



La reutilización, la regulación y la desalación de agua

Rafael Mujeriego

DESCRIPTORES

REGENERACIÓN DE AGUA
REUTILIZACIÓN DE AGUA
REUTILIZACIÓN PLANIFICADA
REGULACIÓN DE AGUA
DESALACIÓN DE AGUA
GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA

Introducción

Los recursos hídricos de la biosfera se presentan en formas y con dimensiones muy variadas, desde las más evidentes masas de agua superficiales que discurren por los ríos o emergen desde los manantiales, hasta las masas de agua almacenadas en los acuíferos aluviales de los ríos o en los pequeños lagos de alta montaña aislados de un flujo continuo de agua. Esos recursos han venido siendo utilizados por la especie humana con una intensidad creciente para aprovechamientos muy diversos, entre los que destacan el abastecimiento, la agricultura, la industria y el ocio.

Entre los grandes avances realizados durante las últimas décadas en el conocimiento de los recursos hídricos de la biosfera cabe destacar dos: 1) el reconocimiento de la existencia de una relación cuantitativa y cualitativa entre las diferentes formas físicas en que se presentan esos recursos y entre éstas y otros componentes de la biosfera, como el flujo de energía y los seres vivos, y 2) la consideración del medio ambiente "per se" como un usuario legítimo de esos mismos recursos hídricos.

La concepción de los recursos hídricos como un conjunto de elementos relacionados entre sí y con todos los demás elementos de la biosfera, de modo que una modificación puntual de uno de ellos genera una alteración de los restantes elementos, cuya actividad conjunta viene determinada por flujos de energía, ha llevado a la evidencia de adoptar la designación de ecosistema acuático y también a la expresión más común de visualizarlo como "el ciclo del agua". Por otra parte, la consideración del agua como un elemento esencial del ecosistema que forma la biosfera, más allá de las utilidades que los seres humanos puedan hacer de ese recurso, ha lle-

vado a nuevas concepciones de lo que debe ser una gestión más equilibrada de los recursos hídricos, como la que establece la Directiva Marco del agua (DOCU, 2000).

En este contexto, la gestión integrada de los recursos hídricos trata de definir su asignación armónica y equilibrada entre los diferentes usos o aprovechamientos, teniendo en cuenta las relaciones existentes entre los diferentes componentes de esos recursos y en particular el papel determinante que el agua tiene para la preservación y la mejora del medio ambiente.

Para atender los aprovechamientos urbanos, agrícolas e industriales, y en cierto modo también para asegurar la preservación del medio ambiente, se dispone de diversas opciones con las que asegurar la garantía o fiabilidad requeridas. Las opciones disponibles, en orden creciente de complejidad y de especificidad, son: 1) la protección y mejora de las fuentes convencionales de agua, 2) el ahorro de agua, mediante su uso eficiente, 3) la regulación o el almacenamiento de volúmenes adicionales de agua, 4) el intercambio de recursos entre diferentes usuarios, 5) la regeneración y la reutilización planificada, y 6) la desalación de aguas salobres y marinas.

La utilización de cualquiera de estos elementos de gestión requiere una valoración objetiva de sus beneficios, limitaciones y requisitos, de modo que sea posible alcanzar conclusiones bien justificadas y coherentes. Los criterios de valoración ambiental, social y económica constituyen elementos básicos a tener en cuenta en este proceso. Conviene resaltar que los resultados de esta valoración objetiva, de carácter eminentemente técnico, ofrecen un fundamento sólido a tener en cuenta por los posteriores planes, programas y políticas de recursos hídricos que establezcan las administraciones y los gobiernos.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es evaluar las posibilidades y los requisitos que la reutilización planificada del agua tiene como elemento de la gestión integrada del agua, estableciendo una valoración comparativa con otras técnicas de gran actualidad, como la regulación superficial y subterránea del agua y la desalación de agua marina. Entre los objetivos específicos de este trabajo cabe señalar: 1) la enumeración de los criterios básicos de una gestión integrada, 2) la presentación de las características propias de la reutilización planificada, 3) la descripción de los objetivos y condicionantes básicos de la regulación mediante acuíferos y embalses en derivación, 4) la evaluación de los objetivos y condicionantes básicos de la desalación de agua marina, 5) la valoración comparativa de la reutilización planificada, la regulación y la desalación de agua, y 6) la valoración del estado actual de la desalación en zonas áridas, como el sur de California.

Criterios de gestión integrada

La gestión integrada de los recursos hídricos se rige fundamentalmente por tres criterios operativos:

1. Diversificar las alternativas utilizadas, como forma de asegurar la fiabilidad o la garantía de la solución conjunta. El hecho de que las sociedades desarrolladas hayan alcanzado la explotación casi completa de los recursos hídricos más inmediatos o fáciles de desarrollar, hace con frecuencia que sea prácticamente inviable la obtención de soluciones "únicas" o "absolutas" a los retos actuales y que, por tanto, deba recurrirse a la aplicación de una serie coordinada de soluciones parciales para resolver los problemas.
2. Utilizar una combinación equilibrada tanto de infraestructuras como de formas de gestión que, con agilidad y flexibilidad, potencien la capacidad y las posibilidades de unas y otras para atender las ofertas y las demandas en el espacio y en el tiempo.
3. Planificar sistemáticamente esas actuaciones, especialmente las infraestructuras, pero también las formas de gestión, de modo que sea posible asegurar tanto la consecución de sus objetivos técnicos y económicos como su debate, revisión y aceptación por parte de todos los usuarios, incluidos los encargados de la preservación y mejora del medio ambiente.

Normativas legales recientes, como la Directiva Marco (DOCU, 2000) y las propuestas de organismos internacionales y de asociaciones profesionales (ACWA, 2005), enfatizan la importancia de estos tres criterios operativos.

El reciente plan de acción *No Time to Waste*, publicado por la Association of California Water Agencies (ACWA, 2005), ilustra el interés y el orden de prioridad de estas alternativas de gestión. El Plan de Acción describe "una serie de actuaciones y de inversiones destinadas a resolver las necesidades de agua en California durante las próximas décadas, con objeto de que las autoridades estatales y federales puedan contribuir al desarrollo del sistema de abastecimiento de agua que California necesita para sustentar su población, sus puestos de trabajo y sus ecosistemas en el futuro" (ACWA, 2005).

Entre las recomendaciones clave de este Plan de Acción pueden destacarse: 1) la mejora de los sistemas de captación y abastecimiento de agua en el delta de los ríos Sacramento y San Joaquín, 2) la evaluación de los peligros a largo plazo que afectan a los diques de contención de los cauces de agua dulce en el delta, 3) la continuación de las tareas de protección de los sistemas estatales de abastecimiento de agua y del medio ambiente, 4) el desarrollo de capacidades adicionales de regulación de aguas subterráneas y superficiales, 5) el estímulo y la financiación de los esfuerzos realizados a nivel local para ampliar tanto la reutilización planificada del agua como el uso eficiente del agua y la desalación de aguas marinas y aguas de acuíferos salobres.

Como ejemplo de la similitud de las inquietudes que afectan a los redactores de este plan con los autores de la propuesta 2000 del Plan Hidrológico Nacional (MMA, 2000), puede indicarse que una de las limitaciones más significativas de nuestros cauces era la falta de calidad del agua en tramos de río y en embalses, lo que dificultaba los posibles trasvases de aguas entre cuencas. A este respecto, las mejoras alcanzadas con la aplicación progresiva de planes de saneamiento y el cumplimiento de los límites de vertido requeridos por la Directiva 91/271 (DOCU, 1991) han potenciado la implantación de una mejor gestión de los recursos hídricos.

La reutilización planificada

El proceso de tratamiento necesario para que un agua residual depurada 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 en aprovechamientos urbanos, industriales o de otro tipo.

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 contemple dar al agua, y 2) identificar los procesos de tratamiento y los límites de calidad del efluente recomendados para cada uno de los usos previstos. La elaboración y la aprobación de estos dos aspectos técnicos de la regeneración del 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 (USEPA, 2004; OMS, 1989).

El aprovechamiento de un agua regenerada requiere normalmente: 1) su transporte desde la planta de regeneración hasta su 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 del agua.

Los criterios y normas de calidad suelen ser elaborados por los servicios de salud pública, en estrecha colaboración con los responsables de la gestión de los recursos hídricos y de protección ambiental. Existe una estrecha relación entre las normas de calidad del agua regenerada y los requisitos de uso establecidos para su utilización.

La experiencia práctica de numerosos países pone de manifiesto la posibilidad de adoptar dos estrategias básicas: 1) establecer unas normas de calidad del agua regenerada poco exigentes, asociadas con unos sistemas de regeneración con eficiencia y fiabilidad limitadas y unos requisitos de explotación mínimos, pero condicionadas por unas restricciones muy exigentes en cuanto al uso del agua en cada tipo de aprovechamiento, y 2) establecer unas normas de calidad del agua regenerada muy exigentes, asociadas con unos sistemas de regeneración muy eficientes y fiables y unos requisitos de explotación estrictos, pero con unos condicionantes muy básicos y sencillos en relación con la utilización del agua para sus diferentes usos.

Mientras que la primera estrategia permite contemplar el proceso de regeneración como una tarea fácilmente asequible, las limitaciones y restricciones impuestas en el momento de utilizar el agua hacen que la reutilización pueda verse muy limitada en la práctica, pudiendo llegar a hacerla inviable. Por el contrario, la segunda estrategia exige unos sistemas de regeneración de gran calidad y fiabilidad, pero minimiza significativamente las tareas de control posterior durante la utilización del agua, potenciando su reutilización efectiva. El análisis económico que se realiza en apartados posteriores ilustra claramente la ventaja de esta segunda estrategia, en razón de la importancia relativa tan limitada que el proceso de regeneración tiene con respecto al coste global del proyecto de reutilización.

Beneficios de la reutilización planificada

El balance hídrico 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 irrecuperables, cuyo destino es la atmósfera o el mar. Cualquier actuación destinada a conservar agua que consiga reducir esas pérdidas irrecuperables mejorará la disponibilidad de agua para su aprovechamiento a lo largo del año. Por este motivo, la regeneración y la reutilización de agua únicamente resultarán en un incremento real de los recursos hídricos aprovechables en una zona si esas aguas se pierden actualmente de forma irrecuperable, 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 la reutilización de agua en zonas del interior potencian una gestión más adecuada de los recursos hídricos disponibles.

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

1. Un aporte adicional de recursos hídricos, bien sea en forma de recursos netos, o bien de recursos alternativos que permiten liberar recursos de agua de mejor calidad (potables, por ejemplo) que se pueden destinar al abastecimiento público.
2. Una disminución de los costes de tratamiento y de vertido del agua residual. La reutilización de un agua ofrecerá una clara ventaja económica cuando los requisitos de calidad del tipo de reutilización considerada sean menores que los establecidos por los objetivos de calidad del medio receptor en el que se ha de realizar el vertido del agua residual depurada.
3. 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.
4. El aplazamiento, la reducción o incluso la supresión de instalaciones adicionales de tratamiento de agua de abastecimiento.
5. Un ahorro energético y una menor producción de dióxido de carbono, al evitar aportes de agua desde zonas alejadas a la planta de regeneración de agua.
6. Un aprovechamiento de los elementos nutritivos contenidos en el agua, especialmente cuando se utiliza para riego agrícola y de jardinería.
7. Una mayor fiabilidad y regularidad del caudal de agua disponible. El flujo de agua depurada es generalmente mucho más fiable que el de la mayoría de los cauces naturales de agua en zonas semi-áridas como las españolas.

Exigencias de la reutilización planificada

Uno de los factores determinantes de la implantación y el desarrollo de la reutilización planificada del agua es el establecimiento de unas normas de calidad 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 solo para casos excepcionales. Siguiendo este mismo criterio, la reutilización suele plantearse preferentemente con las aguas depuradas que tienen una mayor proporción de aguas domésticas.

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. El objetivo es 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 del 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, donde la red existente debe reservarse para el abastecimiento de agua potable. 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.

Costes de la regeneración

Las Jornadas Técnicas sobre Reutilización del Agua, organizadas por el Consorcio de la Costa Brava en octubre de 1985 en Castell-Platja D'Aro constituyen uno de los hitos de la reutilización planificada en España. Las reflexiones y las experiencias planteadas allí por técnicos e investigadores de California, de Israel y de diversas comunidades autónomas españolas sirvieron de incentivo para que la regeneración y la reutilización del agua se hayan convertido en un éxito real en numerosas zonas españolas, especialmente las de carácter semi-árido y árido de las zonas costeras.

La entrada en funcionamiento de diversos proyectos de reutilización para riego de jardinería en la Costa Brava, promovidos por el Consorcio de la Costa Brava, y de la planta de regeneración de agua de Vitoria-Gasteiz en 1995, pro-



Fig. 1. Riego de campos de golf con agua regenerada en el Consorcio de la Costa Brava.



Fig. 2. Muestras del agua producida en la planta de regeneración de Vitoria-Gasteiz.

movida por la Comunidad de Regantes Arrato y financiada por la Diputación Foral de Álava, con una capacidad para producir 35.000 m³/día de agua para riego sin restricción, marcaron una primera década de este proceso, cuyo logro principal fue documentar la capacidad personal y tecnológica de nuestras instalaciones para obtener un agua regenerada de calidad comparable a otros países pioneros, y para utilizarla de forma eficiente para el riego de jardinería y de cultivos de consumo crudo 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 costeras españolas han marcado una segunda década de este proceso de desarrollo de la reutilización planificada. Su logro más destacado ha sido 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. El coste de producción de 0,06 euros/m³ estimado inicialmente en Vitoria-Gasteiz ha pasado a ser una referencia para otras comunidades autónomas, como lo indica su inclusión en los actuales presupuestos de la Entitat de Sanejament d'Aigües de la Generalitat Valenciana (EPSAR, 2005). El embalse regulador de Vitoria-Gasteiz, con capacidad para 7 hm³ ha representado una inversión de la Diputación Foral de Álava de 1,8 euros/m³.



Conviene resaltar que la práctica totalidad de los proyectos de reutilización planificada del agua que se han ido implantando en el territorio peninsular han sido promovidos por los propios usuarios, motivados por la necesidad coyuntural de agua. Todos estos proyectos han sido realizados sin que existiera un marco regulador que defina 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 de calidad y requisitos de uso.

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 comporta. 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 y de campos de golf. Parece evidente que el objetivo a conseguir en la tercera década que se inicia en el 2005 habrá de ser conseguir que la reutilización planificada se convierta realmente en un elemento más de la gestión integrada de los recursos hídricos, mediante acuerdos entre usuarios urbanos, agrícolas y de ocio.

El plan de reutilización integral de Vitoria-Gasteiz ofrece un marco de referencia casi ideal para evaluar las implicaciones económicas que la reutilización planificada del agua comporta:

1. Unos costes anuales de explotación y mantenimiento de la planta de regeneración cifrados en 0,4 millones de euros, que permite producir 12,5 hm³ anuales de agua regenerada con calidad adecuada para riego sin restricciones.
2. Una inversión de 3,25 millones de euros para construir la planta de regeneración de agua, con una capacidad de 35.000 m³/día (400 l/s).
3. Una inversión de 28 millones de euros para sufragar la construcción de una red de riego de nueva planta para distribuir el agua en 10.000 ha, incluyendo los bombeos y un embalse regulador de 7 hm³ para almacenar agua en el invierno y así poder regar durante el verano.



Fig. 3. Embalse regulador de las aguas regeneradas producidas en la planta de Vitoria-Gasteiz, con una capacidad de 7 hm³, completado en el otoño de 2004.

Como ilustran estas cifras, las mayores exigencias económicas vienen determinadas por la reutilización (distribución al usuario), mientras que el coste de la planta 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 suficientes para permitir el riego sin restricción, son de escasa significación relativa cuando se plantea un proyecto de reutilización planificada con una cierta visión de futuro, en consonancia con los niveles de protección ambiental y de salud pública propios de una sociedad como la del siglo XXI en España.

Regulación de recursos

La regulación del agua mediante embalses constituye una de las facetas más controvertidas de la gestión de los recursos hídricos. Además del papel fundamental de los embalses para regular un régimen de precipitaciones tan irregular como el español, los embalses ofrecen la protección de las poblaciones y de los recursos naturales ante las catastróficas consecuencias que las avenidas y las inundaciones causadas por esos regímenes de lluvia pueden y suelen causar en las cuencas de nuestros ríos.

La alteración del flujo de sedimentos, con el consiguiente almacenamiento en el propio embalse y el déficit en zonas de sedimentación deltaica, junto con la alteración del flujo de agua y de la circulación de ciertos componentes de la fauna (truchas, salmones) son alteraciones que conviene remediar y que pueden ser evitadas con formas de construcción modernas. La instalación de una rampa de desviación de sedimentos, en la cabecera del embalse, contribuye a mantener el flujo de sedimentos a través de la franja de río afectada. La construcción de embalses en derivación (*off-stream*) permite limitar significativamente las afecciones ambientales. El Diamond Valley Lake, del Metropolitan Water District of Southern California (MWD, www.mwdh2o.com), con una capacidad de 1.000 hm³, representa un ejemplo de cómo se pueden regular los caudales excedentes en tiempos de abundancia, para ser posteriormente turbinados y liberados en los canales de



Fig. 4. Vista del embalse regulador de aguas superficiales Diamond Valley Lake y del canal de trasvase de aguas hacia San Diego, gestionados por Metropolitan Water District.

abastecimiento en momentos de escasez; la inversión unitaria de este embalse en derivación, delimitado por tres presas de materiales sueltos y construido atendiendo a los requisitos ambientales del momento, se sitúa en 2,0 dólares del año 2000 por cada metro cúbico de capacidad. Este coste unitario es similar al de 1,8 euros por metro cúbico de capacidad del embalse de 7 hm³ construido en Vitoria-Gasteiz en 2004.

El uso conjunto de aguas superficiales y aguas subterráneas es una estrategia ampliamente estudiada y debatida en España (ITGE, 2000) que solo ha alcanzado una aplicación limitada, incluso tras los episodios de sequía y escasez de recursos experimentados durante las últimas décadas en diversas zonas del país. Como ejemplo del potencial que ofrece este elemento de gestión, puede citarse el caso del MWD, distribuidor en alta de agua de abastecimiento para 18 millones de habitantes del sur de California. El MWD ha venido estableciendo durante la última década acuerdos con un total de seis municipios y comunidades de regantes dotadas de acuíferos, que le han permitido dotarse de una capacidad de regulación de 230 hm³, ligeramente superior a la capacidad del Lake Mathews, el segundo embalse por capacidad de California. El acuerdo más reciente ha sido establecido en febrero de 2005 con la ciudad de Compton, tiene una duración de 25 años y contempla la posibilidad de infiltrar hasta 2,8 hm³ de agua excedente del trasvase Sacramento-Los Ángeles, a cambio de una aportación de 2,42 millones de dólares, destinada a la rehabilitación de las tuberías y los pozos utilizados por la ciudad para la gestión de su abastecimiento a partir del acuífero en cuestión. Este acuerdo representa una inversión unitaria de 0,86 dólares por metro cúbico de capacidad de regulación, amortizables en 25 años.

Esta estrategia de almacenar agua superficial en los acuíferos utilizados para abastecimiento y regadío es una forma de implantar el concepto de "banco del agua" en California, con la particularidad de que se realiza entre operadores públicos y/o privados, sin la intervención directa de la administración estatal de los recursos hídricos, aunque con su conocimiento formal y asegurando la observancia de las reglamentaciones municipales, estatales y federales aplicables.

Desalación

La desalación de agua es una alternativa técnica bien consolidada que ha experimentado un auge considerable debido al continuo progreso en el desarrollo de las membranas de ósmosis inversa necesarias para la separación de las sales que contiene el agua. Los principales progresos de esta tecnología han permitido la utilización de nuevos materiales sintéticos, más resistentes a la temperatura, a la presión, a la acción del ensuciamiento biológico y a la acción de los compuestos químicos utilizados para su limpieza, así como el desarrollo de sistemas más eficaces de presurización del agua y sobre todo de recuperación de la presión del agua producto. Los datos experimentales más recientes indican una cierta estabilidad en las mejoras de ciertas facetas esenciales del proceso, especialmente en su consumo energético unitario. Las membranas de ósmosis inversa consiguen la separación de los iones y las molé-

culas disueltas mediante la difusión diferencial de éstos a través del material de la membrana, siendo las moléculas o los iones de menor tamaño los que más fácilmente la atraviesan (AW-WA, 1998). Por otra parte, se han identificado ciertos contaminantes del agua, especialmente de naturaleza orgánica, que tienen una afinidad especial por el material de la membrana y la atraviesan con relativa facilidad, al margen de su tamaño. La vida útil de las membranas de ósmosis inversa garantizada por la mayoría de fabricantes es de cinco años, pasados los cuales deben sustituirse. Conviene resaltar que, al contrario de lo que ocurre con otros procesos de tratamiento de agua, la membrana alcanza su mayor eficacia y durabilidad cuando se hace funcionar en régimen continuo. La interrupción excesiva y la parada prolongada de su funcionamiento se traducen normalmente en un deterioro acelerado de sus características filtrantes, lo que puede obligar a una sustitución anticipada.

California es un líder mundial en la fabricación de vasijas a presión para el alojamiento de las membranas de ósmosis inversa en la configuración de enrollamiento en espiral. California y Japón son dos de los líderes mundiales en la fabricación de membranas de ósmosis inversa. No obstante, la desalación de agua en California ha alcanzado una implantación muy limitada hasta el momento; el informe sobre *Water Desalination - Findings and Recommendations*, elaborado por un grupo de expertos para el Departamento de Recursos Hídricos en octubre de 2003 (DWR, 2003), indica que las 40 instalaciones dedicadas en esos momentos a la desalación de aguas salobres (incluyendo ósmosis inversa e intercambio iónico) representaban una producción anual de 210 hm³, mientras que las 16 instalaciones de desalación de agua marina generaban aproximadamente tan solo 6 hm³ de agua anualmente.

La razón fundamental de esta escasa implantación de la desalación de aguas marinas en el sur de California reside en el coste del agua desalada, considerablemente superior a los 0,35-0,40 dólares/m³ de agua en alta que cobra MWD a sus agencias y municipios, que se incrementa hasta 0,45 dólares/m³ cuando se incluyen los gastos de distribución.

El informe del DWR (2003) incluye una descripción muy clara y detallada de las consideraciones básicas a tener en cuenta para la implantación de una instalación de desalación de agua: 1) la necesidad de contar con una captación de agua aceptable ambientalmente, 2) la necesidad de disponer de un sistema de dilución y dispersión de las salmueras generadas durante el proceso, y 3) la conveniencia de disponer de una fuente de energía eléctrica económica, en razón del considerable consumo unitario de estas instalaciones. Una de las estrategias prácticas adoptadas para satisfacer esos requisitos consiste en situar la planta desaladora en las inmediaciones, si no en la misma propiedad, de una central eléctrica dotada de sistemas de refrigeración con agua de mar.

De este modo, 1) la captación de agua marina puede ser la misma que la utilizada para refrigerar la central eléctrica, una vez que ha pasado por las torres de refrigeración, 2) la dilución y el vertido de las salmueras pueden hacerse mediante su incorporación al caudal de aguas de refrigeración, aprovechando para su dilución los sistemas de dispersión del



agua de la central, y 3) la energía eléctrica puede obtenerse directamente de la central, minimizando los costes de distribución y de transporte, pudiendo incluso disfrutar de unas tarifas especiales. Además de las ventajas técnicas que ofrecen las dos primeras opciones, la posibilidad de evitar la aprobación de un nuevo estudio de impacto ambiental de la captación y del vertido, o simplemente complementar la tramitación de un informe ya aprobado, hace que la ubicación preferente de una planta de desalación de agua sea la zona inmediata a una central energética, en estrecha coordinación funcional con la misma. La planta de desalación de aguas de Carboneras, en la costa almeriense, y la ubicación propuesta para la planta de Carlsbad en el sur de California están planteadas según esta estrategia.

Entre las recomendaciones explícitas del informe del DWR (2003) cabe resaltar la conveniencia de adoptar una captación de agua a partir de pozos costeros, en lugar de tomas en mar abierto, ante la creciente evidencia del impacto que los sistemas de protección y filtración de los procesos de tratamiento pueden causar en la flora y la fauna marinas, tanto macroscópica como microscópica, propias de la franja costera, la más productiva del medio marino.

Costes comparativos

La tabla 1 resume los costes de inversión y de consumo energético que conllevan actualmente la regeneración de agua, la regulación en embalses en derivación y la desalación de agua 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 capaz por tanto de ser utilizada sin restricción respecto al posible contacto del agua con el público.

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 desalación. Si a ello se añade el período de amortización, es evidente que los costes unitarios de la regulación son los menores de todos ellos, seguidos por los de la regeneración y los de la desalación. Obviamente, la valoración completa de la reutilización requiere tener en cuenta los costes de inversión de la red de distribución que pueda ser necesaria. Por este

motivo, los proyectos de reutilización suelen plantearse de forma progresiva, en forma de "mancha de aceite", atendiendo inicialmente a los grupos de usuarios con mayor capacidad de uso o los más próximos a la planta de regeneración.

El consumo energético de estas tres alternativas marca igualmente una clara distinción entre ellas. Mientras que la regeneración tiene unos consumos unitarios inferiores a 1 kWh/m³, la desalación de agua marina alcanza normalmente valores próximos a 4 kWh/m³. Al margen del coste económico que esto representa, conviene tener en cuenta también el impacto ambiental que esos niveles de consumo eléctrico conllevan. Considerando que la aportación media de dióxido de carbono se sitúa en torno a 460 g/kWh producido en España y que el derecho de emisión de dióxido de carbono se sitúa actualmente en 23 euros por tonelada, cada kWh consumido en España añade un coste ambiental adicional de 0,01 euros/m³ al agua regenerada y de 0,04 euros/m³ al agua marina desalada.

La tabla no incluye valores del consumo energético para la regulación superficial o subterránea, pues es muy variable dependiendo de las circunstancias. Cuando la recarga de acuíferos se hace por infiltración, la energía necesaria para la introducción del agua puede ser insignificante, mientras que su extracción puede tener ventajas para los usuarios, pues el nivel de los pozos será superior al que tenían antes de la recarga.

La tabla 2 resume los consumos energéticos medios de los procesos comúnmente utilizados para la potabilización, la depuración y la regeneración de agua en las instalaciones del Consorcio de la Costa Brava, a partir de aguas superficiales. La tabla 2 también incluye los valores correspondientes a la desalación de agua marina de la planta de Blanes, con una capacidad de 29.000 m³/día. Los valores indican el aumento que se registra, de forma significativa en ciertos casos, cuando se incorporan los consumos asociados con todas las operaciones adicionales al tratamiento propiamente dicho. Los valores resultantes indican que los consumos correspondientes a la potabilización, la depuración y la regeneración son similares entre sí, oscilando entre unos máximos de 1,1 a 1,7 kWh/m³. El hecho de que la distribución de agua potable haya de asegurar unas presiones mínimas en zonas urbanas de diferentes alturas puede comportar unos consumos más elevados. El saneamiento se efectúa generalmente por gravedad (con bombes periódicos) y comporta unos consumos menores.

TABLA 1			
Costes de inversión y de consumo energético de diversos elementos de gestión de los recursos hídricos Consorcio Costa Brava, 2001-2004 (Sala y col., 2004), California, 2000, Palma de Mallorca, 2001 y Vitoria, 2004			
Alternativa	Inversión (€/m ³ -anual)	Amortización (años)	Consumo (kWh/m ³)
Regeneración (riego sin restricción)	0,26 (Vitoria)	15 - 25	0,001- 0,73 (CCB)
Regulación (en derivación)	1,8 (Vitoria) 2,0 dólares (California)	> 100	-
Regulación (en acuífero)	0,83 dólares (California)	25	-
Desalación agua marina (Blanes, Carboneras, futuro Barcelona, Palma de Mallorca)	3,0 - 4,0	5 (membranas) 25 (instalaciones)	3,8 - 4,0

TABLA 2		
Consumo energético, en kWh/m ³ , de los procesos de tratamiento y de suministro de agua en el Consorcio de la Costa Brava, 2001-04 (Sala y col., 2004)		
Proceso de tratamiento	Tratamiento exclusivamente	Captación, tratamiento e impulsión
Potabilización	< 0,17	0,15 - 1,7
Depuración	0,30 - 0,90	0,38 - 1,1
Regeneración	0,001 - 0,73	0,001 - 1,3
Desalación (Blanes y futuro Barcelona)	3,8 - 4,0	4,9 - 5,4 (Blanes)

Reutilización y desalación

La reutilización planificada y la desalación de agua tienen varios elementos en común que conviene resaltar. En primer lugar utilizan una fuente de materia prima no convencional y en cierto modo mucho más abundante que los recursos convencionales, especialmente cuando se piensa en el agua marina para la desalación. De modo similar, el agua resultante de ambos procesos necesita de conductos específicos para su incorporación a las redes de distribución de agua. Así, el agua regenerada se suministra mediante un conducto específico (para evitar su contacto con el agua de calidad potable), que puede existir previamente cuando se trata de una sustitución de agua para riego agrícola o de jardinería, o que es necesario construir nuevo cuando se trata de ampliar una actividad inexistente. Por otra parte, la incorporación del agua desalada a una red de abastecimiento, tanto si es para abastecimiento humano como para otros usos, requiere una conducción desde la planta desaladora hasta un punto de almacenamiento o de incorporación a la red abastecimiento que se trata de complementar. En ambos casos, el coste de esta conducción suele ser importante, aunque su relevancia relativa es mucho mayor en el caso de la regeneración, debido al menor coste unitario que la regeneración de un agua requiere generalmente con respecto a la desalación.

Tanto la regeneración como la desalación alcanzan su utilización óptima cuando las instalaciones funcionan de forma continuada y sistemática, de modo que los costes fijos de la inversión puedan distribuirse sobre el mayor volumen de agua producido. La circunstancia de que la inversión de una instalación de desalación alcance usualmente los 4 euros/m³-anual, en comparación con un valor inferior a 0,5 euros/m³-anual de la regeneración, hace que la planta de desalación deba ser explotada de forma casi permanente, con objeto de alcanzar la máxima producción anual de agua. En este sentido, su justificación económica es absolutamente similar a la de una central nuclear, en cuanto debe proporcionar una aportación de energía (o de agua, en el caso de la desalación) lo más estable posible. La gran diferencia entre la producción de energía y la producción de agua es que mientras que aquélla no se puede almacenar, el agua desalada o regenerada sí se puede almacenar mediante depósitos o embalses de regulación.

Una de las estrategias más eficaces y económicas para producir agua regenerada o desalada es utilizar una planta con una producción media igual a la requerida por el uso o aprovechamiento que se considere, y disponer de un dispositivo de regulación que permita ajustar la oferta y la demanda temporal de esos mismos usos. Esta propuesta óptima se puede ajustar mediante pequeños cambios en el factor de punta de la planta de producción y el nivel de cobertura del dispositivo de regulación. La ausencia de un sistema de regulación puede limitar considerablemente el alcance de la reutilización o de la desalación del agua, además de aumentar considerablemente su coste unitario.

La materia prima utilizada usualmente para la regeneración suele ser un buen efluente secundario de origen municipal, mientras que la desalación suele plantearse con agua



Fig. 5. Recarga de acuíferos con agua regenerada por el Orange County Water District, en el acuífero del río Santa Ana, en el sur de California.

marina. No obstante, caben soluciones intermedias, que acercan considerablemente los conceptos de regeneración y desalación. La utilización de agua salobre como materia prima para la desalación ofrece la gran ventaja económica del consumo energético unitario, en cuanto éste guarda una relación casi lineal con el contenido de sales del agua: mientras que las aguas salobres suelen oscilar en torno a los 5 g/l de sales disueltas, las aguas de mar contienen en torno a 35 g/l de sales disueltas, con lo que el consumo de energía para desalar agua de mar puede ser de 1,5 a 2,5 veces superior al de desalar aguas salobres (desalobrar). Estos valores vienen determinados por el tipo de agua, la capacidad de la planta, el tipo de tecnología y la temperatura del agua. Otra limitación importante de esta opción de desalación de agua es la disponibilidad en el tiempo de caudales de agua salobre, generalmente en acuíferos costeros; la sobre-explotación o el agotamiento del acuífero pueden obligar a suspender temporalmente la extracción de agua.

La utilización de un buen efluente secundario de origen municipal como fuente de agua para la desalación es una estrategia bien demostrada en proyectos como el de la Water Factory 21 que ha funcionado durante 25 años en el Orange County Water District (www.ocwd.com). La versión actualizada y ampliada de este concepto se está llevando a cabo en varias partes del mundo, en particular en Singapur (www.pub.gov.sg/newater) y en el Orange County Water District (Mujeriego, 2004). La ventaja de esta alternativa de regeneración-desalación es que utiliza una fuente de agua suficientemente abundante en la mayoría de los casos (efluente secundario), especialmente en zonas costeras, donde los efluentes tratados se vierten al mar, con efectos indeseables en algunos casos. Los datos disponibles del proyecto en curso de realización en el OCWD indican que el precio del agua regenerada-desalada producida, incluyendo los dispositivos de distribución a una barrera de intrusión salina (existente, en parte) y a las lagunas de recarga artificial de acuíferos se sitúa por debajo de los 0,40 dólares/m³, que es el precio máximo de las aguas superficiales utilizadas en esa zona para esos mismos usos.



Un último aspecto a destacar de ambas formas de generar recursos hídricos adicionales es la importancia trascendental que tiene establecer un acuerdo contractual, lo más específico posible, entre los responsables de la producción de agua regenerada y/o desalada y los futuros utilizadores de ese mismo producto. El incumplimiento de este elemento de la gestión plantea sistemáticamente numerosas dificultades a la hora de la puesta en marcha de la planta de producción de agua. La experiencia de numerosas encuestas y proyectos de reutilización de agua pone de manifiesto que los usuarios potenciales tienen inicialmente una predisposición favorable a utilizar el agua regenerada; no obstante, llegado el momento de utilizarla, suelen plantear numerosos impedimentos a su implantación. Mientras que el impedimento más frecuente en la reutilización de agua regenerada suele ser de tipo psicológico y concretamente la percepción del posible riesgo sanitario que su utilización puede comportar, el impedimento más frecuente para la utilización del agua desalada suele ser de tipo económico, ante su mayor coste unitario respecto al de los recursos convencionales. Así se explica que instalaciones como las existentes en Andarax, en la ciudad de Almería, con capacidad para producir 50.000 m³/día no hayan entrado en funcionamiento desde que la planta fue terminada en el año 2002, por la falta de acuerdo en la forma de ajustar las tarifas municipales. Del mismo modo, el que la planta de desalación de Carboneras, con una capacidad de 120.000 m³/día y completada en 2003, solamente produzca agua para alimentar la central térmica del mismo nombre situada en las inmediaciones, es debido a la dificultad de aplicar los acuerdos establecidos inicialmente con las comunidades de usuarios de las zonas limítrofes. En definitiva, mientras que la regeneración y la reutilización planificada del agua en España han sido impulsadas por el deseo de los usuarios de disponer de recursos adicionales de agua, la desalación ha sido generalmente (especialmente en la zona peninsular) una propuesta de las administraciones para ofrecer recursos adicionales o alternativos.

Marco actual de la desalación

Como ilustración del complicado marco económico, ambiental y social que plantea la desalación de agua de mar, tiene interés valorar las circunstancias en que se está evaluando la desalación de agua de mar en el sur de California: además de ser una zona líder en la producción tanto de membranas de ósmosis inversa como de vasijas de presión para las membranas, es una zona con una notable dependencia del agua importada de los ríos Sacramento-San Joaquín y Colorado, con una población que crece a un ritmo mínimo del 1,5% anual, con unas dotaciones de 400 a 700 l/hab-día y con el deseo de dotarse de recursos suficientes para su crecimiento y desarrollo económico.

Una de las propuestas más emblemáticas en estos momentos es la de construir una planta de desalación de agua marina en la inmediaciones de la central eléctrica de Encinas, en la población de Carlsbad. La propuesta consiste en instalar la planta desaladora en los terrenos de la central eléctrica, utilizando su toma de agua para abastecerse de agua marina, su sistema de vertido para disponer las salmueras y

su suministro eléctrico para impulsar la planta desaladora. La planta propuesta tiene una capacidad de 190.000 m³/día y un presupuesto de 270 millones de dólares, lo que representa una inversión unitaria de 3,91 dólares/m³-anual.

San Diego County Water Authority (SDCWA), uno de los usuarios principales del agua desalada, abona actualmente a MWD, el mayorista de la región, 0,35 dólares/m³ del agua superficial procedente de los diversos trasvases. Esta misma Water Authority cobra 0,45 dólares/m³ a las compañías de agua a las que abastece, tras incluir los costes de distribución y de otros tipos. La planta de desalación habría de entrar en servicio en 2010 y aportaría entre el 6 y el 15% del agua de abastecimiento del condado.

La empresa privada que patrocina el proyecto de desalación de Carlsbad estima que el coste del agua desalada y distribuida oscilará entre 0,73 y 0,81 dólares/m³, significativamente superior al del agua de superficie disponible en este momento. Con objeto de hacer estos precios competitivos, MWD ha aprobado recientemente un subsidio de 0,20 dólares/m³ para el agua desalada, durante los 25 años de funcionamiento de la planta.

Esta ayuda económica global de 350 millones de dólares comporta no obstante la renuncia legal expresa de SDCWA de no demandar a MWD ante los tribunales o el Parlamento por las tarifas unitarias que este último establezca en cada momento por el "alquiler" de sus conducciones para transportar el agua con que SDCWA se abastece a partir de compras a las comunidades de regantes. Estas dos agencias distribuidoras de agua mantienen un litigio histórico con motivo de lo que SDCWA considera unas tarifas excesivas, que referidas a los 45 a 75 años de duración de los acuerdos con las comunidades de regantes supondrían un coste para los contribuyentes del condado de 2.000 millones de dólares. El debate y la aprobación de estas propuestas han comenzado en julio de 2005.

Una propuesta similar se ha planteado a finales de julio de 2005 en la zona de Moss Landing, en la península de Monterey, al sur de San Francisco, para una planta desaladora de agua de mar con una capacidad de 35 hm³ anuales y un coste unitario del agua desalada de 0,97 a 1,05 dólares/m³. Esta zona está al norte y fuera de MWD y por tanto la iniciativa carece de un subsidio como el ofrecido por MWD en su zona de abastecimiento.

En resumen, la iniciativa de desalar agua de mar a gran escala en California acaba de plantearse a nivel institucional, con una previsión de al menos seis años para su implantación real, con una estimación de costes en torno a 0,75-0,80 dólares/m³ en el caso más favorable y con subsidios directos que alcanzan los 0,20 dólares/m³ por parte de agencias como MWD, que abastece a 18 millones de personas.

Conclusiones

La gestión integrada de los recursos hídricos se rige fundamentalmente por tres criterios operativos: 1) diversificar las alternativas utilizadas, como forma de asegurar la fiabilidad o la garantía de la solución conjunta, 2) utilizar una combinación equilibrada tanto de infraestructuras como de formas

de gestión que potencien su capacidad para atender las ofertas y las demandas en el espacio y en el tiempo, y 3) planificar sistemáticamente esas actuaciones, tanto las infraestructuras como las formas de gestión.

Entre las actuaciones concretas conviene resaltar: 1) la mejora de los sistemas de captación y abastecimiento de agua, 2) la evaluación de los peligros a largo plazo que afectan a esas fuentes, 3) la protección de los sistemas públicos de abastecimiento de agua y de mejora ambiental, 4) el desarrollo de la regulación de aguas subterráneas y superficiales, y 5) el estímulo y la financiación de la reutilización planificada del agua, el uso eficiente del agua y la desalación de aguas marinas y aguas de acuíferos salobres.

La reutilización planificada del agua puede aportar recursos adicionales de agua, especialmente en zonas costeras, donde los efluentes tratados se vierten al mar, y permite una mejor gestión de los recursos hídricos en zonas del interior. La reutilización planificada puede aportar numerosos beneficios, especialmente su gran fiabilidad o garantía, aunque puede requerir la instalación de una doble red de suministro.

Los costes de inversión aumentan a medida que se pasa de la regeneración a la regulación y a la desalación. Si se consideran además los períodos de amortización, los costes unitarios de la regulación son los menores de todos, seguidos por los de la regeneración y la desalación. La valoración completa de la reutilización requiere tener en cuenta los costes de inversión de la red de distribución que pueda ser necesaria, lo que explica que los proyectos de reutilización suelen plantearse de forma progresiva, atendiendo inicialmente a los grupos de usuarios con mayor capacidad de uso o los más próximos a la planta de regeneración.

La regeneración tiene unos consumos energéticos unitarios inferiores a 1 kWh/m³, mientras que la desalación de agua marina alcanza normalmente valores próximos a 4 kWh/m³. Los consumos correspondientes a la potabilización, la depuración y la regeneración son similares entre sí y oscilan entre unos máximos de 1,1 a 1,7 kWh/m³. A estos costes conviene

añadir el del correspondiente impacto ambiental por la aportación de dióxido de carbono, lo que supone un incremento de 0,01 euros/m³ para el agua regenerada y de 0,04 euros/m³ para el agua marina desalada.

La reutilización planificada y la desalación de agua tienen varios elementos en común que conviene resaltar. En primer lugar utilizan una fuente de materia prima no convencional y en cierto modo abundante: efluente secundario y agua marina respectivamente. Alcanzan su explotación óptima cuando funcionan de forma continua y sistemática, lo que normalmente comporta la utilización de un sistema de regulación. Requieren establecer un acuerdo contractual entre los productores del agua y los futuros usuarios, con objeto de asegurar su utilización y su precio. Por último, mientras que la reutilización planificada ha sido generalmente promovida por los usuarios, la desalación lo ha sido por las agencias responsables del abastecimiento.

La iniciativa de desalar agua de mar ha alcanzado un gran desarrollo en España, aunque su utilización real no ha superado todavía la aceptación del coste del agua por los usuarios. Iniciativas institucionales planteadas en California en el año 2005 consideran al menos seis años para su implantación real, estiman unos costes de 0,75-0,80 dólares/m³ en el caso más favorable, y requieren subsidios directos de 0,20 dólares/m³ por parte de agencias como MWD, que abastece a 18 millones de personas.

Los datos técnicos y la experiencia práctica disponibles permiten una valoración objetiva, realista y comprensiva de las iniciativas de regeneración, de regulación y de desalación, de modo que puedan ser entendidas por todos y especialmente por los futuros usuarios. Y ello con independencia de los criterios políticos que puedan adoptarse en un momento determinado. □

Rafael Mujeriego
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ingeniería Ambiental
Universidad Politécnica de Cataluña

Referencias

- American Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux y Water Research Commission of South Africa (1998), *Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones*, McGraw-Hill.
- Association of California Water Agencies (ACWA) (2005), *No Time to Waste. A Blueprint for California Water*, www.acwa.com, Sacramento, California.
- Department of Water Resources (2003), *Water Desalination, Findings and Recommendations*, <http://www.owue.water.ca.gov/recycle/desal/Docs/Findings-Recommendations.pdf>, <http://www.owue.water.ca.gov/recycle/>, Sacramento, California.
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas (1991), *Directiva 91/271/CEE del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas*, L135/40-52.
- 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.
- 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.
- Instituto Tecnológico Geomínero de España (2000), *Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente (2000), *Propuesta de Plan Hidrológico Nacional*, Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente (2005), *Perfil ambiental de España 2004. Informe basado en indicadores*, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Mujeriego, R. (2004), "La gestión del agua en el sur de California", *Ambienta*, no. 38, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 31-38.
- 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 Serra, M. (2004), "Towards Sustainability in water recycling", *Water Science and Technology*, vol. 50, no. 2, 1-8.
- United States Environmental Protection Agency and United States Agency for International Development (2004), *Guidelines for Water Reuse*, EPA/625/R-04/108, September 2004. Office of Water, Washington, D.C., y Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio.

