminuir la factura del suministro de agua. Cuando esos procesos de reciclado interno no son viables o suficientes para asegurar una fracción adecuada del suministro, las industrias suelen recurrir a fuentes externas de suministro, como el agua regenerada producida a partir de efluentes municipales depurados.

Un ejemplo ilustrativo de la capacidad del reciclado industrial, incluso en la industria alimentaria, es el proyecto de preparación y envasado de ensaladas y otros vegetales que utiliza las aguas residuales del propio proceso industrial en la factoría Tilmanstone Salads en el Reino Unido (Veolia, 2013). Una vez que esos efluentes son regenerados hasta un nivel de calidad equiparable al del agua de consumo humano, son mezclados con aguas de abastecimiento público y pasan a ser utilizados como nueva fuente de suministro. El proceso de regeneración incluye un tamizado, una flotación con aire disuelto, un tratamiento biológico de membranas, una ultrafiltración, una nano-filtración y una desinfección con luz ultravioleta, asegurando así que el agua regenerada cumple con los requisitos del *Drinking Water Inspectorate*. Los beneficios económicos del proyecto son destacables: una huella hídrica de un 25 % de la anterior, una notable reducción tanto del coste del agua de abastecimiento como del canon de saneamiento de las aguas residuales y una mayor disponibilidad de agua para la población, equivalente a la dotación de 5.000 residentes.

Uno de los proyectos más destacados de la estrategia de suministrar agua municipal regenerada para usos industriales es el que viene realizando West Basin Municipal Water District ([WBMUD](#)) en el sur de California. El WBMUD fue fundado en 1947, por acuerdo de 5 ciudades al sur de la ciudad de Los Ángeles, con la intención de proteger los acuíferos costeros sobre-explotados y gestionar la intrusión salina mediante la recarga con agua importada desde el río Colorado. La creciente demanda de agua de unas poblaciones en intenso crecimiento intensificó la adquisición de agua importada desde el norte del Estado, hasta que en 1958 se planteó la conveniencia de construir una ERA que permitiera ampliar los recursos disponibles para la recarga y el consumo local.

El primer gran episodio de sequía de la historia de California ocurrió durante los años 1987-92, haciendo que se intensificaran las restricciones y se iniciara la construcción de una ERA que se inauguró en 1995, con dos objetivos principales: 1) el suministro a un campo de golf

local y 2) la inyección de agua en una barrera contra la intrusión salina. Esa misma sequía hizo que varias refinerías próximas se plantearan la conveniencia de optar por un suministro de agua regenerada, fiable y de calidad, a un coste similar, o incluso ligeramente superior al del suministro convencional de agua importada, pero libre de las restricciones propias de la sequía. En ese mismo período entraron en funcionamiento tres ERA satélites en otras tantas refinerías próximas, a la que vendría a sumarse una cuarta ERA en otra refinería en 1999, la primera de los EEUU capaz de producir agua regenerada ultra-pura.

En 2005 se celebró el 10º aniversario de la ERA: una instalación capaz de producir 30 hm³ de agua anualmente, con una red de distribución de 130 km, 206 usuarios de agua regenerada y unos 25,000 escolares participando en sus visitas educativas. La ERA produce 5 tipos de agua regenerada, desde agua apropiada para riego agrícola sin restricción hasta agua desmineralizada para calderas de vapor de baja y alta presión, pasando por agua para recarga de una barrera contra la intrusión salina y para suministro de torres de refrigeración. El episodio de sequía de 5 años consecutivos registrado desde 2012 a 2017 permitió confirmar el éxito de esta iniciativa, en cuanto que los usuarios urbanos e industriales pudieron disponer de los recursos hídricos necesarios, al margen de las intensas restricciones impuestas en las dotaciones de agua y en los trasvases de agua desde el norte del Estado.

Este mismo concepto de regeneración de agua para uso industrial es el aplicado en la ERA de El Camp de Tarragona (Sanz *et al.*, 2015). El proceso de regeneración (básica y avanzada) de esta ERA ha sido patrocinado por la Agencia Catalana del Agua y permite suministrar agua regenerada al complejo petroquímico de Tarragona desde noviembre de 2012. La estrategia operativa de la ERA avanzada de El Camp de Tarragona es producir agua regenerada básica y avanzada en una instalación centralizada. La ERA avanzada tiene una capacidad de 19,000 m³/d (Fase I), estando previstas ampliaciones para producir 29,000 m³/d (Fase II) y 55,000 m³/d (Fase III) en los próximos años. En 2020, la ERA avanzada alcanzó una producción de 5,3 hm³/año. Desde 2014, el proyecto dispone de una instalación satélite de regeneración para producir agua de gran pureza en los emplazamientos de diversas industrias del polígono petroquímico.

REUTILIZACIÓN POTABLE

El debate técnico sobre el alcance y el futuro de la reutilización planificada, y consecuentemente de los medios técnicos para la regeneración de agua en países con destacadas realizaciones en este campo, se centra en estos momentos entre la conveniencia de impulsar la reutilización potable (directa, RPD, o indirecta, RPI) del agua y la precaución de restringir el alcance de la reutilización a los usos no potables que se han venido desarrollando desde hace varias décadas. Este debate técnico, y necesariamente político y social en muchos casos prácticos, está haciendo olvidar con frecuencia una realidad incontestable: el gran éxito alcanzado por la reutilización para usos no potables en numerosos países del mundo y especialmente en Estados con un gran número y diversidad de proyectos como California y Florida y en zonas como la Costa Brava, la ciudad de Vitoria-Gasteiz, el área metropolitana de Barcelona, el área metropolitana de Madrid, la cuenca hidrográfica del Segura o las Islas Canarias, en las que la reutilización planificada ha progresado de forma muy destacada desde los años 1980.

La creciente necesidad de agua para abastecimiento urbano, especialmente en zonas costeras, junto con la disponibilidad física y administrativa de crecientes caudales de efluentes depurados en zonas urbanas muy próximas a los puntos de uso, así como la disponibilidad de procesos de tratamiento de agua con capacidad contrastada para eliminar prácticamente la totalidad de contaminantes conocidos y detectables en las aguas de suministro han propiciado la consideración de los efluentes depurados como una materia prima apta para la producción de agua regenerada con una calidad prácticamente equivalente a la de la mejor agua superficial o subterránea disponible, y con un coste comparable al de las fuentes de agua convencionales. La aplicación de estos procesos de regeneración avanzada, mediante filtración con membranas de desmineralización de agua y de oxidación y desinfección con biocidas de efecto complementario como la luz ultravioleta, el cloro, el agua oxigenada y el ozono, está permitiendo obtener un agua de gran calidad química y sanitaria, superior a la de las mejores aguas superficiales disponibles en esas zonas.

La aplicación pionera y más vanguardista de la RPD del agua es la adoptada por la ciudad de Windhoek, Namibia, en 1968, el primer proyecto de este tipo en el mundo y el de mayor capacidad hasta el momento (Lahnsteiner *et al.*, 2004). La ERA avanzada de Goreangab actual tiene una capacidad máxima de 21.000 m³/día (7,5 hm³/año) y aporta un caudal medio de 18.000 m³/día, lo que representa un 26 % del abastecimiento de agua para consumo humano de la ciudad. La sequía registrada en 2016 hizo que se autorizara un aumento de esa aportación hasta un máximo del 40 %. En 1968, el abastecimiento de agua para consumo humano de Windhoek se venía atendiendo con aguas subterránea (35 %) y aguas superficiales del embalse de Von Bach Dam, situado a 65 km de la ciudad. El agua del embalse era tratada mediante un proceso convencional de potabilización antes de su suministro a la ciudad. La escasa fiabilidad de la fuente de aguas superficiales, debido a la irregularidad de las precipitaciones, hizo necesario plantearse la búsqueda de una fuente alternativa de abastecimiento, siendo el agua regenerada la opción más viable. La primera ERA entró en funcionamiento en 1968 e incluía los procesos de floculación, decantación, filtración rápida en arena, carbón activado granular, desinfección con cloro y estabilización.

La ERA de Goreangab trataba dos tipos de agua: efluente secundario de la EDAR de Gammans y aguas superficiales del embalse de Goreangab. Inicialmente, entre un 3 % y un 8 % del efluente regenerado se mezclaba con aguas de gran calidad obtenidas de pozos y de la potabilizadora de aguas superficiales, antes del suministro a la ciudad. El progresivo deterioro de la calidad del agua del embalse de Goreangab, debido a la intensa contaminación producida por la escorrentía de asentamientos ilegales alrededor del embalse, llevó a plantearse la necesidad de reducir las aportaciones de agua del embalse y compensarlas con el correspondiente aumento de agua regenerada. Ello requirió la rehabilitación y la ampliación de la ERA. La nueva ERA de Goreangab, completada en 2002, dispone de un sistema avanzado de procesos en multi-barrera, al que se han incorporado procesos adicionales de tratamiento: pre-ozonación, ozonación, filtración biológica en carbón activado, filtración mecánica en carbón activado granular y ultrafiltración.

El proyecto Groundwater Replenishment System ([GWRS](#)) gestionado por el Orange County Water District (OCWD) en el sur California es el proyecto de RPI de agua de mayor capacidad, mejor documentado y más emblemático del mundo en su categoría. El proyecto GWRS empezó a producir agua regenerada de gran calidad en enero de 2008, tras más de

30 años de estudios y demostraciones previas. El proceso de regeneración avanzada se alimenta de un efluente secundario producido a pocos metros por el Orange County Sanitation District (OCSD) y produce un agua regenerada de gran calidad, igual o superior a la de muchas de las aguas superficiales disponibles en el Estado para consumo humano. El proyecto GWRS produce 380.000 m³/día desde 2015 y está previsto que alcance su máxima producción de 490.000 m³/d tras la ampliación que se completará en 2023. El agua regenerada se incorpora al acuífero del condado mediante su inyección en los 36 pozos de la barrera contra la intrusión marina (un 35 % del caudal de agua regenerada) y su infiltración en varias balsas (un 65 % de ese caudal) situadas a 21 km tierra adentro de la ERA. El OCWD opera como un proveedor en alta de agua subterránea, mediante la gestión de un acuífero de 70.000 ha que permite abastecer a 2,4 millones de personas en el norte y centro del Condado, a través de 18 compañías municipales y una privada de agua, así como de numerosos usuarios particulares.

El concepto innovador adoptado en el GWRS para la RPI se viene aplicando desde hace años en otros pocos lugares pioneros del mundo, entre los que cabe destacar: 1) el proyecto de [*recarga de dunas costeras de Wulpen*](#), en Bélgica, 2) el proyecto [*NEWater de Singapur*](#) y 3) el proyecto [*Western Corridor de Southeast Queensland*](#) en Australia. Todos estos proyectos tienen un objetivo común: generar una nueva fuente de agua de abastecimiento público, más fiable frente a la irregularidad meteorológica, utilizando procesos de regeneración avanzada casi idénticos: membranas de micro o ultrafiltración, seguidas de membranas de ósmosis inversa y una desinfección final, combinada con una oxidación. Todos estos proyectos hacen uso de una de las dos posibles opciones de “naturalidad”: un acuífero costero en el caso de Orange County y de Wulpen, y un embalse de regulación en el caso de Southeast Queensland y de Singapur.

La ciudad de Hampton Roads, en Virginia, puso en marcha en 2018 el proyecto de demostración [*SWIFT*](#) (Sustainable Water Initiative for Tomorrow) para su proyecto de RPI, en el que el agua producida se infiltra en el acuífero local del río Potomac; la característica significativa del proyecto SWIFT es la incorporación de procesos de carbón activado granular para la adsorción de contaminantes orgánicos, en lugar del proceso de ósmosis inversa generalmente adoptado en otros casos, como el proyecto GWRS.

Desde el año 2018 se vienen desarrollando diversos proyectos de RPD en los EEUU, tanto en fase de demostración como de implantación a escala definitiva, en ciudades como Wichita Falls, Big Spring y El Paso (Texas). El proceso de regeneración avanzada que se está construyendo en El Paso, Texas, permitirá la RPD del agua. Este proyecto es posiblemente el pionero en la RPD del agua en EEUU, en cuanto que el agua producida se incorporará directamente a la red de abastecimiento, sin contar con la amortiguación y el tiempo de reacción que ofrecen los acuíferos o los embalses utilizados en los proyectos de RPI. Esta circunstancia justifica que el proceso de regeneración incluya tanto la utilización de una ósmosis inversa como de una adsorción en carbón activado granular, todo ello con el objetivo de asegurar el mayor grado posible de fiabilidad, robustez y resiliencia para el proceso de regeneración adoptado.

El proyecto de reutilización de agua que se viene desarrollando en Singapur es sin duda el de mayor proyección mediática del mundo, en razón de la magnitud técnica y económica de

sus realizaciones y muy especialmente por el apoyo decidido que el gobierno le ha concedido desde que Singapur se independizó de Malasia en 1965. Singapur ocupa 710 km², está poblado por 5,5 millones de habitantes y tiene una demanda de agua de 2 hm³/día (360 L/hab.día). Sus limitaciones geográficas para recoger y almacenar agua, junto con su dependencia de las transferencias temporales de agua desde Malasia, han hecho que Singapur se convierta en el mayor polo de liderazgo internacional en innovación y desarrollo de la regeneración y la reutilización del agua. La creación de la marca de calidad *NEWater* ha proyectado internacionalmente la imagen de Singapur como un centro tecnológico en donde se recoge el agua residual y se conduce mediante importantes túneles hasta tres importantes estaciones de depuración y regeneración de agua, con un proceso de tratamiento muy similar al adoptado en el proyecto GWRS del OCWD. El agua regenerada de gran calidad, designada como *NEWater* está llamada a satisfacer un 40 % de la demanda y se reutiliza principalmente para el suministro de la industria de telecomunicaciones. Una pequeña parte (estimada entre 3 % y 5 %) se dedica a la RPI, mediante su vertido a embalses de aguas superficiales. La desalinización de agua de mar constituye otro de los pilares fundamentales del proyecto innovador de Singapur, como forma de generar recursos autóctonos adicionales, fiables y de gran calidad.

El Área Metropolitana de Barcelona dispone de un proyecto de demostración para regenerar agua destinada a la recarga de una barrera contra la intrusión salina en el delta del río Llobregat (Mujeriego *et al.*, 2008). Este proyecto es un complemento de un sistema mucho más amplio (con capacidad de 100 hm³/año, 3 m³/s) de regeneración básica de agua para el abastecimiento de zonas húmedas, riego agrícola y provisión de caudales adicionales al río Llobregat. El proyecto de demostración de RPI tiene capacidad para producir 15.000 m³/día (5 hm³/año) con los que alimentar los pozos de una barrera contra la intrusión salina en el acuífero costero del río Llobregat. Los procesos adoptados para la regeneración avanzada del agua son los mismos que los de los proyectos internacionales antes mencionados: ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta.

El municipio de El Port de la Selva, miembro del Consorci d'Aigües Costa Brava Girona, evaluó durante los años 2016 y 2017 la recarga de su acuífero potable con agua regenerada, en calidad de participante en el proyecto de investigación europeo [*Demoware*](#), dedicado a la demostración de la reutilización no potable y la RPI del agua. El proyecto de recarga del acuífero de El Port de la Selva tuvo por objeto demostrar la viabilidad técnica y sanitaria de la RPI del agua, como forma de solventar los problemas de abastecimiento de esta localidad en períodos de sequía; esos problemas vienen motivados tanto por la falta de garantía de su abastecimiento como por el deterioro de la calidad del agua en sus pozos de provisión para el consumo humano, causado por la intrusión marina.

Las sequías experimentadas en Cataluña durante los años 2007-08, con precipitaciones inferiores a 350 mm/año, plantearon serios problemas para proporcionar los 300.000 m³ de agua anuales que requiere El Port de la Selva, alejado de fuentes superficiales de agua y de redes regionales de distribución de esas aguas. El proyecto evaluado consistió en someter el efluente biológico municipal a una regeneración avanzada, sin procesos de ósmosis, impulsarlo aguas arriba de la riera, bajo la que se sitúa el acuífero utilizado para captación de agua de consumo humano, e infiltrarlo en dicho acuífero mediante unas balsas proyectadas al efecto. El proceso de recarga se realizó durante los meses de otoño, invierno

y primavera, como forma de asegurar que los efluentes habían sido depurados de forma efectiva y carecían de aportaciones salinas causadas por posibles intrusiones de agua de mar, tanto superficiales como subterráneas. La capacidad del proyecto de recarga fue de 600 m³/día (90.000 m³/año), equivalente a la mitad del efluente depurado producido anualmente. Desde principios de 2018, el proyecto aguarda un acuerdo operativo entre las autoridades responsables de salud pública, y gestión de recursos hídricos en la región y el municipio.

Hay que resaltar que todas estas infraestructuras de regeneración avanzada ofrecen un banco de pruebas inigualable en el que poder implantar un ambicioso programa de seguimiento e investigación de su capacidad técnica para responder a las inquietudes sanitarias, ambientales y sociales que puedan plantear las autoridades sanitarias y el público en general (Mujeriego, 2009). Los resultados de un programa como ese permitirían, junto con campañas de información, divulgación y participación del público y de todos los agentes sociales, consolidar un referente sólido sobre el que plantearse el desarrollo de la RPI en las zonas costeras como la Costa Brava y el área metropolitana de Barcelona, a la vez que generar un escaparate de competencia científica y técnica internacional en un campo de tanta relevancia como la gestión de los recursos hídricos.

Conviene resaltar que los retos de la RPI del agua son, sin duda, muy diferentes y adicionales a los que ha ofrecido la reutilización no potable hasta el momento y hacen referencia a la aceptación legal y social de las alternativas, mediante formas novedosas de elaborar normas de calidad, y formas de comunicación, de información y de participación, que permitan adoptar nuevas formas de gestión de los recursos hídricos, más diversas y más ágiles que las utilizadas en el pasado. El gran reto de estos proyectos ha sido y sigue siendo su aceptación por parte de las administraciones y del público. Los excelentes procesos de información y de demostración adoptados en OCWD han permitido obtener la aprobación y el impulso de la población, ante una iniciativa que objetivamente supera las mejoras de calidad del agua que se consiguen exclusivamente con los procesos de depuración y dilución en los medios hídricos naturales.

Las tres estrategias fundamentales utilizadas actualmente para impulsar la RPI son: 1) la información y la participación del público, mediante procesos bien organizados, sistemáticos y prolongados, 2) la utilización del medio ambiente natural como un ingrediente imprescindible del proceso de reutilización del agua regenerada y 3) la estrecha colaboración entre administraciones, entidades operadoras y usuarios del agua, como forma de avanzar en la elaboración y la implantación de normativas de calidad aplicables a estos nuevos usos del agua regenerada.

La implantación progresiva de las instalaciones, mediante proyectos de demostración en los que el público puede consultar y comprobar los logros sistemáticos y contrastados de las soluciones propuestas, ha sido un elemento argumental definitivo en muchos casos. La consideración del medio natural (acuífero, embalse, lago) como forma de incorporar el agua regenerada al ciclo natural de los recursos, es un elemento determinante de la aceptación reglamentaria y pública de los proyectos de RPI. El agua regenerada se retorna al medio natural, confiriéndole así “un toque de naturalidad”, o utilizando un “tampón medioambiental” según la terminología inglesa, para que permanezca allí un cierto tiempo de forma controlada y mantenga sus niveles de calidad iniciales, antes de ser captada y, en

ciertos casos, enviada a una planta de potabilización de agua, adonde se le somete a un proceso similar al aplicado comúnmente a las aguas subterráneas de fuentes convencionales.

En general, las ERA que utilizan efluentes depurados municipales y cuyo producto está destinado a usos municipales (riego agrícola y de jardinería) e incluso industrial (refrigeración) suelen ser explotadas por los propios municipios, bien directamente o bien a través de una empresa de servicios. Estas plantas de regeneración guardan un gran parecido con las plantas potabilizadoras de agua, en cuanto que todo el personal está mentalizado sobre la necesidad de producir un agua de calidad satisfactoria mediante la aplicación de los Planes de Seguridad del Agua, y de aplicar medidas correctoras urgentes, ante cualquier alteración del proceso, para evitar que un agua de calidad insuficiente pueda salir de la ERA. Generalmente, los municipios son los encargados de la distribución y la gestión del agua regenerada, directamente o mediante delegación a una compañía pública o privada, constituyendo así un nuevo servicio público de calidad, una especie de servicio de abastecimiento de una “segunda marca” de agua, con la calidad adecuada para el aprovechamiento previsto, que puede incluir la RPI. La coordinación y la comunicación con los usuarios, tanto individuales como colectivos (comunidades de regantes, urbanizaciones, campos de golf, usuarios urbanos), son muy directas y cordiales, a fin de detectar cualquier posible incidente y de disipar cualquier duda que pueda surgir.

Por otra parte, la gestión diferenciada entre la entidad responsable de la depuración de las aguas residuales y la entidad responsable de la regeneración del agua ha proporcionado una solución bien aceptada y muy favorable tanto en el proyecto de GRWS operado por el OCWD como en el proyecto de reutilización de agua de Vitoria-Gasteiz (Del Río *et al.*, 1996; comunicación personal, 2005). Esta opción es la más frecuentemente utilizada en los EEUU debido a que la gestión del agua de abastecimiento la suele realizar una entidad pública (Water District) diferente de la entidad dedicada a la gestión del saneamiento y la depuración (Sanitation District). Estas entidades pueden coordinarse ocasionalmente, como forma de compartir beneficios económicos, ambientales o de otros tipos, creando una nueva entidad dedicada específicamente a la regeneración y la reutilización del agua, como ocurre en el caso del proyecto GWRS, resultado de la colaboración entre el OCWD y el OCSA.

La trayectoria seguida por estos proyectos emblemáticos permite identificar varios de los elementos esenciales de su desarrollo y aprobación: mientras que el proyecto de Wulpen en Bélgica ha tenido una limitada proyección en los medios de comunicación, posiblemente debido a su limitada dimensión (7.000 m³/día de agua regenerada, que representa un 45 % del agua infiltrada en las dunas naturales) y a la participación activa de grupos ambientalistas que han promovido la incorporación en el proyecto de zonas naturales con acceso público, el proyecto de Singapur goza de una intensa proyección mediática y técnica internacional, que ha conseguido popularizar a escala mundial la opción de la RPI, cuando en realidad parece que sólo entre un 3 % y un 5 % del agua regenerada se incorpora a los embalses, siendo el resto dedicada a usos industriales y urbanos. Por otra parte, el proyecto Western Corridor de Australia registró un notable rechazo por una parte de la población, que expresó su temor ante la exposición a contaminantes peligrosos y su rechazo a una decisión que previamente había sido denegada mediante referéndum. El GWRS es realmente el único proyecto de tamaño considerable (130 hm³/año, desde 2015) que ha sabido obtener la aceptación incontestable de la población, en un territorio donde otras propuestas similares

habían fracasado hasta entonces, mediante un programa sistemático de demostración, de información y de participación del público. El proyecto fue ampliado en 2015 para dotarlo de una capacidad adicional de 40 hm³/año, sobre los 90 hm³/año iniciales, con un coste de 143 millones de dólares.

En este contexto de liderazgo internacional sobre nuevas formas de gestión de los recursos hídricos y ante la escasa fiabilidad de los recursos requeridos para el abastecimiento del Área Metropolitana de Barcelona (490 hm³/año), como quedó patente durante los últimos meses del episodio de sequía de 2007-2008, parece razonable plantearse la opción de iniciar una nueva fase, cuando menos exploratoria, sobre el potencial que la RPI tiene para aportar recursos nuevos y fiables al Área Metropolitana de Barcelona. El carácter exploratorio vendría justificado por el tiempo necesario para desarrollar estos conceptos y sobre todo para presentarlos ante la población y las autoridades sanitarias, de modo que pudieran implantarse, si fueran aceptados, antes de los nuevos episodios de sequía que las previsiones climatológicas anticipan para las próximas décadas (Mujeriego, 2008).

Los efluentes secundarios de las estaciones depuradoras de El Prat de Llobregat (100 hm³/año) y de Besòs (160 hm³/año) ofrecen una materia prima con la que obtener unos 210 hm³/año de agua regenerada de gran calidad (mediante membranas de ósmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta unida a una oxidación avanzada) que podrían incorporarse a las masas de agua superficiales y subterráneas del Área Metropolitana, formando así parte de sus futuras fuentes de suministro y liberando caudales de las fuentes desde donde ahora se importa agua. Un proyecto como éste contribuiría considerablemente a mejorar la garantía de suministro en el área abastecida por la empresa pública Aigües Ter-Llobregat y colocaría a Barcelona, a Catalunya y a España a la vanguardia de las nuevas formas de gestión de los recursos hídricos, más acordes con las sequías climatológicas que se anticipan y mucho más respetuosa con el medio ambiente y los usuarios de la cuenca fluvial del río Ter, desde donde se trasvasa agua en estos momentos. El GWRS, junto con el proyecto de El Camp de Tarragona son sin duda las referencias más emblemáticas de RPI, tanto técnica como sociológicamente, que se pueden utilizar para impulsar esta iniciativa vanguardista de gestión del agua.

REUTILIZACIÓN EN ZONAS COSTERAS

El desarrollo urbano, turístico y agrícola actual, especialmente en las zonas costeras españolas, conlleva un importante consumo de agua, tanto para satisfacer los correspondientes usos domésticos como para atender las demandas de una creciente extensión de zonas ajardinadas y agrícolas que sirven de marco lúdico y comercial. La gestión de los recursos hídricos en esas condiciones ha de plantearse con dos objetivos complementarios: 1) la utilización racional del agua, evitando los consumos excesivos y 2) la reutilización del agua para usos no potables, especialmente la jardinería, la agricultura y la mejora ambiental, permitiendo así la creación neta de nuevas dotaciones de agua y evitando el deterioro de las aguas costeras. Entre las actuaciones más acordes con cada uno de esos objetivos cabe citar, de una parte, la educación y la información ciudadana, junto con la reglamentación y las tarifas progresivas y, de otra parte, la regeneración y la reutilización planificada del agua.

Las zonas costeras españolas se caracterizan por el relativo paralelismo entre las mayores producciones de agua depurada que se registran durante la temporada estival y la máxima demanda de agua para riego agrícola y de jardinería que se produce durante esa misma estación. Al margen de las exigencias técnicas y financieras que esas demandas estacionales de agua plantean, tanto en el sistema de abastecimiento como en el de depuración y vertido de los efluentes tratados, la reutilización del agua en zonas costeras ofrece claras ventajas económicas y ambientales en sus diversas alternativas: 1) el riego de jardinería, con lo que conlleva de mejora de las condiciones de vida, del aspecto estético y del carácter lúdico de la zona, 2) el riego agrícola, como fuente de recursos económicos de gran importancia estratégica y 3) la recarga de acuíferos costeros y de zonas húmedas, como forma de proteger unos recursos naturales de gran atractivo y valor ambiental, que son también reservas estratégicas de agua.

Una instalación de regeneración de agua para riego agrícola y de jardinería en las zonas turísticas españolas se ha convertido en un estandarte tecnológico y de prestigio de primera magnitud en todo el sur de Europa y la región mediterránea, confiriéndole una posición de vanguardia en esta faceta de la gestión de los recursos hídricos.

COSTE DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA EN ESPAÑA

La entrada en funcionamiento de diversos proyectos de reutilización para riego de jardinería y agrícola en la Costa Brava, promovidas por el Consorci d'Aigües de la Costa Brava Girona en 1985, y de la ERA de Vitoria-Gasteiz en 1994, promovida por la Comunidad de Regantes Arrato y financiada por la Diputación Foral de Álava, marcaron una primera década del proceso de implantación de la reutilización en España. El logro principal de esa etapa fue documentar la capacidad personal y tecnológica de nuestras instalaciones para obtener un agua regenerada de calidad comparable a la de otros países pioneros, y de utilizarla de forma eficiente para el riego de jardinería y de cultivos de consumo directo e industriales.

La terminación en el año 2004 del primer embalse regulador de aguas regeneradas, como parte del mismo proyecto de gestión integral del agua de Vitoria-Gasteiz, y la expansión de diversos proyectos de reutilización en la Costa Brava y otras zonas españolas marcaron una segunda década de este proceso de desarrollo de la reutilización planificada. El logro más destacado de esta segunda fase fue documentar el coste real de la regeneración y la reutilización del agua a un nivel de calidad y de gestión integrada comparable al de los países líderes en este campo.

Los datos facilitados por los responsables de la explotación de la ERA de Vitoria-Gasteiz (Julio López, comunicación personal, 2006) ofrecieron un valor de referencia inicial para el coste del agua regenerada en España en 0,06 euros/m³. Ese valor era similar al aplicado en diversas comunidades autónomas, como los incluidos en los presupuestos de la Entitat de Sanejament d'Aigües de la Generalidad Valenciana (EPSAR, 2005). Como ejemplo de tarifas aplicables al agua regenerada para riego agrícola y de jardinería, a la salida de la ERA correspondiente, cabe citar las publicadas por el Consorci d'Aigües de la Costa Brava Girona (BOP, noviembre 2013) según las cuales, los cultivos intensivos que usen hasta 30.000 m³/año tenían una cuota fija de 40 €/mes y una cuota variable de 0,10 €/m³, mientras que las comunidades de regantes, con usos superiores a 30.000 m³/año, tenían una cuota fija de

80 €/mes y una cuota variable de 0,015 €/m³. En 2016, la Confederación Hidrográfica del Júcar tenía establecido el coste del agua regenerada para riego agrícola en 0,034 €/m³, que podía reducirse a 0,027 €/m³ si se consideraba el canon de vertido evitado al no verter el agua depurada a cauce público. A título informativo, el canon de regulación del río Turia en ese mismo año, 2016, para captación de aguas superficiales del río era de 0,0014 €/m³.

El plan de reutilización integral de Vitoria-Gasteiz, financiado por la Diputación Foral de Álava (Mujeriego y López, 2008), ofrece un marco de referencia ideal para evaluar las implicaciones económicas que la reutilización planificada del agua comporta:

1. Una inversión de 3,25 millones de euros para construir la ERA básica, con una capacidad de 35.000 m³/día (400 l/s; 12,5 hm³/año).
2. Unos costes anuales de explotación y mantenimiento de la ERA cifrada en 0,4 millones de euros, para producir 12,5 hm³ anuales de agua regenerada con calidad adecuada para riego agrícola sin restricciones.
3. Una inversión de 28 millones de euros para sufragar la construcción de una red de riego de nueva planta con la que distribuir el agua en 10.000 ha, incluyendo los bombeos y un embalse regulador de 7 hm³ en el que almacenar agua regenerada durante el invierno para poder regar durante el verano. La construcción del embalse regulador representó por si solo una inversión equivalente a 1,7 euros/m³ de capacidad (Mujeriego y López, 2006).

Como ilustran estas cifras, las mayores exigencias económicas están asociadas a la reutilización del agua (distribución al usuario), mientras que el coste de la estación de regeneración y sobre todo los costes de explotación y mantenimiento (la regeneración del agua) son comparativamente mucho menores. Esta reflexión permite anticipar que las mejoras en la calidad del agua regenerada, hasta alcanzar unos niveles que permitan el riego sin restricción e incluso la RPI, son de escasa significación relativa cuando se plantea un proyecto de reutilización planificada con visión de futuro, en consonancia con los niveles de salud pública y de protección ambiental propios de una sociedad como la española en el siglo XXI y ante la perspectiva de una irregularidad de precipitaciones como la anticipada por los informes de cambio climático para territorios como la península ibérica.

Conviene resaltar que la mayoría de los proyectos de reutilización planificada del agua que se implantaron en el territorio peninsular, especialmente con anterioridad a la aprobación de RD 1620/2007, fueron promovidos por los propios usuarios, motivados por la necesidad coyuntural de agua. Muchos de esos proyectos fueron realizados en ausencia de un marco regulador que definiera la titularidad del recurso, el régimen económico y financiero (ayudas y cánones), las responsabilidades contractuales, la fiabilidad del proceso y la calidad del agua exigible para cada aprovechamiento, en razón de la ausencia de criterios oficiales de calidad y de requisitos de uso. No obstante, la precaución y la responsabilidad de los promotores junto con el apoyo técnico de las entidades responsables de la tutela del recurso permitieron implantar unos sistemas de regeneración y reutilización de gran calidad y fiabilidad, que han servido para desarrollar un saber hacer autóctono y propiciar estudios específicos sobre la eficacia y la fiabilidad de los procesos, especialmente relativos a la desinfección del agua regenerada, utilizando diversos desinfectantes e indicadores de calidad sanitaria tanto de tipo bacteriano como de tipo vírico ([CCB](#)).

Al margen del éxito alcanzado, el factor limitante de la expansión de estos proyectos ha sido precisamente la ausencia de un marco de gestión integrada, que permita considerar conjuntamente los costes del proceso y los beneficios directos e indirectos (externalidades) que comportan. No hay duda de que muchos de estos proyectos han alcanzado una aceptación muy positiva entre los usuarios y una percepción pública muy favorable, especialmente para el riego de jardinería, de campos de golf y de protección ambiental. Es evidente que el objetivo a conseguir en la tercera década que se inició en 2005 había de ser conseguir que la reutilización planificada se convirtiera realmente en un elemento más de la gestión integrada de los recursos hídricos, mediante acuerdos entre usuarios urbanos, agrícolas y de ocio, en el marco de unas normativas de calidad promovidas y apoyadas por las autoridades de salud pública y de gestión de los recursos hídricos.

Los estudios económicos realizados por el Área Metropolitana de Barcelona (AMB, 2011) para la reutilización básica (agua de calidad apta para riego sin restricciones) indicaban una inversión específica de 0,25 €/m³ de capacidad anual y un coste de explotación y mantenimiento de 0,032 €/m³ de agua regenerada producida. El coste de explotación y mantenimiento para la desmineralización del agua regenerada básica, mediante electrodiálisis reversible (riego agrícola), ascendía a 0,13 €/m³ mientras que la regeneración mediante ultrafiltración y ósmosis inversa (para inyección en barrera contra la intrusión salina) ascendía a 0,20 €/m³. La abundancia de recursos hídricos en muchas de nuestras cuencas hidrográficas desde el año 2008, último de la sequía más reciente, junto con la austeridad presupuestaria aplicada a las inversiones públicas, han llevado a muchos de esos proyectos de reutilización de agua a permanecer en estados próximos a la hibernación hasta bien entrado 2016.

La Tabla 1 resume los costes de inversión y de consumo energético que conllevan la regeneración de agua, la regulación en embalses en derivación y la desalación de agua salobre y marina. Los valores indicados para la regeneración de agua corresponden a unos niveles de calidad adecuados para su utilización en riego agrícola y de jardinería, con calidad suficiente para asegurar unos niveles de protección ambiental y de salud pública comparables a los asociados con el uso de agua potable y capaces por tanto de ser utilizada sin restricción respecto al posible contacto del agua con el público y los cultivos. Los valores indicados para la desmineralización de aguas salobres se corresponden razonablemente bien con los costes asociados a la regeneración avanzada del agua para su reutilización potable indirecta.

La Tabla 1 muestra el incremento de los costes de inversión a medida que se pasa de la regeneración a la regulación y a la desmineralización. Si a ello se añade el período de amortización, resulta claro que los costes unitarios de la regulación son los menores de todos ellos, seguidos por los de la regeneración y los de la desmineralización. Obviamente, la valoración completa de la reutilización requiere tener en cuenta los costes de inversión de la red de distribución que pueda ser necesaria. En definitiva, los costes reales, tanto de construcción como de explotación y mantenimiento de estos proyectos, son muy dependientes de las condiciones concretas (“site specific”) que afectan al lugar geográfico y al momento considerado del proyecto.

El consumo energético de estas tres alternativas marca igualmente una clara distinción entre ellas. Mientras que la regeneración básica tiene unos consumos unitarios inferiores a 1 kWh/m³, la desmineralización de agua salobre alcanza normalmente valores ligeramente superiores a 1 kWh/m³, la regeneración avanzada se aproxima a 1,5 kWh/m³ y la desmineralización de agua de mar se sitúa en torno a 4 kWh/m³. Al margen de estos costes, conviene tener en cuenta también el impacto ambiental que esos consumos eléctricos comporta. Considerando que la aportación media de dióxido de carbono se sitúa en torno a 460 g por cada kWh producido en España y que el derecho de emisión de dióxido de carbono se ha venido situando en unos 20 euros por tonelada, cada kWh consumido en España añade un coste ambiental adicional de hasta 0,01 €/m³ al agua regenerada (básica y avanzada) y de 0,04 €/m³ al agua marina desalinizada.

Tabla 1. Costes de inversión y energéticos de diversas alternativas de gestión, Consorci d'Aigües Costa Brava Girona, Vitoria, ATL, Palma de Mallorca, C. Taibilla, Málaga, Bélgica, Camp de Tarragona, California.

Alternativa	Inversión, Euros.año/m ³	Amortización, años	Energía, kWh/m ³
Regeneración (riego sin restricción)	0,26 (Vitoria, 1995)	15-25	0,001-0,73 (Sala y Serra, 2004)
Regulación (en derivación) (en acuífero)	1,7 (Vitoria, 2004) 2,0 \$ (Calif., 2000) 0,86 \$ (Calif., 2005)	> 100 > 100 25	----
Trasvase Ródano (ATL, 1999) (Estimación 2010)	2,8 (900 M€; 325 hm ³) 3,9 (1270 M€; 325 hm ³)	50	1,7-2,0
Desalación salobre	0,9 (Málaga, 2005-06)		0,8
Regeneración potable	2,4 (Bélgica)	5 (membranas)	----
Regeneración potable	3,4 \$ (2,6 €) (OCWD, 2008)	15-20 (obras y equipos)	1,12 (2016)
Regeneración avanzada	Camp de Tarragona (2015)		0,5
Desmineralización	Camp de Tarragona (2015)		1,2
Desalinización agua de mar (Blanes, Barcelona, Mallorca, Taibilla)	3,0 – 4,0	5 (membranas)	3,5 - 4,0

LA SEQUÍA PLURIANUAL DE CALIFORNIA

El episodio de sequía que afectó a California durante cinco años consecutivos (septiembre 2012-octubre 2017) planteó unos retos de magnitud sin precedentes en la gestión de los recursos hídricos del Estado y en particular sobre el papel que el ahorro de agua, la regulación del agua y la regeneración y la reutilización del agua pueden jugar en su resolución. Los párrafos siguientes resumen algunas de las iniciativas que se han adoptado y se están considerando para afrontar el reto de esta intensa sequía pluriannual.

El artículo de los profesores Jay Lund y Ellen Hanak, del [Centro de Ciencias Hidrográficas](#) de la Universidad de California en Davis, presentó 10 cambios previsibles en la gestión de los recursos hídricos del Estado. Los autores manifestaron que las políticas hídricas de California habían consistido realmente en propiciar y en resistir a los cambios. La

explotación minera del oro, el desarrollo de la agricultura y las ciudades y las prioridades ambientales actuales habían propiciado cambios fundamentales en la gestión, las leyes y la normativa sobre el agua y el suelo. Todos esos cambios fueron motivados por la degradación ambiental y la evolución de la estructura económica y las prioridades sociales del Estado. Los cambios habían sido generalmente lentos y con frecuencia controvertidos. Nuevos cambios habían aparecido en el horizonte, motivados por grandes y prolongados procesos físicos como la elevación del nivel del mar, el calentamiento global, la subsidencia, el agotamiento de las aguas subterráneas y la acumulación de sales y nitratos en las aguas subterráneas. La política y la gestión hídricas de California habían de prepararse para afrontar esas aparentes condiciones inevitables y encontrar soluciones que permitan mantener una economía fuerte y un medio ambiente saludable, facilitando las transiciones para los grupos vulnerables.

En esas circunstancias, el gobernador del estado de California, Edmund G. Brown Jr., declaró el 17 de enero de 2014 el [estado de emergencia hídrica](#) en todo el estado () y ordenó a todos los responsables estatales a adoptar todas las medidas que pudieran ser necesarias para prepararse ante estas condiciones de sequía. El estado se enfrentaba a restricciones de agua en el año hidrológico más seco de su historia. “No podemos hacer que llueva, pero si podemos prepararnos para afrontar mejor las terribles consecuencias con que nos amenaza la sequía en California, incluyendo la dramática reducción de agua para nuestros campos y poblaciones y los mayores riesgos de incendio en zonas urbanas y rurales”. “He declarado este estado de emergencia y pido a todos los californianos que ahorren agua en cualquiera de las maneras que les sea posible”. En su declaración de emergencia, el gobernador Brown instaba a los responsables estatales a que ayudasen a los agricultores y los ciudadanos que pudieran verse perjudicados económicamente por la sequía, asegurando así que el Estado pudiera tener capacidad de respuesta cuando los californianos debieran afrontar restricciones de agua de consumo público. El gobernador también instó a los organismos estatales a que usasen menos agua y contratasen más bomberos, y lanzó una extensa campaña de sensibilización pública destinada a promover el ahorro de agua. La declaración del estado de emergencia fue la continuación de una serie de acciones adoptadas por la administración para asegurar que California estaba preparada ante las condiciones excepcionales de sequía que se estaban registrando.

Para valorar el impacto que la extracción de aguas subterráneas estaba teniendo en California, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, en colaboración con otras agencias, publicó un informe sobre la [subsidencia en las zonas del norte del Valle de San Joaquín](#) durante el periodo 2003-10. Las grandes extracciones de agua subterránea de los depósitos sin consolidar del Valle de San Joaquín habían propiciado una extensa compactación del acuífero con la consiguiente subsidencia del suelo, que alcanzó hasta 8,5 metros entre 1926 y 1970. La traída de aguas superficiales iniciada en los años 1950 a través del Canal Delta-Mendota y a partir de los años 1970 mediante el California Aqueduct dieron lugar a una disminución de los bombeos, la recuperación de los niveles piezométricos y un menor grado de compactación en algunas zonas del Valle del San Joaquín. No obstante, las sequías experimentadas durante los años 1976-77 y 1987-92, junto con la sequía y las restricciones en las asignaciones de agua superficial durante los años 2007-10, redujeron la disponibilidad de aguas superficiales, propiciando un aumento de los bombeos, un descenso de los niveles piezométricos y la reanudación de la compactación. La subsidencia causada por esta compactación había rebajado la lámina de agua y la capacidad de flujo del Canal Delta-

Mendota, el California Aqueduct y otros canales que suministran agua de riego y evacúan aguas de escorrentía. A pesar de que la porción norte del Canal Delta-Mendota registró una estabilidad relativa, con una deformación principalmente elástica, la deformación en las zonas del sur del Canal llegó a alcanzar 540 mm cerca del río San Joaquín durante los años 2008-10, dentro de una zona de 3.200 km² afectada por una subsidencia de al menos 20 mm durante ese mismo período.

Con objeto de ofrecer formas de gestión más sostenibles de los recursos, el Centro de Ciencias Hidrológicas de la Universidad de California en Davis publicó un artículo titulado “[La primera lección de la sequía: modernizar la gestión del agua](#)” en el que señalaba que la sequía estaba poniendo a prueba la forma en que California gestionaba sus recursos hídricos durante periodos de sequía intensa. Los problemas asociados con esa sequía, la más grave de los últimos 30 años, mostraban las oportunidades disponibles para mejorar la forma en que se gestionaba este fenómeno recurrente de su clima. En conjunto, California necesitaba modernizar sus políticas y formas de gestión de la sequía en al menos cuatro facetas: sistemas de mediciones estatales, ecosistemas, aguas subterráneas y precios. Muchos de los cambios sugeridos podrían implantarse con la legislación vigente en ese momento, complementada con pequeños recursos adicionales. El Estado disponía en estos momentos de autoridad para implantar mejoras en las mediciones, la previsión y la planificación de las sequías, incluyendo el uso de caudales ambientales para la protección piscícola durante las sequías. California necesitaba modernizar su preparación ante la sequía. El momento de iniciar esa modernización no era cuando esa sequía hubiera pasado, momento en que las lluvias limpiarían la memoria, sino durante el período de sequía, que es cuando la motivación política y la atención del público alcanzan sus mayores niveles.

El 25 de abril de 2014, el gobernador de California publicó [un nuevo decreto](#) declarando la persistencia del estado de emergencia debido a las severas condiciones de sequía en que se encontraba el Estado. El artículo 10 del decreto ordenaba al Consejo Estatal del Agua que adoptase los requisitos de vertido de efluentes depurados de aplicación estatal que facilitasen el uso de efluentes depurados que, satisfaciendo las normas establecidas por el Departamento de Salud Pública, permitiesen reducir las demandas de suministro de agua potable. El artículo 19 del decreto estableció la suspensión del requisito de realizar una auditoría ambiental en esos casos, tal como establecía la ley de Calidad Ambiental de California, con objeto de que el Consejo Estatal del Agua pudiera adoptar el decreto tan pronto como fuera posible. Esos requisitos de vertido para la posterior reutilización del agua serían únicamente aplicables a los efluentes depurados para usos no potables. La reutilización del agua era un elemento esencial del programa general de gestión de los recursos hídricos locales y regionales. El Departamento de Salud Pública disponía de criterios de calidad para el agua regenerada, contenidos en el capítulo 22 de la Ley del Agua de California (conocidos como los criterios del capítulo 22). Los usos del agua regenerada considerados en ese decreto hacían referencia a efluentes depurados que podían ser utilizados para riego agrícola, jardinería urbana y otros usos no potables. Entre las actividades no autorizadas por el decreto figuraban la recarga de acuíferos, el vertido en lagunas de percolación y la reutilización para abastecimiento humano o de animales.

Esa intensa sequía tuvo unas consecuencias muy importantes sobre la agricultura de regadío, como anticipaban [los modelos predictivos del Centro de Estudios Hidrológicos](#) de la

Universidad de California en Davis. Las previsiones fueron que la sequía reduciría las dotaciones de agua de los regantes del Central Valley en unos 8.000 hm³ de aguas superficiales durante la estación de cultivo, con respecto a sus dotaciones normales. Para compensar esas reducciones, los agricultores debieron recurrir a la extracción de aguas subterráneas con las que compensar unos 6.000 hm³, habiendo de prescindir de los 2.000 hm³ restantes, lo que equivalió a un 7,5% del agua de riego normalmente utilizada en el Central Valley. Ese déficit ocasionó muy probablemente el abandono de unas 190.000 ha de cultivos, un 6% de la superficie de regadío. El Centro estimó que esos ajustes ocasionarían unas pérdidas en las cosechas de 740 millones de dólares, un 3% de los ingresos en años de precipitaciones normales, además de unos 450 millones de dólares adicionales debidos al coste de los bombeos. El coste total de la sequía durante el año 2014 para los agricultores del Central Valley se estimó en 1,2 millardos de dólares (4,8 % respecto a los ingresos en condiciones de lluvia normal) y las pérdidas económicas para la región pudieron alcanzar unos 1,7 millardos de dólares. Los puestos de trabajo perdidos en el campo se estimaron en unos 6.400 (4,2 % de la fuerza laboral normal) que sumados a las pérdidas en puestos de trabajo indirectos pudieron afectar a 14.500 personas.

El problema con la utilización de aguas subterráneas en California es que muchos de sus acuíferos habían alcanzado sus niveles históricos más bajos y algunos de ellos se enfrentaban a posibles restricciones, según un informe del Departamento de Recursos Hídricos de la época, elaborado en respuesta a la declaración de sequía realizada por el gobernador Brown en enero de 2014. A pesar de los grandes perjuicios ocasionados a los agricultores, las poblaciones asociadas y el medio ambiente, el Centro consideró que el conjunto de la economía del estado no había de sentirse amenazada, ya que la agricultura representaba menos del 3 % del PIB del Estado que era de 1,9 billones de dólares en aquel momento.

Para reconducir la gestión descoordinada que se ha venido aplicando a las aguas subterráneas en California y hacer que ésta pudiera ser el último Estado del oeste en regular la extracción de aguas subterráneas, su cámara legislativa se planteó una estrategia sin precedentes sobre la gestión de los acuíferos. Tras largos debates, el congreso californiano aprobó a finales de agosto de 2014 un paquete de tres leyes que otorga al gobierno estatal la tarea de supervisar la extracción de las aguas subterráneas. La [normativa firmada por el Gobernador](#) el 16 de septiembre de 2014 exigía a los gestores de acuíferos de ciertas zonas a redactar planes de protección frente a su sobre-explotación. El Estado podría revisar esos planes y reservarse la potestad de intervenir en caso de que esos planes no llegasen a prepararse o a implantarse. En esos momentos, California podía regular los recursos extraídos desde cauces y embalses, pero carecía de autoridad para supervisar a nivel estatal la extracción de aguas subterráneas. Los propietarios del terreno tenían generalmente el derecho de extraer el agua existente bajo la superficie de sus parcelas. A medida que la disponibilidad de aguas superficiales disminuía a causa de la intensa sequía, los agricultores y otros usuarios iban recurriendo a los pozos como fuente de recursos. Se estimó que un 65 % de los recursos utilizados en California durante el año hidrológico de 2014 procedería de los acuíferos, frente al 40 % utilizado en años normales. Congresistas demócratas y republicanos del Central Valley, cuyos votantes forman esa floreciente zona agrícola del Estado, se opusieron a la nueva legislación. Mientras que los demócratas reclamaban un nivel de apoyo (económico y financiero) similar al concedido a otras recientes propuestas legislativas, los republicanos manifestaban su rechazo a unas leyes deficientemente

elaboradas que darían un mayor control al Estado y que podrían tener efectos devastadores sobre los propietarios de las fincas y sus trabajadores, los negocios, las familias y las poblaciones del Central Valley.

Los votantes de California tuvieron la posibilidad de valorar una propuesta de financiación estatal, por valor de 7,12 millardos de dólares, que fue sometida a referéndum el mes de noviembre de 2014. Esta propuesta de endeudamiento público, designada con el título "[Ley para la mejora de la calidad y el suministro de agua y de las infraestructuras hídricas](#)" fue aprobada por el gobernador Edmund G. Brown Jr. el 13 de agosto de 2014, y apareció como Propuesta no. 1 en el boletín de voto. La Propuesta no. 1 fue aprobada por referéndum popular y asignaba 725 millones de dólares para proyectos de reutilización de agua en todo el Estado y 810 millones de dólares para la gestión integrada regional de los recursos hídricos, con los que se pudieran financiar proyectos hídricos, incluyendo los de reutilización de agua. El consejo de gobierno de la sección californiana de la WasteReuse Association votó unánimemente a favor de esa propuesta de financiación estatal. En palabras de Mike Markus, presidente de la sección californiana y gerente de Orange County Water District, "el desarrollo de proyectos de reutilización de agua en California es una tarea esencial para conseguir la fiabilidad hídrica. A medida que el Estado se enfrenta a una de las peores sequías de su historia, California debe maximizar su potencial de reutilización de agua". Por su parte, Grant Davis, vicepresidente de la sección californiana y gerente de Sonoma County Water Agency, resaltó que "ésta es la única propuesta significativa de financiación estatal para asegurar nuestros suministros futuros de agua regenerada".

AVANCES REGLAMENTARIOS EN CALIFORNIA

La década de los años 2010 registró una intensa actividad reglamentaria sobre la reutilización del agua, especialmente en California, y en relación con la reutilización para el riego sin restricción de productos de consumo crudo, el riego de jardinería, la RPI mediante recarga de acuíferos y de embalses, y las futuras opciones de RPD. Fueron iniciativas de gran interés para todos los interesados en la implantación de la reutilización del agua.

En septiembre de 2012 se publicó el informe final titulado *Review of California's Water Recycling Criteria for Agricultural Irrigation*, en el que se recogen una serie de recomendaciones elaboradas por un Panel Asesor independiente convocado por el National Water Research Institute (NWRI, 2012) y destinadas al Departamento de Salud Pública de Estado. La primera y principal tarea del Panel fue valorar si el agua producida, en conformidad con los criterios de calidad del agua regenerada del Estado, ofrecía la suficiente protección sanitaria para su utilización en el riego de productos de consumo humano.

Mediante un modelo de evaluación cuantitativa de riesgo microbiológico (QMRA), revisado por colegas expertos, el Panel obtuvo estimaciones medias anualizadas del riesgo de infección para tres posibles opciones de reutilización del agua, obtenida mediante tres procesos de regeneración. Las estimaciones medias anualizadas del riesgo de infección resultantes ofrecieron la evidencia adicional necesaria para confirmar que "Unas prácticas agronómicas en consonancia con esas formas de uso no aumentan de forma detectable el riesgo sanitario. Una posible modificación de estas normas de calidad, para hacerlas más restrictivas, no mejoraría de forma detectable el nivel de salud pública".

El Panel confirmó la conveniencia de adoptar una estrategia de regeneración basada en una línea de tratamiento de barreras múltiples capaz de satisfacer los límites de calidad exigidos, incluso cuando se avería la unidad de tratamiento más efectiva. Por otra parte, el Panel resaltó que la desinfección del agua es el proceso crítico de la regeneración para reutilización en riego agrícola y que un fallo total de este proceso resultaría con toda seguridad en el incumplimiento de las normas de calidad microbiológica del agua regenerada. Por este motivo, el Panel recomendó centrar la atención de los operadores en la fiabilidad y el control del proceso de desinfección para los usos no potables de agua regenerada. Por último, el Panel recomendó la utilización de los coliformes totales como indicadores de la calidad sanitaria del agua, en razón del historial tan satisfactorio que estos indicadores habían registrado durante más de un siglo, especialmente para la vigilancia del agua de consumo humano.

El Panel examinó la creciente preocupación creada por la posible incorporación de patógenos humanos en los tejidos vegetales. Aunque había evidencia de que esa incorporación se llegaba a producir en condiciones de laboratorio con exposición a elevadas concentraciones de patógenos, la vía de contaminación microbiológica más realista durante el riego agrícola era la adhesión de esos patógenos a la superficie de las plantas, de modo que su posterior higienización podía ser menos efectiva. Ése pareció haber sido el mecanismo de contaminación asociado con las intoxicaciones alimentarias registradas en el Estado durante esos años, ninguna de las cuales había estado asociada con el uso de agua regenerada para riego. En 2012 no se disponía de pruebas definitivas sobre posibles intoxicaciones alimentarias o infecciones esporádicas asociadas con el riego de productos hortícolas con agua regenerada en California, ni tampoco con el riego extensivo con agua regenerada que se realizaba en Florida. El riego de productos hortícolas con agua regenerada en el condado de Monterey era un ejemplo local y emblemático del uso de agua regenerada durante un largo período de tiempo, durante el que no se habían detectado efectos desfavorables sobre la salud pública.

En junio de 2014, el Departamento de Salud Pública completó la aprobación de la normativa aplicable a la recarga de acuíferos con agua regenerada (State Water Board, 2014). Conviene resaltar que, desde el 1 de julio de 2014, la competencia institucional sobre la calidad del agua regenerada fue transferida desde el Departamento de Salud Pública al Consejo de Recursos Hídricos, dependiente de la Agencia de Protección Ambiental, en cuya página web se puede encontrar el texto reglamentario correspondiente. Este texto reglamentario fue el resultado de varios años de debate y reflexión, para el que se contó con la larga experiencia operativa de diversas agencias dedicadas a la recarga de acuíferos potables con agua regenerada situadas en el sur del Estado y muy especialmente del proyecto GWRS. En la actualidad, la recarga de acuíferos con agua regenerada constituye una línea estratégica de actuación prioritaria, especialmente en el sur del Estado, como forma de asegurar la fiabilidad de los abastecimientos ante irregularidades meteorológicas y climatológicas tan intensas como las registradas durante la sequía de los años hidrológicos 2012 a 2017.

En 2015, la WateReuse Research Foundation publicó un marco de referencia para la RPD (WRRF, 2015), elaborado por un panel de asesores independientes, bajo el patrocinio de las dos grandes asociaciones profesionales del agua, la American Water Works Association y

la Water Environment Federation, junto con el National Water Research Institute. El objetivo de ese documento fue recopilar la información disponible sobre el valor de la RPD como una opción para el abastecimiento de agua e identificar los elementos necesarios para la implantación de un programa de RPD. La adopción de la RPD como elemento integrante de las fuentes de abastecimiento urbano puede facilitar la consecución numerosos beneficios tales como una mayor fiabilidad del suministro de agua y una menor huella de carbono, así como potenciar los suministros naturales de agua y controlar el coste final del agua.

En marzo de 2018, el Consejo Estatal del Agua aprobó la propuesta de normativa relativa a la incorporación planificada de agua regenerada en embalses de aguas superficiales que se utilicen para el abastecimiento de consumo humano (State Water Board, 2018). El agua regenerada no se suministra directamente a los consumidores para su ingestión, sino que se aporta a un embalse desde donde, tras la mezcla con otras aguas superficiales, puede ser captada y sometida a un proceso de potabilización antes de ser abastecida a los usuarios para su consumo. La normativa contó con el informe técnico preceptivo de un Panel de Expertos que concluyó favorablemente sobre la capacidad de dichos criterios de calidad para ofrecer una protección adecuada de la salud pública.

Siguiendo el mandato de las leyes aprobadas en 2010 y 2013 por el Senado californiano, el Consejo Estatal del Agua recibió la petición de investigar e informar a los órganos legislativos sobre la viabilidad de desarrollar unos criterios normativos uniformes sobre la regeneración del agua para su RPD, antes del 31 de diciembre de 2016. Para atender esa petición legislativa, convocó dos grupos independientes, un Panel de Expertos integrado por científicos e ingenieros y un Grupo Asesor integrado por agentes sociales involucrados en el uso del agua. El objetivo de ambos grupos fue asesorar al Consejo Estatal del Agua sobre las problemáticas relativas a la viabilidad de desarrollar unos criterios uniformes sobre la regeneración del agua para su RPD. Las recomendaciones del Panel de Expertos y del Grupo Asesor han servido para establecer los fundamentos de la investigación y los resultados adoptados por el Consejo Estatal del Agua en su Informe Preliminar (State Water Board, 2016a). Los informes del Panel de Expertos (State Water Board, 2016b) y del informe final del Grupo Asesor (State Water Board, 2016c) aparecen como anexos del Informe Preliminar al Consejo Estatal del Agua.

A partir de esos estudios, el legislador requirió al Consejo Estatal del Agua que adoptara unos criterios uniformes para la reutilización potable del agua mediante su incorporación en puntos aguas arriba de la entrada a una estación de potabilización, para lo que el Consejo ha establecido un programa de colaboración con la Water Research Foundation y el National Water Research Institute para completar las investigaciones necesarias antes de 2021-22.

La sesión pública más reciente del Panel de Expertos tuvo lugar los pasados 24 y 25 de agosto de 2021. El orden del día, las diapositivas y los videos de las sesiones técnicas se pueden descargar en la página web del [Consejo Estatal del Agua, bajo el epígrafe “Expert Panel Meeting Proceedings”](#).

En resumen, los Paneles asesores se han convertido en un elemento esencial y efectivo del proceso normativo, en parte porque representa también una nueva actitud pro-activa “desde los usuarios hacia las instituciones” (*bottom up*), en un marco de colaboración institucional

muy favorable, incluyendo de una parte a los usuarios y los gestores, y de otra las instituciones responsables de la protección de la salud pública y la gestión de los recursos hídricos. La experiencia de la última década, tanto en California como en varios otros Estados, indica que este proceso normativo tiene un gran potencial para avanzar de forma eficiente, rápida y satisfactoria, especialmente en los ámbitos estatales, que son quienes tienen las competencias exclusivas sobre la reutilización de agua. Conviene resaltar que las diferencias existentes entre normativas estatales no son objeto de comentarios o críticas sobre su idoneidad por parte de otros Estados, ni tampoco lo es la calidad de los productos cultivados en unos u otros estados, siempre que respeten las normas aplicables. La experiencia de más de 30 años en California no muestra evidencia alguna de causalidad entre el uso de agua regenerada para riego sin restricción de productos hortícolas y la salud de los consumidores.

El interés actual por la reutilización potable, tanto indirecta como directa, en California queda patente con la reciente publicación de la “Guía de implantación de la reutilización potable directa (RPD)” por parte del National Water Research Institute (NWRI) y la consultora de ingeniería Carollo Engineers Inc., y dirigida a las empresas del agua de California. La Guía puede descargarse en [este enlace](#).

El documento representa el trabajo conjunto del NWRI y Carollo Engineers Inc. (Carollo), junto con las empresas de agua de las entidades participantes: Los Angeles Department of Water and Power (LADWP), San Francisco Public Utilities Commission (SFPUC), la ciudad de Santa Barbara, y las empresas Valley Water y Ventura Water. El objetivo de esta Guía es completar las lagunas existentes sobre cómo planificar e implantar la RPD en California. La tabla incluida en el prólogo de la Guía muestra las posibles opciones de RPD que están contemplando esas cinco empresas del agua y que se describen detalladamente en el Anexo de la Guía.

Por último, la página web de la Asociación Española de Reutilización Sostenible del Agua ([ASERSA](#)) ofrece numerosos documentos relativos a las iniciativas, los proyectos y los desarrollos normativos relativos a la reutilización del agua para diversos usos en diversos lugares del mundo. En particular, la sección Webinars ofrece los ficheros audiovisuales de las videoconferencias promovidas por ASERSA durante el año 2020 y 2021.

GESTIÓN SOCIO-ECONÓMICA DE LA REUTILIZACIÓN

Los episodios de sequía plantean con frecuencia fuertes tensiones entre los diversos usuarios de los recursos hídricos, a la vez que potencian el interés de todos ellos por fuentes de agua no convencionales, a fin de obtener soluciones mucho más fiables a la falta de recursos convencionales. La reglamentación española asigna al consumo humano prioridad sobre otros usos. Esto hizo que la aplicación de las medidas para mitigar los efectos de las sequías registradas entre 2005 y 2008 en España, y particularmente en las comunidades autónomas de Cataluña, Valencia, Murcia, Andalucía y Madrid, suscitase intensos debates entre los usuarios urbanos y agrícolas del agua, y propiciase un renovado interés por la reutilización planificada del agua como forma de resolver los déficits coyunturales o crónicos de agua.

Establecer el precio y el coste del agua regenerada es un proceso determinante de la operatividad y el éxito de cualquier programa de reutilización planificada del agua. Este proceso es complejo, debido fundamentalmente a que suele ser más costoso suministrar agua regenerada que mantener un abastecimiento de agua potable, a pesar de que el agua regenerada básica tiene una calidad inferior a la del agua potable (Cuthbert y Hajnosz, 1999). Mientras que los costes de abastecimiento de agua potable suelen estar basados en inversiones pasadas, y en cierto modo amortizadas, los proyectos de suministro de agua regenerada han de enfrentarse a unas inversiones y a un régimen de explotación y mantenimiento que, de acuerdo con los métodos tradicionales de asignación de costes, hacen que el coste del agua regenerada pueda ser igual o incluso superior al del agua de abastecimiento público.

El dilema en estos casos es evidente: si el agua regenerada se factura a su precio real de coste, los usuarios no tendrán generalmente un incentivo suficiente para utilizarla; por otra parte, si el agua regenerada se factura a un precio inferior a su coste de producción, convendrá obtener una compensación con otras fuentes de ingresos. La cuestión que se plantea en este caso es determinar quién debe hacerse cargo de esos gastos y cuál ha de ser su cuantía. La aplicación de una gestión integrada de beneficios y de costes ayuda a resolver esos retos, que con frecuencia dificultan el progreso de la reutilización del agua. No obstante, los beneficios a largo plazo de la utilización del agua regenerada han hecho que numerosos servicios públicos de abastecimiento de agua de consumo humano y de suministro de agua de riego estén promoviendo su implantación.

La gestión económica de la reutilización planificada es especialmente compleja y difícil en poblaciones de los EEUU, donde es común que la gestión del ciclo del agua la realicen separadamente dos instituciones con objetivos independientes: 1) las entidades dedicadas al abastecimiento de agua (Water District), cuyo objetivo es gestionar los recursos existentes y promover nuevos recursos y 2) las entidades dedicadas al saneamiento del agua (Sanitation District), cuyo objetivo es gestionar la depuración y el vertido de los efluentes depurados.

La reutilización planificada el agua adquiere una nueva dimensión cuando se contempla desde un punto de vista de la gestión integrada, más amplio y sistémico que el tradicional (entidades diferentes que gestionan una parte del ciclo del agua), de modo que sea posible evidenciar su potencial para: 1) evitar los mayores costes de nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable, siempre que éstas sean realmente posibles y 2) evitar los mayores costes que pueden representar las mejoras en la depuración y el vertido requeridas por nuevas limitaciones sanitarias y ambientales. Un ejemplo emblemático de esta situación es el [proyecto GWRS](#), promovido conjuntamente por el OCWD y el OCSD, con el objetivo inicial de regenerar y reutilizar 90 hm³ de agua anualmente que, con un presupuesto total de 427 millones de dólares, se inició en el año 2003 y entró en servicio a principios de 2008. El proyecto GWRS fue ampliado en 2015, para producir 130 hm³ anuales de agua, mediante una inversión adicional de 143 millones de dólares.

Mediante este proyecto compartido, el OCWD ha desarrollado unos recursos de agua realmente adicionales y difíciles de obtener desde fuentes convencionales (trasvases del Delta Sacramento-San Joaquín o del río Colorado) y el OCSD ha evitado el coste de mejorar el grado de depuración de sus efluentes y de ampliar el emisario submarino utilizado para

disponer sus efluentes depurados en el océano Pacífico. Ambas instituciones públicas salieron beneficiadas, al alcanzar unos objetivos esenciales, pero con un coste inferior al que habrían tenido que asumir para alcanzarlos separadamente.

La gestión del ciclo del agua en el contexto de una cuenca hidrográfica, tal como se ha venido aplicando tradicionalmente en España y como la Directiva Marco del Agua propugna en Europa, ofrece un marco excelente y muy favorable para llevar a cabo una gestión integrada o sistémica de los recursos hídricos, en la que los requisitos económicos y financieros de la reutilización planificada pasan a ser un elemento más a tener en cuenta dentro del balance general de costes y beneficios de la cuenca. La creación de los Organismos de Cuenca, como responsables de la gestión integrada de los recursos, permite que los proyectos de reutilización planificada puedan beneficiarse de los ahorros e incluso de los beneficios derivados de no tener que recurrir a nuevas y costosas fuentes de abastecimiento de agua potable. El desarrollo reglamentario del Dominio Público Hidráulico y la implantación de instrumentos de gestión para el Intercambio de Derechos de Uso del Agua ofrecen grandes posibilidades para una mejor gestión de los recursos y posibilitan la incorporación del agua regenerada como un nuevo elemento dinamizador del sistema.

Entre los beneficios más destacables de la reutilización planificada cabe resaltar la mayor disponibilidad de agua pre-potable que ello conlleva, cuando se sustituye por agua regenerada, y la mayor garantía de los suministros de agua regenerada, que permite mitigar o suprimir las restricciones que habrían de aplicarse durante periodos secos, evitando las enormes pérdidas que los periodos de sequía meteorológica comportan usualmente. Si a esto se unen las posibilidades de coordinación entre recursos superficiales y recursos subterráneos, mediante las posibilidades de regulación que estos últimos ofrecen, así como los ahorros y el uso eficiente del agua en usos agrícolas, puede concluirse que la gestión integrada permite mejorar sustancialmente la disponibilidad de recursos para los diferentes usuarios, así como una mayor garantía de esos mismos recursos.

En realidad, los intercambios de recursos entre usuarios vienen teniendo lugar en zonas mediterráneas españolas desde tiempo inmemorial, aunque las sequías recientes y el aumento de los consumos urbanos y agrícolas de las últimas décadas los hayan hecho más frecuentes y evidentes. Estas cesiones de recursos entre usuarios agrícolas, y entre usuarios agrícolas y urbanos, vienen propiciados por su capacidad de: 1) mantener inalterados los derechos concesionales y 2) aportar beneficios a todos los partícipes. Cabe pensar por tanto que, si los instrumentos de gestión para el Intercambio de Derechos de Uso del Agua permitiesen establecer formas contractuales que respondan de forma adecuada a esas dos inquietudes de los usuarios, los intercambios serían una realidad cada vez más frecuente y mejor planificada.

Por último, conviene examinar las adaptaciones que hubieron de hacerse cuando en décadas pasadas se generalizó la disponibilidad de aguas embalsadas (construcción de embalses a mitad del siglo XX) y de aguas subterráneas, tras la popularización de las bombas hidráulicas eléctricas sumergidas. La aparición de estos nuevos recursos, mucho más fiables e incluso abundantes que los puramente superficiales disponibles en aquel momento, requirió sin duda un replanteamiento de los costes de los recursos hídricos, que todavía continúan, mediante la incorporación de los costes de inversión y de explotación de las nuevas opciones, a cambio

de una mayor disponibilidad y fiabilidad que las que ofrecían las captaciones tradicionales desde los ríos y los lagos. Del mismo modo, una implantación exitosa de la regeneración y la reutilización del agua requiere una gestión integrada de sus costes entre todos los usuarios y beneficiarios.

CONCLUSIONES

La reutilización planificada del agua es un componente esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos, especialmente en zonas costeras, que cuenta con una tradición de 50 años y un largo historial de iniciativas, realizaciones, normativas y éxitos para los más diversos usos del agua, en muchos lugares del mundo. Su atractivo principal es su capacidad para ofrecer una fiabilidad (garantía) de suministro superior a las fuentes convencionales, especialmente en zonas semi-áridas expuestas a la irregularidad pluviométrica anticipada por los estudios de cambio climático, y contribuir al aumento neto de los recursos hídricos.

La regeneración de agua para usos no potables ha adquirido un gran desarrollo en numerosas partes del mundo, en particular en las zonas costeras e insulares españolas, donde ha alcanzado unas excelentes cotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y del público en general. La reutilización potable indirecta se aplica desde hace unos años como concepto innovador en unos pocos lugares del mundo, el sur de California, Bélgica, Singapur y el sudeste de Australia. Su objetivo común es generar una nueva fuente de agua de abastecimiento público, más fiable ante la irregularidad meteorológica, utilizando procesos de regeneración avanzada y adoptando una de las dos opciones de “naturalidad” posibles: un acuífero costero o un embalse de regulación.

El consumo energético de los trasvases de agua y especialmente el coste significativo de la distribución de agua regenerada no potable mediante nuevas redes de suministro está propiciando un cambio de perspectiva en las opciones tradicionales de reutilización no potable del agua hacia la reutilización potable del agua, una opción casi inevitable en un futuro próximo en zonas semiáridas del mundo.

La gestión del ciclo del agua en el contexto de unas cuencas hidrográficas como las españolas ofrece un marco excelente y muy favorable para implantar una gestión integrada de los recursos hídricos, en la que los requisitos económicos y financieros de la reutilización planificada pasan a ser un elemento del balance de costes y de beneficios de la cuenca.

Las infraestructuras de regeneración básica para usos no potables existentes en la Región de Murcia y el Consorci d'Aigües Costa Brava Girona, de regeneración avanzada para reutilización industrial en El Camp de Tarragona, y de reutilización potable disponibles en el Área Metropolitana de Barcelona y el municipio de El Port de la Selva (Girona) ofrecen unos proyectos de referencia inigualables con los que implantar un ambicioso programa de seguimiento e investigación de su capacidad técnica para responder a las inquietudes sanitarias, ambientales y sociales que puedan plantear el público, los usuarios y las autoridades sanitarias y ambientales. Ese programa permitiría impulsar la auto-suficiencia hídrica de nuestros territorios y generar un escaparate de nuestra competencia científica y técnica internacional en el campo de la gestión de los recursos hídricos.

El intenso episodio de sequía que afectó a California durante cinco años consecutivos (2012 a 2017) ofrece un marco incomparable para estudiar las diversas iniciativas técnicas y reglamentarias que pueden implantarse para gestionar los recursos hídricos en zonas semi-áridas como las mediterráneas españolas, en anticipación a similares episodios de sequía que puedan registrarse en nuestros territorios.

El progreso de la regeneración y la reutilización planificada del agua no depende solo de los avances tecnológicos, sino que necesita un marco reglamentario sólido y una voluntad política decidida de llevarlas a cabo. La reutilización del agua para riego agrícola y de jardinería, el uso industrial, y el abastecimiento urbano tiene una larga tradición de éxitos, con más de 35 años de implantación en áreas como las costas mediterráneas españolas y de casi 50 años en el sur de California, caracterizadas todas ellas por su déficit crónico de agua. Disponemos de amplios conocimientos científicos y técnicos para producir agua regenerada de buena calidad, de una gran diversidad de soluciones tecnológicas con las que regenerar el agua, y de numerosos modelos económicos, financieros y de gestión con los que poder llevar a cabo los proyectos de regeneración y reutilización del agua.

El apoyo firme y continuado de las autoridades de salud pública y de recursos hídricos, en estrecha colaboración con las empresas de agua y los usuarios, es un elemento esencial para conseguir una percepción correcta de las normas de calidad del agua regenerada y una aceptación favorable y amplia de su uso, tanto entre el público como los beneficiarios de los más diversos aprovechamientos del agua. La adopción de paneles asesores, con amplia participación de la comunidad científica, técnica y administrativa, se ha convertido en un elemento efectivo del proceso normativo, por su gran potencial para avanzar de forma eficiente, rápida y satisfactoria, incorporando la participación del público en los procesos de percepción y de aceptación, tanto de las normativas aplicables como de los proyectos de reutilización en cuestión.

REFERENCIAS

- Área Metropolitana de Barcelona (2011). Water Reuse Project of the Barcelona Metropolitan Area. WateReuse Barcelona 2011. Página web de la Asociación Española de Reutilización Sostenible del Agua: www.asersagua.es.
- Asano, T. , Burton, F.L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R. and Tchobanoglous, G. (2006). Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. Metcalf and Eddy/AECOM. McGraw-Hill.
- Asano, T. (Editor) (1998). Wastewater Reclamation and Reuse. Water quality management library, Vol. 10. Technomic Publishing Co. Inc. Lancaster, PA, USA.
- Boletín Oficial del Estado (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/12/07/1620/con>
- Boletín Oficial de la Provincia de Girona (2013). Anuncio de aprobación definitiva de la modificación de una ordenanza reguladora de precios públicos. No. 227, de 27 de noviembre de 2013, pág. 94.

- Consorci de la Costa Brava (2005). Actas de las Jornadas técnicas sobre La Integración del Agua Regenerada en la Gestión de los Recursos: el Papel Dinamizador del Territorio. Lloret de Mar, octubre de 2005. www.ccbgi.org/jornades2005.
- Cuthbert, R.W. y Hajnosz, A.M. (1999). Setting reclaimed water rates. Journal of the American Water Works Association, Vol. 91, no. 8, pág. 50-57.
- Del Río, F., López, J. y de Juana, I. (1996). Reutilización del agua residual, experiencias prácticas en Vitoria. Comunicación presentada en la XVII Jornadas de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento.
- Diario Oficial de la Unión Europea (2020). Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política del agua. L 327/1-71.
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas (1991). Directiva 91/271/CEE del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. L135/40-52.
- Entitat de Sanejament d'Aigües (2005). Gestión actual y reutilización de las aguas residuales en la Comunidad Valenciana. Curso de Verano de la Fundació Caixa de Castelló-Universitat Jaume I. Castellón.
- European Commission (2018). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse. COM (2018) 337 final. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiatives/com-2018-337_en
- Levine, A. y Asano, T. (2004). Recovering sustainable water from wastewater. Journal of Environ. Science and Technology. American Chemical Society. June 1, pp: 201A-208A.
- Lahnsteiner, J., D. Sevitz y G. Lempert (2004). Potable reuse in Windhoek, Namibia. Wabag.
- Ministère des affaires sociales et de la santé (2014). Arrêté du 25 juin 2014 modifiant l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts. JORF no. 0153 du 4 juillet 2014, page 11059 texte no. 29. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2014/6/25/AFSP1410752A/jo/texte>
- Ministerio de la Presidencia (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE núm. 294, sábado 8 diciembre 2007, pág. 50639-61.
- Mujeriego, R., Pozuelo, J.M., y Ortega, J.M. (2020). El Plan de Gestión de Riesgos, Instrumento normativo del Reglamento de la UE para el riego agrícola con agua regenerada. <https://www.asersagua.es/el-plan-de-gestion-de-riesgos-en-el-reglamento-de-la-ue/>
- Mujeriego, R. (2009). La reutilització planificada de l'aigua: de l'eficiència a l'autosuficiència. Nota d'Economia, no. 93-94, Departament d'Economia i Finances, Generalitat de Catalunya.
- Mujeriego, R. (2007). La reutilización, la regulación y la desalación en la gestión integrada del agua. La Sequía en España: Directrices para Minimizar su Impacto. Dirección General del Agua, del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 367 páginas, ISBN: 978-84-690-7328-5. Pág. 155-202.

- Mujeriego, R. (2004). La gestión del agua en el sur de California. *Ambienta*, no. 38, noviembre de 2004, pág. 31-38. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
www.mma.es/publicacion/ambienta/
- Mujeriego, R. (Editor) (1990). *Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Mujeriego, R., Compte, J., Cazorra, T. y Gullón, M. (2008). The water reclamation and reuse project of El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain. *Water Science & Technology*, Vol. 57, No.4, pp. 567-574.
- Mujeriego, R. y López, J. (2008). Water reuse and integrated water resources management in Vitoria-Gasteiz, Spain. *Water Practice and Technology*, Vol. 3, Issue 2. International Water Association Publishing 2008.
- Mujeriego, R., and López, J. (2006). The Azúa Valley Lake and integrated water resources in Vitoria-Gasteiz. *Proceed. of the Intern. Symp. on Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century*, Berga et al (eds), June 2006, Barcelona. Taylor and Francis Group, London, Vol. 1, pp. 117-124.
- National Water Research Institute (NWRI) (2012). *Review of California's Water Recycling Criteria for Agricultural Irrigation; Recommendations of an NWRI Independent Advisory Panel*. Publication Number NWRI-2012-03.
https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/Documents/Recharge/NWRI_AgPanelReportforCDPHFINAL-09-2012.pdf
- Organización Mundial de la Salud (2006). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*. Cuatro volúmenes.
- Pettygrove, G.S. y Asano, T. (Editores) (1984). *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater, A Guidance Manual*. California State Water Resources Control Board, report no. 84-1 wr. Republished by Lewis Publisher, Inc. in 1985.
- Sala, L. y Serra, M. (2004). Towards Sustainability in water recycling, *Water Science and Technology*, vol. 50, no. 2, 1-8.
- Sala, L. y Millet, X. (1995). Aspectos básicos de la reutilización de las aguas residuales regeneradas para el riego de campos de golf. *Jornadas Técnicas de la Federación Española de Golf*. Madrid. Publicado por el Consorcio de la Costa Brava, Girona, en 1997.
- Sanz, J., Suescun, J., Molist, J., Rubio, F., Mujeriego, R. y Salgado, B. (2015). Reclaimed water for the Tarragona petrochemical park. *Water Science & Technology: Water Supply*; Vol. 15.2 ; 2015. Doi: 10.2166/ws.2014.114
- State Water Resources Control Board (2018). *Regulations for Surface Water Augmentation using Recycled Water*.
https://www.waterboards.ca.gov/board_decisions/adopted_orders/resolutions/2018/rs2018_0014_with_regs.pdf
- State Water Resources Control Board (2016a). *Investigation on the feasibility of developing uniform water recycling criteria for direct potable reuse*.
http://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/rw_dpr_criteria/draft_report_to_legislature_dpr_public_review.pdf
- State Water Resources Control Board (2016b). *Expert Panel final report*.
http://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/rw_dpr_criteria/app_a_ep_rpt.pdf
- State Water Resources Control Board (2016c). *Final Report*.
http://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/rw_dpr_criteria/app_b_ag_rpt.pdf

- State Water Resources Control Board (2014). Regulations for groundwater replenishment. https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/gwreplenishmentregulation/DPH-14-003EFinalText.pdf
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), National Risk Management Research Laboratory and U.S. Agency for International Development (2012). Guidelines for Water Reuse. EPA/600/R-12/618, September 2012. Office of Water, Washington, D.C., y Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio. Produced by CDM Smith Inc. <https://www.asersagua.es/guidelines-for-water-reuse-usepa-2012/>
- Veolia Water Industrial Outsourcing (2013). Lavado de lechugas con agua regenerada en Tilmanstone Salads. <https://www.asersagua.es/lavado-de-lechugas-con-agua-regenerada/>
- WateReuse Research Foundation (2015). Framework for Direct Potable Reuse, an Independent Advisory Panel. Cosponsored by American Water Works Association, Water Environment Federation and National Water Research Institute. WateReuse Project Number: 14-20. ISBN: 978-1-941242-30-8.

AGRADECIMIENTOS

Los estudios y experiencias documentados en este trabajo han sido posibles gracias a la colaboración y el apoyo económico que diversas instituciones públicas nos han brindado desde 1985, entre la que merecen ser destacadas el Consorci de la Costa Brava, el Área Metropolitana de Barcelona, la antigua Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya, la Agència Catalana de l'Aigua, la Diputación Foral de Álava, la Comunidad de Regantes Arrato, el Ministerio de Educación y Ciencia, el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino, la Fundación del Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia, el Programa d'Estudis Catalans Gaspar de Portolà del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya, el Institut d'Estudis de la Seguretat y el Departament de Economia i Finances de la Generalitat de Catalunya. La acogida de la Universidad de California en Davis, del Orange County Water District entre marzo de 2002 y enero de 2003 y la American WateReuse Association, así como de los contactos continuados posteriores, han sido determinantes del conocimiento y el acceso tanto a sus propias instalaciones como a numerosas otras iniciativas de regeneración y reutilización básica y avanzada del agua.