



agua

Regeneración de aguas residuales: avances tecnológicos

R. Mujeriego

ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Cataluña

ABSTRACT

Planned wastewater reuse has become an essential component of integrated water resources management. The current debate is centered on the adequacy of promoting indirect potable reuse or to restrict water reuse to non-potable uses. Integration of conventional reclamation processes with synthetic membranes processes is a very promising strategy for future development..

PALABRAS CLAVE

Reutilización; regeneración; tratamiento avanzado; salud pública; fiabilidad; reciclado; calidad del agua; purificación del agua; depuración del agua.

KEY WORDS

Reuse; reclamation, advanced treatment, public health, reliability; recycling; water quality, water purification; wastewater treatment.

INTRODUCCIÓN

La reutilización de aguas residuales es un componente intrínseco del ciclo natural del agua. Mediante el vertido de estos efluentes a los cursos de agua y su dilución con el caudal circulante, las aguas residuales han venido siendo reutilizadas incidentalmente en puntos aguas abajo de los cauces para aprovechamientos urbanos, agrícolas e industriales. La reutilización directa o planificada de agua residual a gran escala tiene un origen más reciente, y supone el aprovechamiento directo de efluentes, con un mayor o menor grado de regeneración, mediante su transporte hasta el punto de utilización a través de un conducto específico, sin mediar para ello la existencia de un vertido o una dilución en un curso natural de agua.

El notable desarrollo alcanzado por la reutilización planificada de agua residual, especialmente en países con recursos hidráulicos suficientes, se ha debido a la necesidad de ampliar los abastecimientos de agua y de resolver los vertidos de agua residual. El incremento registrado por las dotaciones de agua de abastecimiento, junto con el aumento de población experimentado por numerosas zonas urbanas, han hecho que las fuentes de abastecimiento tradicionales sean insuficientes para atender las demandas actuales. Las distancias crecientes entre las nuevas fuentes de abastecimiento y los núcleos urbanos, las limitaciones ambientales para construir nuevos embalses y las sequías plurianuales han llevado a numerosas poblaciones a plantearse la utilización de aguas residuales tratadas como fuente adicional de agua para aprovechamientos que no requieran una calidad de agua potable. 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 aguas residuales,

han hecho que el agua residual regenerada se convierta en una fuente alternativa de abastecimiento, económica y segura desde el punto sanitario y ambiental.

El objetivo de esta comunicación es analizar el papel que la regeneración y la reutilización planificada de efluentes tiene dentro de una gestión integral de los recursos hidráulicos, especialmente en zonas costeras españolas, caracterizadas por déficits estacionales o permanentes de agua. Los objetivos específicos de esta comunicación son: 1) describir el marco conceptual de la reutilización planificada. 2) Analizar los beneficios y las exigencias de la reutilización planificada. 3) Describir los usos más frecuentes del agua regenerada. 4) Presentar la problemática actual de la reutilización. 5) Examinar los avances tecnológicos y los sistemas de tratamiento utilizados para la regeneración de efluentes. 6) Analizar el interés de la reutilización del agua en zonas costeras españolas, indicando el valor aproximado de sus costes de construcción, explotación y mantenimiento.

LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

El proceso de tratamiento necesario para que un agua residual pueda ser reutilizada se denomina generalmente regeneración y el resultado de dicho proceso 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 éstos tenían en el pasado.

La implantación de un proyecto de regeneración de agua tiene dos requisitos esenciales y complementarios: 1) Definir los niveles de calidad adecuados para cada uno de los posibles usos que se piense dar al agua y 2) Establecer los procesos de tratamiento y

los límites de calidad del efluente recomendados para cada uno de los usos previstos. La elaboración y aprobación de estos dos aspectos técnicos de la regeneración de agua 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 y los posibles efectos sobre la salud y el Medio Ambiente. Prueba de ello son la diversidad y heterogeneidad de criterios y normas de calidad establecidas por diversos países y organizaciones internacionales sobre la reutilización de agua residual (USEPA, 1992; OMS, 1989).

El aprovechamiento de un agua regenerada requiere normalmente: 1) Su transporte desde la planta de regeneración hasta el lugar de utilización. 2) Su almacenamiento o regulación para adecuar el caudal suministrado por la planta a los caudales consumidos y 3) La definición de unas normas de utilización del agua que permitan minimizar los posibles riesgos directos o indirectos para el medio ambiente, las personas que la utilizan, la población circundante al lugar de uso y los consumidores de cualquier producto cultivado con el agua regenerada. Estos tres elementos técnicos constituyen el núcleo central de un programa de reutilización planificada de agua residual.

BENEFICIOS DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

El balance hidráulico de una zona geográfica se obtiene como diferencia entre el aporte anual de agua, constituido por las precipitaciones y las aportaciones de los ríos, acuíferos y transvases de otras cuencas, y las pérdidas anuales de agua, o pérdidas irre recuperables, cuyo destino es la atmósfera o el 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 reutilización de agua residual únicamente resultará en un incremento real de los recursos hidráulicos aprovechables en una zona si esas aguas residuales se pierden actualmente de forma irre recuperable, mediante su vertido en el mar desde una población costera o a través de la evapotranspiración en zonas del interior. No obstante, la regeneración y reutilización de agua residual en zonas del interior puede permitir en cualquier caso una gestión más adecuada de los recursos hidráulicos disponibles.

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

1. Una disminución de los costes de tratamiento y de vertido del agua residual. La reutilización de un agua residual ofrecerá una clara ventaja económica cuando los

requisitos de calidad del tipo de reutilización considerada sean menos exigentes que los establecidos por los objetivos de calidad del medio receptor en el que se ha de realizar el vertido del agua residual.

2. 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. La reutilización de agua residual mediante riego permite que las sustancias orgánicas difíciles de mineralizar puedan ser degradadas biológicamente en el suelo, durante su infiltración a través del terreno de cultivo, ofreciendo la posibilidad de que sus componentes minerales serán posteriormente asimilados por las plantas.
3. El aplazamiento, la reducción o incluso la supresión de instalaciones adicionales de tratamiento de agua de abastecimiento, con la consiguiente reducción que ello representa tanto de los efectos desfavorables sobre los cursos naturales de agua como de los costes de abastecimiento de agua.
4. Un ahorro energético, al evitar la necesidad de aportes adicionales de agua desde zonas más alejadas a la de la planta de regeneración de agua.
5. Un aprovechamiento de los elementos nutritivos contenidos en el agua, especialmente cuando el agua regenerada se utiliza para riego agrícola y de jardinería.
6. Una mayor fiabilidad y regularidad del caudal de agua disponible. El flujo de agua residual es generalmente mucho más fiable que el de la mayoría de los cauces naturales de agua.

EXIGENCIAS DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

Uno de los factores determinantes de la implantación y desarrollo de la reutilización planificada de agua residual es el establecimiento de unas normas de calidad del agua para cada uno de los posibles tipos de aprovechamientos que se contemplen. Entre la gran variedad de sustancias que se incorporan a un agua durante su utilización urbana, industrial o agrícola, cabe mencionar las sales disueltas, los elementos nutritivos, los microorganismos patógenos, las sustancias inorgánicas tóxicas y bioacumulables y los microcontaminantes orgánicos.

Con objeto de obtener un agua regenerada de la mejor calidad posible, un criterio generalmente adoptado es recurrir a efluentes de carácter urbano, como primera alternativa, dejando los efluentes de tipo industrial sólo para casos excepcionales. Siguiendo este mismo criterio, la reutilización suele plantearse preferentemente con los caudales de aguas brutas que tienen una mayor componente de agua doméstica.

Para asegurar que a la planta de regeneración no llegan contaminantes imprevistos que puedan perjudicar o impedir el proyecto de reutilización, es esencial establecer un riguroso programa de control de vertidos, que incluya desde una ordenanza de vertido hasta un programa de educación ciudadana, todo ello con el fin de evitar la incorporación a la red de saneamiento de compuestos indeseables, tanto para la integridad de la propia red de alcantarillado como para el proceso de tratamiento o el proyecto de reutilización.

El transporte de agua regenerada desde la planta de tratamiento hasta el punto de reutilización es una exigencia de cualquier proyecto de reutilización. Esto requiere con frecuencia la construcción de un emisario terrestre y de una doble red de distribución, especialmente cuando se trata de reutilización en zonas urbanas. Por motivos económicos, la implantación de una doble red de distribución suele realizarse de forma progresiva, empezando por los grupos de usuarios con mayor consumo total de agua, y extendiéndola después a nuevas zonas urbanas o con menores consumos de agua.

Las normas de utilización del agua regenerada son un componente esencial de cualquier estrategia de protección de la calidad ambiental y de la salud pública. En general, cuanto menores 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 residual sometida únicamente a un tratamiento mecánico, destinado a evitar la obturación frecuente de los orificios de salida del agua.

Las autoridades sanitarias dedican especial atención a la definición de las normas de utilización del agua regenerada, tales como: 1) La señalización mediante carteles bien visibles que indiquen el tipo de agua utilizada. 2) La adopción normalizada del color morado para las conducciones y dispositivos de control. 3) La instalación de dispositivos anti-retorno. 4) Las inspecciones de las conexiones a la red de agua regenerada. 5) La exigencia de determinados horarios de riego y de tipos de aspersores. 6) La prohibición de instalar grifos exteriores y 7) La utilización de tamaños de conducción y de bocas de conexión de mangueras diferentes a los utilizados para las aguas de abastecimiento público. A este respecto, la aparición progresiva de contadores en el punto de conexión domiciliaria 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.

FIABILIDAD DEL PROCESO DE REGENERACIÓN

Un exigencia característica de los proyectos de regeneración de agua es la necesidad de asegurar una fiabilidad notable del proceso de tratamiento y una gestión adecuada del sistema de reutilización del agua. La circunstancia de que la reutilización de agua residual suele 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 pueda ofrecer, pero, sobre todo, el hecho de que la reutilización de un agua suele conllevar 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 plantas de regeneración de agua residual deba ser elevada y constituya un elemento esencial tanto de su concepción como de su explotación y mantenimiento.

La fiabilidad de los procesos de tratamiento pasa así a constituir un elemento esencial de la concepción y explotación del sistema de reutilización, con prioridad sobre el rendimiento y eficacia de los propios procesos, que han de satisfacer los límites de calidad establecidos para el efluente. Entre las exigencias relativas a la fiabilidad del proceso de regeneración cabe destacar la instalación de controles continuos de determinados parámetros, la instalación de alarmas y automatismos, la disponibilidad de piezas de recambio, la duplicidad de equipos y procesos, la existencia de equipos de entrada en funcionamiento automático en caso de avería, la existencia de volúmenes de reserva de reactivos, especialmente de desinfectante, y la instalación de equipos autogeneradores o la duplicidad de suministros de energía eléctrica.

Para evitar que la utilización de un agua inadecuadamente regenerada pueda provocar un riesgo ambiental y sanitario inaceptable, las normas de regeneración suelen exigir la instalación de lagunas de almacenamiento, donde desviar el efluente inadecuadamente tratado para su tratamiento posterior, o de un sistema alternativo de vertido.

En definitiva, la regeneración de agua residual se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad. La elaboración y la comercialización 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 explotación de los procesos de regeneración diferente a la adoptada generalmente en el tratamiento de agua residual, cuyo resultado final suele considerarse un residuo líquido o

sólido. Esta nueva forma de plantear la regeneración de agua residual ha hecho que la reutilización planificada de agua residual pase a ser un elemento esencial de la gestión integral de los recursos hidráulicos.

TIPOS DE REUTILIZACIÓN

El agua residual regenerada se viene empleando para múltiples usos, entre los que cabe destacar: 1) La reutilización urbana (jardinería, incendios, lavado de calles y automóviles). 2) La reutilización industrial (refrigeración). 3) La reutilización agrícola y forestal. 4) La reutilización ornamental y recreativa. 5) La mejora y preservación del medio natural y 6) La recarga de acuíferos. La reutilización agrícola y de jardinería constituye el aprovechamiento más extendido del agua residual regenerada, tanto para cultivos hortícolas (consumo crudo) como de cultivos con procesamiento posterior, cereales, cítricos, y viñedos, y tanto mediante riego por aspersión, microaspersión y goteo, como por riego por inundación.

Atendiendo al posible contacto o ingestión del agua regenerada por parte de las personas, la reutilización se clasifica en: 1) Reutilización para uso no potable y 2) Reutilización para uso potable. Esta última categoría suele subdividirse a su vez en otros dos posibles usos: 1) Reutilización indirecta para uso potable, cuando el agua regenerada se mezcla con otra masa de agua natural, como ocurre durante la infiltración de agua regenerada en un acuífero natural del que posteriormente se extrae agua como materia prima para la elaboración de agua potable y 2) Reutilización directa para uso potable, cuando el agua regenerada se introduce directamente en la red de distribución de agua potable, tal como ocurre en los vehículos espaciales durante su permanencia en órbita.

Es importante señalar que, hasta el momento, los proyectos de regeneración para usos no potables son los que han adquirido el mayor desarrollo en numerosas partes del mundo, habiendo alcanzado unas excelentes cotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y el público en general, especialmente en países desarrollados donde los recursos hídricos son limitados y la protección ambiental es una prioridad destacada.

TENDENCIAS ACTUALES

El debate técnico sobre el alcance y 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 indirecta para usos potables, o de restringir el alcance de la reutilización a los usos no potables. Este debate técnico, y necesariamente político 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 mayor número y diversidad de proyectos como California y Florida.

Este debate técnico ha alcanzado últimamente altos niveles de controversia en los Estados Unidos de América, en relación con el papel que las asociaciones profesionales de la industria de la potabilización del agua y de la depuración del agua residual deben jugar en la promoción de la reutilización indirecta para usos potables. El centro de la controversia reside en dos lecturas sutilmente diferentes: 1) La conveniencia de que la reutilización indirecta puede ser considerada una alternativa de gestión de los recursos hídricos, pero sólo cuando las circunstancias de las otras alternativas lo hagan necesario (posición adoptada por la AWWA) y 2) La conveniencia de que la reutilización indirecta pueda ser considerada como una alternativa, aun cuando no sea estrictamente necesaria (posición adoptada por la WEF).

Los defensores de la primera recomendación (Okun, 1999a; 1999b) (sólo cuando sea una alternativa estrictamente necesaria) argumentan las incertidumbres y los posibles riesgos sanitarios que la reutilización indirecta para usos potables puede conllevar, incluso respetando los criterios sanitarios actuales más estrictos. Como ejemplos más ilustrativos de la conveniencia de adoptar esta posición se citan las recientes denegaciones de este tipo de proyectos en los Condado de Tampa, en Florida, y de la ciudad de San Diego, en California, donde la reacción del público, propiciada por grupos muy destacados, ha resultado en una negativa absoluta por parte los responsables políticos a este tipo de proyectos.

Los proyectos consistían en regenerar agua mediante una combinación de procesos naturales y avanzados, dentro de unos esquemas de excelente concepción y de probada eficacia y fiabilidad, que posteriormente sería mezclada con agua natural existente en embalses, incrementando así los recursos disponibles. El agua obtenida de estos embalses sería sometida a un proceso de potabilización antes de ser distribuida a la población. Aunque los opositores al proyecto (Okun, 1999a; 1999b) resaltan la disponibilidad de ciencia y tecnología suficientes para producir agua regenerada potable de acuerdo con la normativa vigente, la falta de atención de los proponentes del proyecto ante la valoración de alternativas, la necesidad del proyecto en sí, de sus beneficios ambientales y su viabilidad económica, llevaron en último término a una simplificación del mismo, reforzada en San Diego con el eslogan "del inodoro al grifo", que acabó en último término con el rechazo de los responsables políticos ante ambos proyectos (DeSena, 1999).

Los defensores de la segunda recomendación (Harris, 1999) (consideración de la alternativa como forma de generar recursos adicionales, aun cuando no sea estrictamente necesaria) argumentan la existencia de proyectos emblemáticos de reutilización indirecta para usos no potables, como son: 1) El que viene funcionando desde hace años en el Upper Occoquan Sewerage Authority in Fairfax, Virginia, en el que una excelente instalación vierte el efluente de un tratamiento avanzado en un curso de agua que alimenta un embalse utilizado como fuente de agua para abastecimiento público. 2) El que funciona desde hace más de 30 años en el Condado de los Ángeles, mediante el que un efluente terciario es utilizado para la recarga artificial de un acuífero utilizado como fuente de agua de abastecimiento público. 3) el existente desde hace 20 años en el Condado de Orange, en el sur de California, en el que efluente terciario (carbón activado y osmosis inversa) se inyecta en un acuífero costero como forma de crear una barrera ante la intrusión salina y de propiciar la recarga artificial de un acuífero utilizado como fuente de agua para abastecimiento público.

Las aportaciones aparecidas en la literatura técnica han llevado al reconocimiento explícito de dos circunstancias básicas que conviene resaltar: 1) La mayor parte de los efluentes de aguas residuales de los Estados Unidos de América se vierten actualmente a cursos de agua que eventualmente se utilizan como fuentes de agua de abastecimiento, y consiguientemente constituyen una reutilización incidental indirecta para uso potable (Harris, 1999). 2) La implantación satisfactoria de proyectos de reutilización planificada para usos urbanos no potables requiere muy poca tecnología nueva o avanzada adicional (Okun, 1999a).

Esta segunda observación, que podría llevar al conformismo con las técnicas y formas de gestión actuales de este tipo de reutilización, contrasta con la inquietud y el interés de los profesionales del sector por resolver la multitud de cuestiones prácticas que surgen entre los responsables técnicos de la reglamentación, la implantación, la explotación y la presentación pública de este tipo concreto de regeneración y reutilización de agua. Como prueba de ello baste citar las conclusiones de unas recientes Jornadas Técnicas organizadas por el National Water Research Institute (1999) en California, con objeto de definir los aspectos prioritarios a considerar a la hora de establecer criterios sanitarios para la reutilización no potable del agua utilizando tecnologías económicas.

Entre las diez prioridades seleccionadas por los expertos cabe citar en orden decreciente las siguientes: 1) Establecer metodologías de evaluación del riesgo microbiano que ayuden a definir criterios de reutilización del

agua. 2) Identificar criterios de reutilización que ofrezcan una protección suficiente de la salud pública, así como una flexibilidad máxima y un uso eficiente de las tecnologías de tratamiento. 3) Establecer la relación existente entre la inactivación microbiana y los parámetros de control de varios procesos de desinfección y de tratamiento, como forma de desarrollar una protección económica de la salud pública. 4) Desarrollar un programa capaz de cuantificar, medir, comparar y comunicar los niveles de seguridad relativos propios de la reutilización no potable ante el público en general y los legisladores en particular.

PROCESOS DE TRATAMIENTO

El proceso de obtención de un agua residual regenerada que satisfaga unos criterios de calidad similares a los propuestos por la USEPA (1992) para el riego de jardinería de zonas públicas sin ningún tipo de restricción en cuanto a exposición y contacto del público con el agua regenerada consta fundamentalmente de cuatro elementos principales:

1. La implantación de un control de vertidos a la red de saneamiento que asegure la ausencia de contaminantes que puedan hipotecar o impedir la reutilización del agua regenerada.
2. Un tratamiento biológico secundario capaz de producir un efluente con un contenido de materia en suspensión inferior a 10-20 mg/l y valores comparables de DBO₅.
3. Un tratamiento terciario destinado a eliminar la materia en suspensión del afluente secundario, mediante una filtración directa, y a desinfectar completamente el efluente. Este proceso de tratamiento constituye propiamente la fase de regeneración del agua residual.
4. Un depósito regulador de los caudales de agua regenerada, a fin de adecuar la producción de la planta a la demanda de uso y asegurar una cierta reserva de agua regenerada.

Los extensos trabajos de experimentación y de seguimiento de las numerosas instalaciones de regeneración de agua residual existentes en California y Florida ponen de manifiesto que un buen efluente biológico secundario, filtrado mediante un filtro de arena, o de arena y carbón, con la eventual adición de unos miligramos por litro de coagulante (alúmina, generalmente), y una desinfección con cloro con un tiempo de contacto de entre 30 minutos (Florida) y 2 horas (California), hasta alcanzar la eliminación de coliformes, permite obtener un agua regenerada desprovista de virus y bacterias patógenas, y por tanto, ofrece una garantía de calidad similar a la de un agua potable de consumo público (Asano y col., 1990), cuando se trata de utilizarla para usos no potables.

El grado de automatización de las plantas de regeneración de agua existentes es muy variado, pero exige en todos los casos un buen seguimiento del proceso de tratamiento biológico (mediante muestreos integrados diarios, como mínimo), un control continuo de la turbiedad del efluente secundario y del efluente filtrado (que suele situarse por debajo de 1 UNT) y de la concentración de desinfectante al término del proceso de desinfección, y un análisis diario de coliformes, sobre muestra integrada obtenida a la salida del proceso de desinfección.

En general, las plantas de regeneración de agua a partir de efluentes municipales y destinadas 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 y de aplicar medidas correctoras urgentes, ante cualquier alteración del proceso, para evitar que un agua de insuficiente calidad pueda salir de la planta de regeneración. Generalmente, los municipios son los encargados de la distribución y gestión del agua regenerada que pasa así a constituir un nuevo servicio público de calidad. La coordinación y comunicación con los usuarios, tanto individuales como colectivos (urbanizaciones, campos de golf), es muy directa y cordial, a fin de detectar cualquier posible incidente y de disipar cualquier duda que pueda surgir.

AVANCES TECNOLÓGICOS

Entre los avances tecnológicos que han de contribuir al desarrollo de la reutilización planificada del agua cabe destacar la implantación progresiva de sistemas de regeneración de agua basados en la utilización conjunta de sistemas de tratamiento convencionales y otros basados en membranas sintéticas, desde la microfiltración hasta la ósmosis inversa. Aunque el coste actual de algunas de estas alternativas no justifica su aplicación generalizada, cabe esperar que el gran dinamismo del sector industrial de las membranas llevará en unos pocos años a soluciones técnicas que pueden justificarse desde el punto de vista económico (Mujeriego y Asano, 1999; Asano y cols. 1991; Asano y Mills, 1990; WPCF, 1989).

El campo de la regeneración y reutilización del agua ofrece grandes oportunidades para adoptar innovaciones tecnológicas, dado que el agua regenerada tiene un valor económico en tanto que fuente alternativa de agua. Los criterios fundamentales para evaluar las futuras alternativas son la fiabilidad operativa de cada proceso unitario, y la ca-

pacidad de todo el sistema de tratamiento para proporcionar un agua regenerada que satisfaga los criterios adoptados para la regeneración del agua.

Los tratamientos terciarios o avanzados pueden utilizarse, como complemento al proceso convencional de depuración biológica, para eliminar contaminantes disueltos o en suspensión, elementos nutritivos, metales específicos, y otros componentes peligrosos. La gama de tratamientos avanzados disponibles actualmente incluye: la filtración en medio granular, la adsorción, los procesos de membrana y la desinfección. La utilización tanto de éstas como de las nuevas tecnologías de tratamiento ofrece nuevas opciones para la gestión del agua: 1) El uso de materias primas de mayor calidad. 2) El uso de tecnologías más limpias. 3) La adopción de tecnologías con un uso más eficiente del agua. 4) La aplicación de tecnologías de tratamiento avanzadas que promuevan la recuperación de materiales, de energía, y el reciclado y reutilización del agua.

Se han conseguido progresos significativos en el desarrollo de nuevos enfoques técnicos para producir fuentes fiables de agua de calidad mediante tecnologías de regeneración de agua residual (DeSena, 1999). La investigación continuada y los proyectos de demostración resultarán en progresos adicionales en el desarrollo de procesos de tratamiento más económicos, que podrán ser adoptados en numerosas aplicaciones de reutilización de agua en el futuro.

No obstante, es también importante señalar que el progreso de la regeneración y reutilización planificada del agua no depende únicamente de los avances tecnológicos. La gestión de todo el proceso, desde la planificación del proyecto y su información pública hasta la explotación y mantenimiento de las instalaciones juegan un papel determinante en el éxito de un proyecto de reutilización planificada. A este respecto baste citar la exposición de motivos de un importante proyecto de investigación en curso de realización promovido por la Water Environment Research Foundation, bajo el título de Estudio sobre Prácticas de Gestión en Reutilización de Agua con Fines no Potables. En la memoria justificativa del proyecto de investigación se indica explícitamente que "la experiencia muestra que las entidades encargadas de la reutilización de agua se ven confrontadas con problemas institucionales, legales, normativos, de estimación de costos, de comercialización, de financiación y de responsabilidades que por regla general resultan ser más determinantes en la puesta en marcha del proyecto que los aspectos puramente técnicos". Los resultados de este estudio han de contribuir a una mejor comprensión del papel e importancia relativa que todos esos elementos, entre ellos los puramente técnicos, juegan en el

éxito de un proyecto de reutilización planificada.

LA 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 consumos domésticos asociados 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 hidráulicos en esas condiciones se plantea con dos objetivos complementarios: 1) La utilización racional del agua, evitando los consumos excesivos. 2) La reutilización de agua residual para usos no potables, especialmente la jardinería, la agricultura y la mejora ambiental, permitiendo 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 e información ciudadana, la reglamentación y las tarifas progresivas y, de otra parte, la regeneración y reutilización de efluentes de agua residual.

Las zonas costeras españolas se caracterizan por el relativo paralelismo entre las mayores producciones de agua residual que se registran durante la temporada estival y la máxima demanda de agua para riego agrícola y de jardinería que se produce en esa misma estación. Al margen de las exigencias técnicas y financieras que esas demandas estacionales plantean, tanto en el sistema de abastecimiento de agua como en el de tratamiento y vertido de agua residual, la reutilización de agua residual en zonas costeras ofrece claras ventajas económicas y ambientales en sus diversas alternativas: 1) Riego de jardinería, con lo que ello conlleva de mejora de las condiciones de vida, del aspecto estético y del carácter lúdico de la zona. 2) Riego agrícola, como fuente de recursos económicos de gran interés. 3) Recarga de acuíferos costeros y de zonas hú-

medas, como forma de protección de recursos naturales de gran atractivo y valor ambiental.

Aunque la reutilización de agua residual en zonas del interior no permite la creación neta de nuevos recursos hidráulicos, sí ofrece la posibilidad de una mejor gestión del agua, mediante la sustitución de agua potable de consumo público por agua residual regenerada para aquellos usos en que no sea necesario agua potable. Hay que señalar por último que una instalación de regeneración de agua residual destinada al riego agrícola y de jardinería, o de otro tipo, en una zona turística española ha de convertirse en un estándar 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 tan importante de la gestión de los recursos hidráulicos.

COSTES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

La escasez de instalaciones de regeneración de agua residual en zonas de características socio-económicas como las españolas no permite ofrecer estimaciones precisas de sus costes de explotación y mantenimiento. La Universidad Politécnica de Cataluña viene colaborando desde 1985 con entidades públicas y privadas en la planificación y explotación de diversos proyectos de reutilización de agua para uso agrícola y de jardinería, y en particular de campos de golf. El primer proyecto de demostración de riego de campos de golf se inició en 1989 con la puesta en funcionamiento del Campo de Golf Mas Nou en Castell Platja d'Aro, Girona, en base a un convenio entre la UPC, la Junta de Sanseamiento de la Generalitat de Catalunya, el Consorcio de la Costa Brava y la sociedad promotora del campo de golf. El objetivo del proyecto de demostración fue definir los criterios sanitarios, agronómicos y económicos que debían seguirse en un aprovechamiento de este tipo (Mujeriego y Sala, 1991; Mujeriego y col., 1996a, 1996b).

CONCEPTO	CONTENIDO	COSTE PARCIAL PTA/M ³	COSTE ACUMULADO PTA/M ³
Amortización	543 millones de pesetas	4,40	4,40
Reactivos	coagulante polielectrólito desinfectante	2,08	3,30
		1,12	
Energía	340 hp instalados	0,40	0,40
Personal	4 operarios	0,95	0,95
Mantenimiento preventivo	material de repuesto	0,40	0,40
Coste total			9,45

Tabla 1. Costes de amortización y de explotación y mantenimiento del agua regenerada en la planta de Vitoria-Gasteiz, con capacidad para 35 000 m³/día (Del Río y col., 1996).

Los resultados obtenidos durante los 7 años transcurridos han permitido consolidar un sistema de gestión que incluye (Mujeriego y col., 1996a, 1996b): 1) Un proceso de regeneración de agua basado en una desinfección con cloro de un excelente efluente secundario. 2) Un seguimiento de la calidad del agua en los lagos ornamentales utilizados para almacenamiento y regulación del agua. 3) Un sistema de información sobre el contenido de nutrientes y salinidad del agua que permite optimizar la fertilización del campo de golf. El Consorcio de la Costa Brava, a través de la empresa responsable de la explotación de la planta depuradora, ofrece un agua regenerada de buena calidad sanitaria, con concentraciones inferiores a 10 coliformes fecales/100 ml a la llegada al primer lago ornamental; por otra parte el propio Consorcio facilita el seguimiento de la calidad del agua en los lagos ornamentales y la información relativa al contenido de nutrientes del agua regenerada.

El sistema de regeneración y reutilización de agua para riego agrícola de Vitoria-Gasteiz (Diputación Foral de Alava, 1995) se proyectó siguiendo la línea de tratamiento más exigente recomendada por el Título 22 del Código del Agua de California (Mujeriego, 1990) y está integrado por los procesos de coagulación-floculación, decantación, filtración con arena y desinfección con cloro líquido (2 horas de tiempo de contacto). El agua regenerada se utiliza para riego por aspersión de cultivos de consumo crudo; el plan de riego abarca 4.000 ha de la Llanada Alavesa, y permite regar durante el verano con una frecuencia de una parcela cada tres años. El modelo de gestión incluye la provisión del agua regenerada de excelente calidad (ausencia de coliformes fecales en 100 ml), así como información periódica sobre la salinidad del agua y su contenido de nutrientes, de modo que los agricultores puedan ajustar su plan de fertilización de manera adecuada. La planta de regeneración de agua de Vitoria-Gasteiz tiene una capacidad de 35.000 m³/día y forma parte de un plan integral más amplio que ha de permitir el aprovechamiento de todo el efluente secundario durante todo el año, y conseguir así la puesta en regadío de otras 7.000 ha, la mejora de la calidad del agua del río Zadorra y la sustitución de caudales de desembalse a dicho río.

El proyecto de regeneración y reutilización de agua más reciente es el existente en la planta depuradora de Vilaseca y Salou, en Tarragona. El proceso de regeneración sigue un esquema similar al establecido en el Título 22 del Código del Agua de California y tiene una capacidad punta de 700 m³/hora, lo que permite suministrar un caudal máximo de 14.000 m³/día, distribuido en 9 horas de riego. El efluente secundario que no se regenera se vierte al mar mediante un emisario submarino.

Actualmente, la instalación de regeneración produce unos 5.000 m³/día que son utilizados durante la primavera y verano para el riego de las zonas ajardinadas del Parque Temático de Port Aventura.

Los datos más recientes facilitados por el Consorcio de la Costa Brava (comunicación personal, 1999) y los publicados por los responsables de la explotación de la planta de regeneración de agua de Vitoria (Del Río y col., 1996) permiten establecer valores de referencia del coste del agua regenerada en España. El último acuerdo firmado entre el Consorcio de la Costa Brava y el promotor del Campo de Golf de Platja d'Aro establece un coste del agua regenerada de 10 pta/m³. Este coste incluye la disponibilidad de un caudal máximo de 2.400 m³/día de efluente secundario desinfectado con radiación ultravioleta y cloro, más un seguimiento técnico de la calidad sanitaria y agronómica del agua regenerada y del agua de los lagos ornamentales. Como información complementaria cabe citar que el coste del bombeo del agua regenerada hasta el campo de golf (300 m de desnivel, 1.000 m de conducción) son abonados por el promotor del campo de golf separadamente.

La *Tabla 1* resume los costes de amortización y de explotación y mantenimiento de la planta de regeneración de agua de Vitoria-Gasteiz, con una capacidad de tratamiento de 35.000 m³/día (Del Río y col., 1996). La inversión de 543 millones corresponde al presupuesto de la obra civil y los equipos de la planta de regeneración propiamente dicha (200 millones de pesetas) así como de los equipos de bombeo de agua regenerada (5 bombas de 270 hp), el edificio de control, la línea eléctrica y los transformadores que normalmente habrían de repercutirse sobre los cuatro módulos de tratamiento, con capacidad de 35.000 m³/día cada uno, que está previsto construir en próximos años. No obstante, una inversión total de 543 millones de pesetas como la realizada hasta el momento ha permitido generar un recurso hidráulico cifrado en 12,6 hm³, lo que representa una inversión unitaria de unas 45 pta/m³, inferior a la requerida por un embalse. Por otra parte, el coste del agua regenerada a la salida de la planta se sitúa en torno a 9,5 pta/m³, muy similar al establecido por el Consorcio de la Costa Brava. La mayor escala del proyecto y la mayor eficacia del proceso de desinfección, al tratarse de un efluente de gran transparencia, permiten mantener un coste unitario muy favorable.

Las aportaciones de nitrógeno y fósforo del agua regenerada contribuyen de forma efectiva a la fertilización de los cultivos, tanto agrícolas como campos de golf. Esto requiere una atención especial por parte de los explotadores, que les permita reducir las aportaciones de fertilizantes externos y evitar así

una fertilización excesiva, con los consiguientes perjuicios que ello ocasionaría tanto para el cultivo como para el suelo y los acuíferos. El aprovechamiento del contenido fertilizante del agua regenerada resulta en un ahorro del coste del agua regenerada, que en el caso de un campo de golf puede cifrarse entre 3 y 4 millones de pesetas anuales (Sala y Millet, 1995; Mujeriego y col., 1996a).

Como información comparativa puede añadirse que el proyecto final del sistema de regeneración de agua para uso potable indirecto propuesto en 1993 para la ciudad de San Diego, en California, tiene una capacidad para regenerar 76.000 m³/día de agua y un presupuesto total de 154 millones de dólares, lo que equivale a 24.000 millones de pesetas aproximadamente. El coste unitario del agua suministrada por esta instalación se estimó en 98 pta/m³ aproximadamente, valor comparable al de las otras fuentes de abastecimiento de la zona.

CONCLUSIONES

El análisis realizado en los apartados precedentes permite formular las siguientes conclusiones:

1. La reutilización planificada de agua residual constituye un componente esencial de la gestión integral de los recursos hídricos, especialmente en zonas costeras, donde puede contribuir de forma significativa al aumento neto de dichos recursos, tanto para su reutilización en usos no potables como para su infiltración y almacenamiento en acuíferos.
2. La regeneración de agua residual se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad. La elaboración y comercialización de este producto debe plantearse en un marco más amplio que el tradicional de lucha contra la contaminación, y con una nueva mentalidad en la planificación, concepción y explotación de los procesos de regeneración diferente a la adoptada generalmente en el tratamiento de agua residual.
3. La concepción actual de los proyectos de reutilización exige una coordinación institucional, reglamentaria, financiera, de ámbito geográfico de influencia y técnica, tanto durante la construcción como durante la explotación y mantenimiento, en un grado muy superior al empleado tradicionalmente en la gestión de los recursos hidráulicos.
4. El debate técnico sobre 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 indirecta para usos

- potables, o de restringir la reutilización a los usos no potables.
- La literatura técnica reconoce explícitamente dos circunstancias importantes que conviene resaltar: 1) Que la mayor parte de los efluentes de aguas residuales se vierten actualmente a cursos de agua que eventualmente se utilizan como fuentes de agua de abastecimiento, y consiguientemente constituyen una reutilización incidental indirecta para uso potable. 2) Que la implantación satisfactoria de proyectos de reutilización planificada para usos urbanos no potables requiere muy poca tecnología nueva o avanzada adicional.
 - Entre los avances tecnológicos que han de contribuir al desarrollo de la reutilización planificada del agua cabe destacar la implantación progresiva de sistemas de regeneración de agua basados en el uso conjunto de procesos de tratamiento convencionales y de procesos basados en membranas sintéticas, con alternativas que van desde la microfiltración hasta la ósmosis inversa.
 - El progreso de la regeneración y reutilización planificada del agua no depende únicamente de los avances tecnológicos. La gestión de todo el proceso, desde la planificación del proyecto y su información pública hasta la explotación y mantenimiento de las instalaciones, juega un papel determinante en el éxito de un proyecto de reutilización planificada.
 - El coste de producción de un agua regenerada de calidad suficiente para su utilización sin ningún tipo de restricciones en el riego de productos de consumo crudo se sitúa en torno a 10 pta/m³ a la salida de la planta de regeneración. A este coste hay que añadir el correspondiente a los dispositivos de impulsión hasta el punto de utilización. Por otra parte, el nitrógeno y el fósforo contenidos en un agua regenerada puede representar un ahorro de varios millones de pesetas anuales, cuando el agua se utiliza para riego agrícola o de jardinería, siempre que se lleve a cabo una gestión adecuada del programa de fertilización.
 - Los proyectos de demostración de reutilización planificada de agua residual contribuyen al desarrollo y aceptación de estas técnicas, permitiendo comprobar su capacidad para aportar recursos hidráulicos, reciclar elementos nutritivos y asegurar la calidad sanitaria y ambiental. La implantación de un proyecto de reutilización planificada de efluentes en cualquier zona española pasará a convertirse en un estándar tecnológico y de prestigio de primera magnitud en todo el sur de Europa y la región mediterránea, y le conferirá una posición de vanguardia en esta faceta tan importante de la gestión de los recursos hidráulicos. 

BIBLIOGRAFÍA

ASANO, T., D. RICHARD, R. W. CRITES y G. Tchobanoglous (1991): Evolution of tertiary treatment requirements in California. *Water Environment and Technology*, vol. 4, n.º. 2.

ASANO, T. y R. A. MILLS (1990): Planning and Analysis for Water Reuse Projects. *Journal of the American Water Works Association*. Enero de 1990.

DEL RÍO, F., J. LÓPEZ y I. DE JUANA (1996): Reutilización del agua residual, experiencias prácticas en Vitoria. Comunicación presentada en las XVII Jornadas de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento.

DESENA, M. (1999): Public Opposition Sidelines Indirect Potable Reuse Projects. *Water Environment and Technology*, vol. 11, n.º. 5, págs. 16-18.

Diputación Foral de Alava, Gobierno Vasco y Aguas Municipales de Vitoria (1995). *Plan de Recuperación y Reutilización Integral de las Aguas Residuales de Vitoria-Gasteiz*. Diputación Foral de Alava, Vitoria.

HARRIS, R. (1999): Water Reuse Objection. *Water Environment and Technology*, vol 11, n.º. 6, págs. 8-9.

MUJERIEGO, R. (Editor) (1990): *Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

MUJERIEGO, R. y ASANO, T. (1999): The role of Advanced Treatment in Wastewater Reclamation and Reuse. Actas de la 2nd International Conference on Advanced Wastewater Treatment, Recycling and Reuse, celebrada en Milan, septiembre de 1998, y publicada en *Water Science and Technology* (en imprenta).

MUJERIEGO, R. y L. SALA (1991): Golf course irrigation with reclaimed wastewater. *Wastewater reclamation and reuse*. *Water Science and Technology*, vol. 24, n.º. 9. International Association on Water Pollution Research and Control, Pergamon Press.

MUJERIEGO, R., L. SALA, J. SALA y S. MARTÍNEZ (1996a): *Gestión del Agua Residual Regenerada utilizada para regar el campo de golf Mas Nou*. Séptima Memoria Anual. Sección de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña.

MUJERIEGO, R., L. SALA, M. CARBÓ y J. TURET (1996b): Agronomic and Public Health Assessment of Reclaimed Water Quality for Landscape Irrigation. *Water Science and Technology*, vol 33, N.º. 10-11, págs. 335-344. IAWQ, Pergamon Press.

National Water Research Institute (1999): *Non-Potable Water Recycling*. Report number NWRI-99-02. E-mail: nwri-1@worldnet.att.net.

OKUN, D. (1999a): Water Reuse Objection. *Water Environment and Technology*, vol 11, n.º. 6, pág. 8.

OKUN, D. (1999b): Potable Reuse: Public Education not the Issue. *Water Environment and Technology*, vol 11, n.º. 7. Págs. 6-8.

Organización Mundial de la Salud (1989): *Directrices Sanitarias sobre el uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura*. Serie de informes técnicos 778. Ginebra, Suiza.

SALA, L. y X. MILLET (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.

United States Environmental Protection Agency and United States Agency for International Development (1992): *Manual on Guidelines for Water Reuse*. EPA/625/R-92/004, september 1992. Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.

Water Pollution Control Federation (1989): *Water Reuse (Second Edition)*. Manual of Practice SM-13. Virginia, Estados Unidos.



CURRICULUM



RAFAEL MUJERIEGO.

Ingeniero de Caminos (Madrid, 1971) y doctor en Ingeniería Sanitaria (1976), en la Universidad de California en Berkeley. Catedrático de Ingeniería Ambiental en la ETS de Ingenieros de Caminos de la UPC, y presidente (1995-2000) del Grupo Especializado en Regeneración y Reutilización de Agua de la Asociación Internacional del Agua (IWA).