

# LA REUTILIZACIÓN EN EL CICLO GLOBAL DEL AGUA: UNA APROXIMACIÓN AL CONCEPTO DE CICLO DE VIDA DE PRODUCTO APLICADO AL AGUA

Antonio Estevan Estevan

Fundación Nueva Cultura del Agua  
Partida Alfatares, 252  
03760 Ondara (Alacant)  
E-mail: [aestevan@gea21.com](mailto:aestevan@gea21.com)

## RESUMEN

La calidad de las aguas regeneradas es la resultante de una cadena de decisiones y actuaciones que comienza en el momento de la extracción de recursos naturales de primer uso y continúa a lo largo de todo el ciclo del agua, hasta las últimas operaciones de reutilización. Si el ciclo del uso del agua se planifica globalmente desde su inicio con vistas a facilitar la reutilización al término del mismo, será posible controlar los procesos de deterioro del agua de modo que su reutilización sea posible con costes limitados y sin pérdida de recursos. Si, por el contrario, se van adoptando decisiones en cada etapa del ciclo del agua sin contar con los efectos que pueden tener en el potencial de reutilización futura, al final se incurrirá en la necesidad de costosos post-tratamientos, en la pérdida de recursos y, eventualmente, en la inviabilidad económica de las operaciones de reutilización. En la presente ponencia se aportan algunas reflexiones en relación con estos aspectos a lo largo de las sucesivas etapas del ciclo del agua, acompañados de algunos ejemplos tomados de ciudades o sistemas de la costa mediterránea española.

**Palabras clave:** reutilización, salinidad, conductividad, gestión de recursos hídricos, ciclo de vida

## INTRODUCCIÓN

La Nueva Cultura del Agua (NCA) preconiza una gestión del ciclo del agua capaz de satisfacer las necesidades de la población (urbanas, industriales, agrícolas) sin dañar los ecosistemas acuáticos. El objetivo principal de la NCA es la mejora de la calidad y el estado de conservación de los ecosistemas acuáticos, en la convicción de que estas mejoras no sólo aportarán beneficios ambientales, sino que también se traducirán en una mejora de la calidad del agua potable y en un aumento de la garantía del abastecimiento de agua.

La Nueva Cultura del Agua descansa sobre un sustrato conceptual netamente ecológico. La visión ecosistémica del mundo físico contempla los fenómenos naturales como flujos cíclicos de materiales y energía que normalmente en la Naturaleza quedan cerrados mediante procesos de reciclaje de los materiales y mediante aportaciones de energía externas a cada sistema natural. Cuando por intervención humana estos ciclos quedan abiertos o alterados, aparece el deterioro ambiental, que se manifiesta en diversas formas de contaminación, agotamiento de recursos u otras situaciones de insostenibilidad.

Este enfoque ecosistémico es plenamente aplicable a los ciclos del agua. Cualquier masa de agua, ya sea terrestre o marina, superficial o subterránea, está ubicada en algún lugar del ciclo natural del agua, y en esa ubicación será potencialmente capaz de ofrecer una utilidad social, ambiental o económica, y de sustentar determinados ecosistemas acuáticos. Las actuaciones o presiones que se realicen sobre esa masa de agua pueden influir en otras etapas del ciclo, modificando el potencial económico o ecológico de las mismas.

Con esta perspectiva, las aguas residuales no pueden ser consideradas y tratadas como un residuo que aparece al final de un proceso lineal de utilización del agua, eventualmente susceptible de reutilización. Las aguas residuales forman parte integrante del ciclo del agua, sin ninguna diferencia conceptual con las aguas de cualquiera de las etapas anteriores. En este sentido merecen la calificación de recurso, y no de residuo, del mismo modo que cualquier otra masa de agua, en cualquier etapa del ciclo, puede ser considerada como un recurso con un determinado potencial de utilidad económica o ecológica.

Por eso, para que las aguas residuales o recursos regenerables sean capaces de ofrecer los mayores beneficios hidrológicos o ambientales posibles, en el diseño de cualquier etapa del ciclo de uso del agua deberán tomarse en consideración los usos posteriores previstos o posibles, incluyendo los usos potenciales de las aguas regenerables. Para obtener de éstas últimas la máxima utilidad deberán ser adoptadas a lo largo de todo el ciclo aquellas medidas que permitan que al término del mismo se obtenga un recurso regenerado plenamente apto para los usos previstos, y todo ello al menor coste posible.

Para alcanzar este objetivo es necesario superar la idea de que la regeneración y la posterior reutilización del agua empiezan en la planta de tratamiento de aguas residuales. En realidad, la reutilización del agua empieza mucho antes, desde el mismo momento en que se extrae el recurso natural que tras ser almacenado, transportado, acondicionado, utilizado y recogido tras su primer uso, dará lugar al recurso regenerable. Con este planteamiento, el diseño y la gestión de las etapas finales de tratamiento y reutilización dependerán en gran medida de las decisiones que se hayan ido adoptando a lo largo de todo el ciclo, y por ello la optimización del sistema de reutilización deberá realizarse para el conjunto del ciclo, con una perspectiva global.

Se entra así en un enfoque de los denominados “de mina a vertedero” o de “ciclo de vida de producto”, aplicado en este caso al ciclo del agua. En los análisis de este tipo, que son desde hace años muy comunes en la industria, las exigencias del reciclaje o la reutilización del producto se toman en consideración desde la fase de diseño del mismo hasta el final de su vida útil, pasando por todas las etapas de comercialización, utilización y retirada del producto.

En la presente ponencia se pretende ofrecer una visión general de las implicaciones que un enfoque de ciclo de vida puede tener en la gestión de las diferentes fases que integran el ciclo del agua.

## **LA GESTIÓN DEL CICLO DEL AGUA CON LA PERSPECTIVA DE LA REUTILIZACIÓN**

Como se indicaba en el apartado anterior, para que los recursos regenerables puedan cumplir adecuadamente las funciones que en su momento les serán encomendadas, y puedan hacerlo con mínimos costes económicos y ambientales, es necesario que las aguas reciban un tratamiento adecuado a lo largo de todo su ciclo de utilización, desde la captación y acondicionamiento del agua procedente del medio natural, pasando por los usos del agua que generarán posteriormente los caudales de recurso regenerable, hasta los procesos de tratamiento, transporte y aplicación de las aguas regeneradas.

El ciclo integral del agua se puede descomponer en una serie de fases, para cada una de las cuales es posible formular determinadas consideraciones o recomendaciones que podrán favorecer en su momento las condiciones de la reutilización del agua. En el presente caso se centrará el análisis en el ciclo del agua urbana con posterior reutilización. Hay otros posibles esquemas de reutilización o de usos combinados del agua en los que no intervienen los usos urbanos el agua, que no serán abordados en la presente ponencia, pero que no están exentos de interés. Por ejemplo, determinadas aguas agrarias pueden generar servicios ambientales a través de sus retornos, o viceversa, ciertos caudales de agua destinados a usos ambientales pueden ser posteriormente destinados a otros usos. En todos estos casos se puede considerar que existe una reutilización, y puede ser necesario aplicar a lo largo de todo el ciclo del agua determinadas medidas que la faciliten o la optimicen.

Es interesante recordar, por otra parte, la conocida diferenciación entre reciclaje y reutilización del agua. La reutilización se define como el uso de agua que ha sido utilizada inicialmente en una aplicación para otra aplicación diferente, y el reciclaje como el uso de agua en la misma aplicación en la que se usó inicialmente. El reciclaje del agua es muy habitual en diversos sectores industriales, y también existen aplicaciones en actividades residenciales (aguas grises), en instalaciones ornamentales y en muchos otros usos. Sin negar tampoco en este caso su potencial a efectos de optimizar el ciclo del agua, la presente ponencia no se ocupa del reciclaje del agua, sino sólo de la reutilización.

Centrando la atención en el ciclo del agua urbana con la perspectiva final de la reutilización, el ciclo global a considerar se puede descomponer en las fases siguientes:

1. La captación en alta
2. La utilización del agua
3. La recogida de las aguas regenerables
4. El tratamiento de regeneración

Un elemento de referencia común a todo el ciclo, con vistas a la reutilización, es la optimización de la relación calidad/coste del agua regenerada que se obtiene, y su adecuación al uso perseguido, tanto en lo que se refiere a sus estándares de calidad como en el ajuste de su coste a la capacidad de pago de los usuarios a los que va destinada. Cualquier desviación importante en este sentido puede representar el fracaso de un proyecto de reutilización.

Tanto la calidad como el coste se determinan en función de una variedad de parámetros o dimensiones: para la calidad hay decenas de indicadores físico-químicos que definen la utilidad del agua para diversos usos. El coste, por su parte, es un valor multidimensional, en la medida en que incorpora costes económicos, ecológicos y sociales, y no todos ellos son reductibles a valores monetarios. Esta multidimensionalidad confiere a la gestión global del

ciclo del agua una notable complejidad, que puede llegar a ser inabordable si no se simplifican los problemas centrando los análisis en una serie limitada de indicadores.

En la presente ponencia se abordarán aspectos relacionados con varios aspectos de la calidad del agua, y con diferentes dimensiones de los costes. No obstante, los ejemplos con los cuales se irá ilustrando el recorrido a lo largo del ciclo del agua se basarán en un único parámetro de calidad (la salinidad del agua) y en una única dimensión del coste (el coste económico de los servicios hídricos), para hacer el análisis abarcable y para ilustrar con mayor claridad los análisis y sugerencias recogidas en el texto. Siempre que sea posible, se procurará referir estos ejemplos a una situación concreta, la de Alicante y sus comarcas próximas, en donde se han registrado en los últimos años interesantes experiencias –positivas y negativas- en materia de reutilización del agua.

## LA CAPTACIÓN EN ALTA

Aparentemente, la captación del agua natural de primer uso para atender un abastecimiento urbano tiene poca relación con las políticas de reutilización que eventualmente se puedan aplicar al final del ciclo. Sin embargo, en la práctica las calidades del agua de entrada pueden tener una considerable influencia sobre las posibilidades de reutilización, especialmente por lo que se refiere a la salinidad, que es un parámetro determinante de la aptitud del agua para algunos de los usos más habituales en la reutilización, como son los del riego agrícola, urbano o de ocio.

La salinidad es un parámetro conservativo, lo que significa que no resulta afectado por los procesos naturales de autodepuración del agua, y en principio sólo puede ser modificado por dilución. Por esta razón, la salinidad del agua que entra en un sistema urbano constituye un nivel base sobre el cual se van añadiendo los sucesivos incrementos de salinidad que cada utilización o manejo del agua vaya aportando a lo largo del ciclo del agua.

Por eso es importante, no sólo para mejorar la calidad del abatecimiento en sí misma, sino también con vistas a la posterior reutilización del agua, conseguir que las aguas de entrada en un sistema de abastecimiento tengan la menor salinidad posible.

Aunque en muchos casos existen escasas posibilidades de elegir entre diferentes fuentes de abastecimiento, en otros existen distintas opciones o posibilidades de actuación que pueden aportar mejoras considerables en la salinidad. No obstante, en los casos en que se puede elegir entre más de una fuente, o entre combinaciones de ellas, que pueden proporcionar aguas de diferentes salinidades, habitualmente se opta por la captación que resulta más económica, o por la que aporta mayor garantía, desdeñando aportaciones continuas o puntuales de agua de mejor calidad que presentan mayor coste, o presentan dificultades de tipo técnico.

El caso del acueducto Tajo-Segura es un ejemplo de este tipo de situaciones. Desde la puesta en servicio de este trasvase en 1980, buena parte de las aguas de abastecimiento de las provincias de Murcia y Alicante proceden del trasvase Tajo-Segura. El origen de estas aguas es el sistema de embalses de Entrepeñas y Buendía, situado en la cabecera del Tajo, en Guadalajara. Las aguas de estos dos macroembalses se mezclan en el embalse de Bolarque, y de ahí son derivadas hacia el ATS. Sin embargo, la calidad de las aguas de Entrepeñas, con una conductividad en torno a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , es bastante superior a la de Buendía, que se eleva a 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con fuerte presencia de sulfatos (Gascó, J.M. et al., 2004). Entrepeñas proporciona unos 400 hm<sup>3</sup> de media anual, mientras que Buendía aporta unos 600 hm<sup>3</sup>.

La mezcla de las aguas en el trasvase supone que la salinidad del agua enviada a la costa mediterránea, una zona con problemas generalizados de salinización, es en origen de unos 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No es una conductividad elevada, pero es netamente superior a la que se hubiera obtenido reduciendo el volumen de trasvase, enviando por el ATS aguas sólo o principalmente de Entrepeñas, y evitando la mezcla con el Júcar mediante el by-pass que solicitaron los regantes valencianos en el embalse de Alarcón. Para volúmenes de trasvase similares a los actuales cabía haber valorado la posibilidad de operar por división de tiempos, de modo que durante algunos meses se enviaran aguas de mayor calidad con destino a abastecimientos, y el resto del año aguas de inferior calidad con destino a regadíos. Ello hubiera implicado una separación de las aguas en destino, especializando los embalses de la cabecera del Segura en aguas de alta calidad (Cenajo) y aguas de calidad estándar (Talave). En general, casi siempre es posible alguna solución de gestión que evite las mezclas indeseadas de aguas de diferente calidad.

No obstante hay que señalar que dado que el Tajo también tiene problemas de salinidad (la conductividad en Toledo supera los 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por efecto de los vertidos de Madrid), la derivación de toda el agua de buena calidad de la cabecera por el ATS podría empeorar sensiblemente la calidad del Tajo medio. Ello implica que posiblemente sólo se podrían trasvasar aguas de buena calidad para la fracción de abastecimiento del ATS, lo cual introduciría complicaciones adicionales para separar calidades a lo largo de todo el sistema. En tramos inferiores la calidad del agua del Tajo experimenta una cierta mejoría, pues recibe importantes escorrentías del Sistema Central, con escasa aportación de sales. Por ejemplo, la salinidad media del río Tiétar es de 105  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En cualquier caso, ignorando la cuestión de la calidad en el diseño del ATS se generaron problemas potenciales que se están manifestando ahora. Al bajar el agua desde Bolarque cargada de sulfatos, en el límite de la potabilidad (246 mg/l) (MMA, 2000), y mezclarse con aguas del Júcar en Alarcón, con concentraciones de sulfatos iguales o superiores a estas, las aguas de salida del embalse llegan a alcanzar puntas de 450 mg/l de sulfatos (Paredes, J., 2004). Estos sulfatos han ocasionado problemas al abastecimiento de Albacete, que han obligado a abordar la construcción de una planta de ósmosis inversa con un coste de más de 12 millones de euros, que comenzará a operar en 2006, con el consiguiente encarecimiento del agua, y con las dificultades que aparecerán para eliminar la salmuera en una localización interior. Interesa recordar que el abastecimiento de Albacete con aguas del Júcar se planteó cuando la agricultura extensiva comenzó a deteriorar el agua del acuífero de la Mancha Oriental, que hasta entonces había sido la fuente de abastecimiento exclusiva de la ciudad.

Con alguna forma de atención a las calidades en el ATS, a la Cuenca del Segura hubieran llegado aguas con una conductividad sensiblemente inferior a la actual. Si se hubiera evitado posteriormente la mezcla de estas aguas con otras de la cuenca del Segura con elevada conductividad, la calidad del agua de abastecimiento del sistema del Taibilla habría mejorado de forma perceptible, y la mejora se habría trasladado también a las aguas reutilizadas, que en la cuenca del Segura, y en las comarcas de Alicante abastecidas con agua del Taibilla, constituyen un porcentaje muy elevado del agua utilizada.

Aunque en la actualidad se están planteando medidas para reducir el efecto de estas mezclas, como la conexión Talave-Cenajo, resulta ya muy difícil resolver el problema en su totalidad. Las mejoras de calidad, tanto para Alicante como para otras ciudades del arco mediterráneo, van a venir a través de la desalación de agua marina.

El uso de agua desalada presenta notables ventajas en el ciclo de la salinidad en las ciudades mediterráneas, y puede ser un buen apoyo para facilitar la reutilización agraria de las aguas

residuales en estas ciudades. Normalmente, para usos de abastecimiento urbano y partiendo de agua de mar, el agua desalada se entrega con una salinidad de entre 250 y 400 mgr/litro, esto es, entre 400 y 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de conductividad. Este rango de salinidades es muy inferior al de la práctica totalidad de los recursos naturales de agua disponibles en la costa mediterránea, por lo que la utilización de agua desalada en estas zonas se traduce en una apreciable mejora de la calidad media de las aguas de entrada, tanto por lo que se refiere a la conductividad como a los restantes parámetros.

**En Alicante**, el agua que llega por los Canales del Taibilla presenta una calidad afectada por las sucesivas mezclas del agua del ATS, primero en Bolarque, luego en el Júcar, luego en el río Mundo y luego en el Segura. A la salida de la potabilizadora de Torrealta, la conductividad media supera los 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (MMA, 2002). Si el agua del trasvase Tajo-Segura destinada a abastecimiento no sufriera las mezclas mencionadas, o al menos no todas ellas, la calidad del agua de entrada en Alicante podría ser significativamente mejor que la actual. No obstante, la mezcla de las aguas del Taibilla con aguas subterráneas de gran calidad del Alto Vinalopó ha permitido hasta ahora distribuir en la capital alicantina un agua en el entorno de 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que representa una calidad muy aceptable. Sin embargo, el progresivo agotamiento de los pozos del Alto Vinalopó hace que esta solución no pueda proyectarse al futuro.

La alternativa para Alicante, y para el conjunto de comarcas costeras de esta provincia, es la desalación de agua marina. En los dos últimos años, la entrada en servicio de la desaladora de Alicante, que produce agua con menos de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ha permitido reducir la salinidad media del agua distribuida en la ciudad, aunque por el momento no se dispone de información detallada sobre la media global obtenida, que por otra parte varía en las distintas zonas de la ciudad.

## LA UTILIZACIÓN DEL AGUA

El incremento de salinidad del agua a su paso por un ciclo de uso urbano, en ausencia de actividades industriales significativas, supone un salto de conductividad de entre 600 y 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , aunque esta es una horquilla de referencia con un margen de variación considerable, en función de factores muy diversos.

El factor probablemente más determinante del salto de conductividad en el uso urbano del agua es la calidad del agua de entrada. La introducción de agua de calidad deficiente en un sistema urbano genera un círculo vicioso de operaciones de rectificación y formas específicas de uso del agua que acaban generando deterioros adicionales, que serían evitables si las aguas de entrada fueran de mejor calidad.

En primer lugar, la baja calidad de las aguas suele ser indicativa de escasez de recurso, y suele ir acompañada de elevados costes de potabilización y, en general, de elevados precios del agua. Los precios del agua más elevados estimulan la eficiencia hidráulica, lo que sin duda es positivo desde el punto de vista cuantitativo y de presión sobre los recursos naturales, pero tiene su contrapartida en un mayor deterioro del agua en el ciclo de uso urbano. Si el agua debe cubrir los mismos servicios hidráulicos (lavados, higiene, etc...) con menor volumen de recurso, su nivel de deterioro final será mayor.

Por otra parte, las aguas con salinidad elevada requieren para ciertos usos tratamientos de descalcificación u otras rectificaciones que incorporan nuevas cargas salinas. Asimismo, las aguas de baja calidad suelen requerir mayores dosificaciones de jabones y detergentes.

En las ciudades mediterráneas, la climatología benigna y el fuerte soleamiento favorecen la evaporación y la consiguiente concentración salina del agua en piscinas y otras aplicaciones exteriores, como fuentes ornamentales, baldeos, etc.. La baja frecuencia de renovación del agua en las piscinas, en muchas ocasiones con periodicidades superiores a un año, incluso en establecimientos públicos con uso intensivo de las piscinas, no sólo aumenta la salinidad por evaporación, sino que requiere del uso de grandes cantidades de aditivos químicos para el mantenimiento del agua, que generan a su vez nuevas elevaciones de la salinidad.

En aplicaciones de tipo industrial o comercial, como por ejemplo en refrigeración, pero también en numerosas actividades de lavado industrial, la elevación de los precios del agua hace que se vayan extendiendo crecientemente las aplicaciones en circuito cerrado, o los sistemas locales de reciclaje del agua, en los que sólo se reponen las pérdidas por evaporación o por saturación de solutos. Cuando periódicamente se desechan estas aguas, suelen contener fuertes cargas salinas.

Indudablemente, todas estas conductas son en sí mismas positivas desde el punto de vista de la conservación del recurso, y sin duda alguna deben ser alentadas. Pero la realidad es que la elevación de la salinidad de los efluentes es la otra cara de la moneda del ahorro y la eficiencia en el uso del agua, y puede llegar a ser muy problemática cuando se parte de aguas potables de elevada salinidad.

**En Alicante**, la conductividad media del agua que llega a las EDAR es, en el mejor de los casos, el triple de la que posee el agua de entrada. A que se alcancen unos valores tan elevados contribuye en gran medida la alta eficiencia característica del sistema de abastecimiento (>85% de rendimiento) y de los patrones de uso del agua en la ciudad, y también contribuyen los descalcificadores, piscinas, y otros usos que generan retornos altamente salinos (Estevan, A. y Ballesteros, G., 1996). No obstante, a estas cargas debidas al ciclo del agua se les suman determinadas situaciones específicas que se dan en la red de alcantarillado, las cuales se analizan en el próximo apartado.

## **LA RECOGIDA DE LAS AGUAS REGENERABLES**

Las aguas residuales o regenerables constituyen un recurso que debe ser cuidado y protegido para evitar deterioros adicionales que dificulten o encarezcan su posterior reutilización. La aplicación de este principio de modo coherente supone, en muchos casos, la necesidad de reconceptualizar desde su base los sistemas de saneamiento.

Con una perspectiva estrictamente centrada en el saneamiento, que es como se diseñan habitualmente las redes de colectores, el objetivo de estas redes es el de conducir las aguas residuales hasta las estaciones de depuración del modo más económico posible, y evitando fugas que puedan contaminar los acuíferos o generar otro tipo de problemas sanitarios.

Desde la perspectiva de la reutilización, las redes de saneamiento deben estar diseñadas con el objetivo de proteger el recurso regenerable y evitar deterioros adicionales que pueden dificultar la posterior reutilización. Algunos criterios de aplicación en este sentido son los siguientes:

- Como norma general, no mezclar los efluentes de los polígonos industriales con los efluentes urbano-residenciales.
- No autorizar vertidos industriales de alta salinidad
- No autorizar la implantación de pequeñas desaladoras (de hoteles, centros públicos, etc.) con vertido de salmueras al sistema de saneamiento. Perseguir la desalación ilegal.
- Instalar siempre que sea posible redes de saneamiento separativas, de pluviales y residuales.
- Realizar un buen mantenimiento de las redes de alcantarillado.
- Evitar intrusiones de aguas freáticas o saladas (en los frentes costeros) en los sistemas de saneamiento
- Implantar balsas de tormenta para separar las aguas de primer lavado de calles y carreteras

Si no se aplican estas y otras posibles precauciones para reducir en la mayor medida posible la salinización de las aguas residuales, estas pueden llegar a alcanzar unos niveles de salinidad que pueden dificultar considerablemente su reutilización.

La mezcla de aguas residuales de distintas procedencias para ser sometidas a tratamiento en una planta unificada puede deteriorar seriamente el conjunto de los recursos regenerables. Un caso bien estudiado en este tipo de situaciones es el de la ciudad de Ontinyent, uno de los principales centros del sector textil de la Comunidad Valenciana (Estevan, A., 2003). La EDAR de Ontinyent recibe los caudales de entrada a través de dos conducciones, que se unen ya en el interior de la planta:

- La primera recoge los vertidos del núcleo de Ontinyent, así como del polígono industrial “Sant Vicent”, de algunas industrias situadas en el casco urbano o en sus inmediaciones, y de las viviendas diseminadas que cuentan con conexión a la red de alcantarillado.
- La segunda recoge los vertidos del polígono industrial “El Plá”, así como los vertidos procedentes de Agullent, tanto urbanos como industriales.

Ambos vertidos se mezclan a la entrada de la planta, procediéndose a su homogeneización y neutralización antes de iniciar el proceso, que consiste en un tratamiento secundario por fangos activados.

La salinidad de las aguas residuales procedentes del núcleo urbano de Ontinyent está ligeramente por debajo de 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cifra moderada, pero que está en el orden de lo esperable, teniendo en cuenta que la conductividad del agua de entrada es muy baja (en torno a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), y que el ciclo de uso urbano-residencial del agua en esta ciudad eleva la conductividad en poco más de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , especialmente porque apenas se utilizan los descalcificadores, debido a la buena calidad del agua de entrada. El margen de incremento restante se debe a la presencia de algunas industrias con vertidos de elevada conductividad, aunque se trata de empresas pequeñas cuyo impacto se diluye en el conjunto del efluente de origen urbano. Estas aguas, adecuadamente tratadas por procedimientos convencionales, pueden ser utilizadas prácticamente para cualquier uso de riego, y para cualquier aplicación industrial.

Por el contrario, la conductividad media anual de las aguas en el colector del Polígono está muy próxima a 3.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido a la actividad de numerosas empresas del textil, ramo del

agua, varias de ellas de gran tamaño, con una carencia prácticamente generalizada de reciclaje de aguas o tratamientos previos al vertido. De hecho, vertidos con conductividades por encima de 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  son frecuentes, aunque no están autorizados en las ordenanzas municipales. La mezcla de estas aguas con las procedentes del núcleo urbano genera un efluente de la EDAR con una conductividad media de unos 2.200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y con otras cargas contaminantes, cuyo vertido provoca serios problemas en el río Clariano y ocasiona dificultades para el riego aguas abajo.

Es interesante señalar que, mientras los vertidos industriales generan más del 90% de la carga salina de las aguas residuales de Ontinyent, y proporciones parecidas de todas las demás cargas contaminantes, los pagos por sanamiento del sector industrial sólo representan del orden del 34% del total, correspondiendo el 66% restante a los sectores doméstico y comercial, que apenas son responsables de un 10% de las cargas contaminantes.

Los intentos de reutilización industrial del agua en Ontinyent, para reducir la presión sobre el acuífero de La Umbría, que abastece la ciudad y se encuentra fuertemente sobreexplotado, están tropezando con el problema de la salinidad. En efecto, las elevadas conductividades actuales de salida de la planta depuradora se generan a partir de unas aguas de entrada de excelente calidad del acuífero de La Umbría, cuya conductividad es inferior a 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Si se reintrodujeran en el ciclo industrial aguas con una depuración terciaria y con una conductividad de unos 2.200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , se trastocarían todos los parámetros de salinidad del ciclo del agua, y diversas fases del ciclo de producción textil podrían verse afectadas.

En Ontinyent se analizó de modo bastante exhaustivo el ciclo de la salinidad en diferentes escenarios de reutilización. Se simularon los ciclos sucesivos de retroalimentación de la salinidad y se comprobó que el grado de reutilización admisible para los procesos industriales era muy reducido, de apenas 3.000  $\text{m}^3/\text{día}$ , esto es, no más de un 20% de mezcla en una demanda industrial que era del orden de 15.000  $\text{m}^3/\text{día}$ . Por encima de este porcentaje de reutilización se llegaba a salinidades excesivas en el agua industrial. Además, existía el problema de la irregularidad de las conductividades de las aguas residuales, que presentan súbitas elevaciones como consecuencia de ciertas descargas industriales. Estas subidas repentinas podían transmitirse a lo largo del ciclo y ocasionar problemas imprevistos en algunos procesos textiles, con posibles efectos económicos graves.

A la vista de estos resultados se está replanteando en el momento actual el programa de reutilización, y se está valorando la introducción de una etapa de ósmosis inversa para retirar salinidad del sistema. Esta solución posiblemente pueda hacer viable la reutilización, pero con un coste elevado y creando un nuevo y serio problema de vertido de salmueras de rechazo en una localización interior y sobre un cauce de muy escaso caudal, como el río Clariano.

Se trata una vez más de soluciones de “fin de tubería” que habrían podido ser evitadas si se hubiera planificado la reutilización contemplando el ciclo global. Hubiera bastado para ello que las cuantiosas inversiones realizadas recientemente para ampliar la EDAR unificada de Ontinyent/Agullent (finalizadas en 2001) se hubieran orientado a tratar por separado los efluentes urbanos e industriales, y a separar los vertidos industriales que deterioran las aguas residuales del núcleo urbano. De ese modo, las aguas residuales urbanas con tratamiento terciario podrían haber sido reutilizadas en su totalidad (8.000  $\text{m}^3/\text{día}$ ) en la industria, sin problemas de ningún tipo, pues su conductividad se habría podido mantener, de modo muy estable, en el entorno de los 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**En Alicante** se acumulan problemas similares a los descritos para Ontinyent, más otros propios de las ciudades costeras, que hacen que la conductividad que alcanzan las aguas residuales sea muy elevada. A la principal EDAR (Rincón de León, con unos 30 hm<sup>3</sup>/año tratados) llegan dos líneas de aguas residuales que reciben tratamiento separado. La primera (línea A) aporta unos 50.000 m<sup>3</sup>/día (18 hm<sup>3</sup>/año) con una conductividad de 2.500 µS/cm, y la segunda, (línea B), unos 32.000 m<sup>3</sup>/día (12 hm<sup>3</sup>/año), con una conductividad de 4.500 µS/cm. La EDAR de Monte Orgegia trata cerca de 25.000 m<sup>3</sup>/día (8 hm<sup>3</sup>/año), con una conductividad de unos 3.000 µS/cm (Lapuente, E., 2005).

Estas conductividades tan elevadas se producen por varias causas, algunas de ellas no bien conocidas. Se detectan importantes intrusiones salinas en los colectores de primera línea de costa, especialmente en las zonas turísticas de San Juan y l'Albufereta, servidas por la EDAR de Monte Orgegia. Es posible que, al igual que ocurre en numerosos lugares de las Islas Canarias y Baleares, algunos hoteles de esta zona tengan instaladas pequeñas plantas de desalación, que arrojarían las salmueras al alcantarillado. En la EDAR de Rincón de León las intrusiones salinas pueden afectar a la línea A, pero no parece que lo hagan en gran medida. Esta línea es la que presenta menor salinidad, y es la más netamente urbana, por lo que sus aportaciones salinas parecen provenir fundamentalmente de los descalcificadores y de los usos intensivos del agua de tipo comercial o residencial.

Más graves son las intrusiones y aportaciones anómalas que sufre la línea B, debidas al parecer a acuíferos o escorrentías salobres superficiales en la zona de Villafranqueza, en el borde norte de la ciudad. Además, esta línea recoge vertidos industriales de alta salinidad en San Vicent del Raspeig, y a ella se vierten directamente las salmueras producidas por la desaladora de aguas salobres del Instituto del Agua de la Universidad de Alicante. Con ocasión de la instalación de esta pequeña desaladora (450 m<sup>3</sup>/día), hace casi diez años, se planteó la necesidad de un salmueroducto para evacuar estas salmueras, pero hasta el momento actual no se ha abordado su construcción.

## **LOS TRATAMIENTOS DE REGENERACIÓN. LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS**

En función de la calidad de los efluentes y del uso que vayan a recibir los mismos, los tratamientos necesarios serán más o menos intensos y costosos. Cuando las aguas de entrada en las EDAR presentan elevados contenidos de sólidos disueltos, superiores a los admisibles para los usos de reutilización previstos, los procesos convencionales de tratamiento resultan insuficientes, y suele ser necesario recurrir a tecnologías de membranas.

Las tecnologías de membranas son procesos activados por la energía hidráulica asociada al fluido de alimentación, y basados en diferentes tipos de membranas. En la actualidad, estas tecnologías se suelen clasificar en microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI). Otra tecnología de membranas, activada en este caso por energía eléctrica, es la electrodiálisis reversible (EDR). La distinción entre ellas obedece al rango de tamaños de las partículas que son capaces de separar, determinando diferentes valores de presión de operación, combinación de los mecanismos de funcionamiento, y coste asociado por unidad de permeato producido. Se reseñan brevemente a continuación las cinco tecnologías citadas. Las dos primeras funcionan principalmente por el fenómeno físico de la filtración, mientras que en las tres últimas tiene mayor importancia el fenómeno de la difusión o la adsorción.

### **Microfiltración**

La MF es eficaz en la separación de todos los tipos de sólidos en suspensión, grandes bacterias y partículas coloidales, con tamaños superiores a 0,1  $\mu\text{m}$ . El mecanismo básico de separación es la filtración, aunque en una baja proporción las membranas de MF también funcionan por adsorción y difusión rechazando una pequeña cantidad de sales.

### **Ultrafiltración**

Las membranas de UF son eficaces separando moléculas orgánicas de alto peso molecular, bacterias y virus, y en general, toda partícula de tamaño superior a 0,01  $\mu\text{m}$ . El mecanismo de funcionamiento básico sigue siendo la filtración pero las tasas de separación de grandes iones divalentes y monovalentes son mayores por el papel más significativo que juega la difusión. Este proceso está adquiriendo gran protagonismo en la etapa de pretratamiento de la desalación por OI.

### **Nanofiltración**

La NF es eficaz para la separación de iones divalentes (p.e. Calcio y Magnesio), grandes iones monovalentes y moléculas orgánicas en general. Debido al pequeño tamaño de los poros de sus membranas y al predominio del mecanismo de la difusión, puede separar cualquier partícula de tamaño superior al nanómetro (0,001  $\mu\text{m}$ ). Las membranas de NF aportan un rechazo significativo de la dureza causada por la disolución de calcio y magnesio, por lo que también se las conoce como ablandadores de membranas.

### **Osmosis inversa**

Las membranas de OI son eficaces para la separación de todas las sustancias rechazadas por las anteriores membranas, incluyendo los constituyentes más pequeños, como los iones monovalentes de sodio y cloro. El mecanismo prácticamente exclusivo es la difusión. El tamaño de los poros de las membranas es de 0,00005 micras, aunque esta no es más que una cifra orientativa y, en este caso, es más apropiado hablar de estructuras o redes moleculares que de porosidades.

### **Electrodialisis reversible**

La electrodialisis reversible separa los iones cargados eléctricamente mediante la aplicación de un campo eléctrico a las aguas que se pretende depurar. Los iones cargados atraviesan membranas de intercambio catiónico o aniónico, según sus respectivas cargas, lo cual permite su separación. El tamaño de los poros es del orden de un nanómetro, similar al de la nanofiltración. Debido a su mayor resistencia al ensuciamiento, la EDR es frecuentemente la tecnología de elección para la regeneración de aguas residuales salinizadas.

Tanto en las regiones del mediterráneo peninsular como en las islas, la reutilización agraria de las aguas urbanas está exigiendo cada vez con mayor frecuencia la aplicación de tecnologías de membranas, para evitar los problemas de salinización de suelos y la pérdida de productividad de las cosechas. Las tecnologías más habituales son la ósmosis inversa o la electrodialisis reversible, aunque en muchas ocasiones se aplican procesos previos de microfiltración o ultrafiltración para proteger las membranas de ósmosis inversa.

En los tratamientos por ósmosis inversa, partiendo de aguas residuales con salinidades de 3.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , se suele obtener un agua de excelente calidad, con conductividades que pueden

estar por debajo de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los rechazos o salmueras oscilan entre el 12 y el 20% del agua de entrada. Los costes son relativamente elevados, más que por el tratamiento de OI o de EDR en sí mismo, por las operaciones de pre-tratamiento y acondicionamiento que suele ser necesario realizar. En casos de aguas de entrada de baja calidad, puede ocurrir que los costes de tratamiento integral de las aguas residuales, incluyendo la ósmosis inversa, acaben siendo superiores a los de la desalación de agua del mar, especialmente si esta es de buena calidad.

**En Alicante** los principales déficits de recurso hídrico se producen en el Medio Vinalopó, especializado en la producción de uva embolsada. La viña es un cultivo bastante sensible a la salinidad, y puede presentar pérdidas de rendimiento a partir de conductividades de 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el agua de riego. Ante los problemas detectados años atrás por la utilización directa de las aguas depuradas de la EDAR de Rincón de León en diversos cultivos, se ha iniciado la construcción de una planta de post-tratamiento de aguas residuales urbanas para regenerar los 50.000  $\text{m}^3/\text{día}$  de la línea A, que tiene una salinidad de 2.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

El proceso empieza con un tratamiento de ultrafiltración que se aplica a la totalidad del caudal de entrada (50.000  $\text{m}^3/\text{día}$ ). Con ello se produce la casi total eliminación de sólidos en suspensión (de 30  $\text{mg}/\text{l}$  a no detectable).

Una parte del agua microfiltrada (25.000  $\text{m}^3/\text{día}$ ) es sometida a tratamiento de ósmosis inversa, lo cual genera unos 20.400  $\text{m}^3/\text{día}$  de agua osmotizada. El resto son salmueras que se vierten al mar. Al agua osmotizada se le añaden 4.600  $\text{m}^3/\text{día}$  de agua ultrafiltrada, con lo que se obtienen 25.000  $\text{m}^3/\text{día}$  de agua con una conductividad de unos 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esto es, aguas de muy alta calidad.

Las aguas ultrafiltradas no osmotizadas (unos 20.000  $\text{m}^3/\text{día}$ ) permanecen con una salinidad de 2.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que sólo son útiles para cultivos de elevada tolerancia a la salinidad.

El coste de la inversión es de 14,70 millones de euros, y el coste de mantenimiento del sistema se eleva a 2,044 millones de euros anuales, para una producción anual (contando las aguas de alta y baja calidad) de unos 16  $\text{hm}^3$ , lo que representa unos 0,13  $\text{€}/\text{m}^3$  de costes de operación, más unos 0,04  $\text{€}/\text{m}^3$  de costes de amortización, sin incluir costes financieros, y supuesta la planta operando a plena capacidad todo el año (Serrano, V., 2005)

## CONCLUSIONES

El correcto ajuste uso/calidad de las aguas reutilizadas es uno de los factores clave del éxito de los programas de reutilización. Para conseguir un buen ajuste con unos costes mínimos, es necesario tener en cuenta desde el inicio del ciclo del uso urbano del agua las aplicaciones que recibirá en su momento el agua reutilizada. De este modo se pueden ir adoptando en todo el ciclo del agua decisiones que generarán mejoras en el efluente final, de modo que se reduzca en la mayor medida posible la necesidad de post-tratamientos o tratamientos especiales para la obtención de las aguas regeneradas.

La evolución de la calidad del agua a lo largo del ciclo del uso urbano, desde la fuente natural del agua hasta la reutilización al final del ciclo, es un proceso que presenta una clara retroalimentación negativa. Las bajas calidades del agua al entrar en una fase del ciclo suelen determinar comportamientos o formas de uso del agua que intensifican el proceso de deterioro de la calidad en esa misma fase, y entregan agua sensiblemente más deteriorada a la siguiente, con lo cual se genera una espiral de deterioro.

Paradójicamente, el incremento de la eficiencia en el uso del agua los sistemas urbanos suele ir acompañado de un mayor deterioro de la calidad del agua, especialmente por lo que se refiere a la salinidad. Por ello, en los sistemas urbanos de alta eficiencia es necesario procurar que el agua de entrada tenga la mayor calidad posible, a fin de que a la salida del sistema el agua se encuentre todavía en condiciones que permitan evitar la adopción de costosos post-tratamientos.

La consideración de las aguas residuales como un recurso es una condición previa para la adopción de medidas que eviten el deterioro adicional e injustificado de la calidad de las aguas residuales en su recorrido desde los puntos de entrega de los caudales usados hasta las plantas de tratamiento. Las redes de saneamiento deben ser diseñadas y gestionadas con un criterio de protección de las aguas residuales e incluso, en la medida de lo posible, para que el recorrido hasta las EDAR procure mejoras, y no deterioros adicionales en la calidad de las aguas.

En materia de salinidad, la suma de decisiones incorrectas a lo largo de un ciclo completo del agua puede acabar generando unos efluentes inútiles para cualquier uso si no es a base de tratamientos de ósmosis inversa o electrodiálisis reversible, que además de su considerable coste económico, pierden una porción significativa del recurso en forma de rechazos. Por el contrario, una cadena de decisiones correctas a lo largo de todo el ciclo puede generar recursos regenerables de elevada calidad, aptos prácticamente para cualquier uso, aplicando sólo tratamientos de depuración convencionales, y con un considerable ahorro de costes y de recursos en el ciclo global.

En Alicante se acumulan una serie de situaciones y experiencias singulares en materia de reutilización, especialmente por lo que respecta a los usos agrarios del agua. Desde el comienzo del ciclo del agua se le presta muy poca o nula atención al tema de la protección de la calidad con vistas a la reutilización futura. Los problemas aparecen desde el inicio del ciclo, por la concepción con la que fué diseñado el ATS y el post-trasvase, que hace que los sulfatos del embalse de Buendía, en el Alto Tajo, se acaben distribuyendo por la mayor parte de la vertiente mediterránea, desde Sagunto hasta Almería, mezclados con otras aportaciones salinas de varios ríos. La ciudad de Alicante es muy eficiente en el uso del agua, lo que contribuye a aumentar la salinización de los efluentes, pero además, la red de saneamiento está afectada por una serie de vertidos e intrusiones que deterioran severamente la calidad de las aguas residuales que llegan a las estaciones de tratamiento.

Los primeros intentos de reutilizar las aguas residuales de Alicante, de modo generalizado y sin más tratamientos que los secundarios convencionales, fracasaron mayoritariamente en los años 1980 y 1990, debido al exceso de salinidad del agua. La consecuencia de todo ello ha sido la necesidad de implantar, para hacer posible el uso agrario de los caudales depurados, un costoso post-tratamiento de membranas para las aguas residuales, basado en ultrafiltración y ósmosis inversa. De esta forma se consiguen regenerar una parte de las aguas residuales con buena calidad y aptas para todo tipo de riegos, pero cabe preguntarse si los mismos resultados, o mejores, no se hubieran podido obtener a costes inferiores aplicando sucesivos criterios de protección de las aguas destinadas a ser regeneradas, a lo largo de todo el ciclo del agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- ESTEVAN, A, y BALLESTEROS, G., (1996). *Diseño de programas integrados de gestión de la demanda de agua*. Ministerio de Medio Ambiente.
- ESTEVAN, A. (2003). Pla de Gestió de la Demanda de l'aigua al municipi d'Ontinyent. Ajuntament d'Ontinent.
- GASCÓ, J.M, LOPEZ SANZ,G., y NAREDO, J.M. (2004). *Informe sobre los problemas del agua en La Mancha y sus posibles tratamientos, con un dictamen sobre el proyecto de trasvase Tajo-La Mancha llamado "Sistema de abastecimiento de agua potable a las poblaciones de la llanura manchega desde el Acueducto Tajo-Segura*. Comisión para el estudio del trasvase Tajo-La Mancha. Ministerio de Medio Ambiente.
- LAPUENTE, E., (2005). Estudio previo Solución Alicante para la transferencia de 50 hm<sup>3</sup> al sistema Vinalopó-Alacantí. Comisión Técnica del Trasvase Júcar-Vinalopó.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. (2000). *Documentación Técnica del Plan Hidrológico Nacional*. Volumen 4 Análisis ambientales, pág 175.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. (2002). Plan Hidrológico Nacional. *Observaciones Formuladas por la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea. Respuestas y Comentarios*.
- PAREDES, J. (2004). *Integración de la modelización de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos*. Tesis doctoral . Universidad Politécnica de Valencia.
- SERRANO, V. (2005). Comunicación personal.Comisión Técnica Júcar-Vinalopó.