

# Reflexiones sobre la gestión de recursos hídricos en regiones semiáridas

## El Sudeste español

### Resumen

Las regiones semiáridas del mundo suelen tener como principal factor limitante del desarrollo económico la escasez de agua. Precipitaciones reducidas y variaciones espacio-temporales bruscas dificultan considerablemente la planificación del uso, la gestión del recurso y el mantenimiento de un desarrollo sostenible. La región más árida de Europa es posiblemente el Sudeste español. Sus acuíferos han soportado la mayor parte de las extracciones de agua para abastecimiento de una agricultura floreciente y un turismo cada vez más numeroso. El ahorro, la reutilización y la concienciación por parte de los usuarios son elementos imprescindibles en una política hidráulica sostenible. La posibilidad de llevar a cabo obras blandas (diques y zanjas, recarga en graveras) se plantea como una posible solución de bajo impacto ambiental. Las plantas desaladoras constituyen soluciones técnicas teóricas, aunque de elevado coste. Por otro lado, las Directivas Europeas obligan a un notable cambio de las políticas hidráulicas. Una acertada planificación ordenada en el tiempo, con reglas claras y actualizables, con sólida aceptación social, enraizada en el conocimiento, en la información y en la participación ciudadana permitiría avanzar de manera segura hacia el futuro. La definición participativa de los objetivos de esa planificación dinámica deberá ser la base de una gestión sostenible del agua.

Antonio Pulido Bosch\*  
*Universidad de Almería\**

*Universidad de Alicante\*\**

José Miguel Andreu Rodes\*\*

Miguel Ángel Díaz Puga\*

Ángela Vallejos Izquierdo\*\*

## 1. Introducción

Las regiones semiáridas concentran el 7 % de la población mundial y casi el 3 % de los recursos hídricos. Las aportaciones hídricas se estiman en 1.200 hm<sup>3</sup>/año, de los que la mitad se explotan y el 30 % está regulado por obras antrópicas. La agricultura es la gran consumidora de agua con el 63 % de la demanda total, aunque en España alcanzan el 80 % de la totalidad (Plan Bleu, 2004), con el 83 % en el entorno almeriense, siendo los acuíferos los principales suministradores de esta demanda. El agua subterránea también abastece gran parte de la demanda urbana, que en el caso de la provincia de Alicante alcanza cerca del 52 %, o sea, aproximadamente un millón de habitantes.

Estas regiones semiáridas plantean numerosas incertidumbres en cuanto a la recarga de sus acuíferos debido en gran medida a la irregularidad de las precipitaciones, frecuentemente torrenciales (Scanlon *et al.*, 2006; Contreras *et al.*, 2008; Andreu *et al.*, 2011). Las obras más convencionales –embalses de superficie y otros sistemas de almacenamiento– pueden ser poco eficaces ante el elevado poder evaporante de la atmósfera que favorece la salinización del agua almacenada y de los suelos, y carecen de garantía en la satisfacción de la demanda en los ciclos secos.

La caracterización climática –precipitaciones escasas, período seco interanual, notable variación interanual...– tiene su reflejo en la hidrología de la región, en la organización del flujo, en la red de drenaje y en los caudales circulantes, entre otros aspectos. Frecuentemente los lechos están secos si bien, en ocasiones pueden alcanzar caudales punta muy elevados. Estos caudales punta, al ser excepcionales, pueden ser especialmente destructivos, sobre todo en aquellas áreas carentes de una adecuada ordenación del territorio, al invadir el hombre los cursos normalmente secos, o en aquellas cuencas carentes de infraestructura de laminación de avenidas. Su aprovechamiento para recargar los acuíferos sería del máximo interés (Simmers, 1997; Martínez Santos y Andreu, 2010). Tanto las sequías como las inundaciones forman parte de las características de las regiones semiáridas, con la consiguiente dificultad en lo que a la planificación y gestión se refiere. Las sequías favorecen la explotación intensiva y la realización indiscriminada de nuevas perforaciones. Durante esos años más secos la infiltración en los acuíferos puede

ser prácticamente nula. En los años húmedos y/o en los eventos lluviosos de alta intensidad, la infiltración puede ser muy elevada, especialmente si se toman determinadas medidas.

Aunque la planificación hidrológica en España fue pionera en el mundo, permitiendo un aprovechamiento modélico de los ríos, con infraestructuras que se remontaron a la dominación árabe, mejoradas a través de los siglos, no se puede decir lo mismo en lo que a las aguas subterráneas se refiere, ya que fueron sistemáticamente ignoradas. La planificación de los usos en las grandes cuencas españolas de las regiones semiáridas no pudo ser más desastrosa ante la enorme variación espacial y temporal de los caudales de los ríos.

Los criterios que rigieron la planificación hídrica en la mayor parte del siglo XX –posiblemente ayudados por la ausencia de una adecuada legislación– tienen poco que ver con los actuales, aunque hay que reconocer que las numerosas infraestructuras construidas permitieron la supervivencia y el desarrollo en un medio en donde cada decena de años los caudales alcanzados por los ríos podían ser muy destructivos.

**Mapa 1. Esquema hidrológico del SE español con indicación de los principales cursos de agua y algunas masas de agua subterráneas. Se indican también las desaladoras construidas en los últimos años**



El Sudeste español (Mapa 1) está ya muy lejos de los sistemas tradicionales de suministro de agua (aljibes, norias, minas o cimbras), de las derivaciones de agua en las cabeceras de los pocos ríos con caudal continuo existentes, y de los sistemas de derivación de aguas pluviales, tipo *boqueras*, aunque permanezcan como ejemplos activos en todo el área. El salto a los sondeos mecánicos permitió un notable desarrollo agrícola y turístico que sirvió de soporte a una sensible mejora socioeconómica de una región tradicionalmente deprimida. Con cierta frecuencia los responsables de la planificación ignoraron o malinterpretaron el papel de los acuíferos y su comportamiento, o aplicaron principios poco respetuosos con el medio o carentes de utilidad en las condiciones hidrológicas del Sudeste (embalses de capacidades diversas, de escasa o nula funcionalidad; caudales de bombeo que desconocían la potencialidad de los acuíferos captados...), han provocado problemas ecológicos en algunos sectores poco favorecidos. La explotación intensiva de las aguas subterráneas en todo el SE español, ocurrida en los últimos 40 años, ha traído consigo el descenso generalizado de los niveles piezométricos, el secado de los manantiales, el abandono de numerosas captaciones, y la salinización de suelos y aguas (Martín Rosales *et al.*, 2007a; Vallejos *et al.*, 2008).

Ciñéndonos al caso almeriense, hay que reseñar que los cursos de agua perennes en su cuenca baja son muy escasos, siendo el río Adra, el más occidental y de clima más moderado, el único que prácticamente no se seca. Los restantes, Andarax, Antas y Almanzora, suelen llegar secos a su desembocadura la mayor parte del año, y tan solo en contadas ocasiones mantienen descargas al mar durante más de una semana continuada.

Si pasamos revista a sus embalses, el de Isabel II, construido en el siglo XIX, es el más antiguo de la provincia de Almería. Este embalse no dispone de canales de distribución de agua y quedó prácticamente colmatado tras las primeras lluvias torrenciales que descargaron en su cuenca vertiente. El embalse de Benínar, en el río Adra, suele contener siempre agua, aunque tiene problemas de estanqueidad que hacen que haya que prever su vaciado rápido en cuanto exista riesgo de superar 30 hm<sup>3</sup> almacenados. El último embalse construido es el de Cuevas del Almanzora, en el río Almanzora, el mayor de la provincia con una capacidad teórica de 125 hm<sup>3</sup>. Su mejor aspecto lo tuvo mientras se construía la red de canales. Una vez terminada dicha red, el embalse se ve como

un gran reservorio casi vacío, sometido a intensa evaporación. Frente a esta notable escasez hídrica, el 19 de octubre de 1973 unas intensas precipitaciones provocaron inundaciones destructivas en todo el Sudeste español, con numerosas víctimas mortales y destrozos multimillonarios en infraestructuras y en propiedades.

El mayor río con su cuenca esencialmente desarrollada en el SE español es el Segura, posiblemente el más intensamente explotado de Europa. Con una veintena de embalses de tamaño muy variable (El Cenajo es el mayor con una capacidad de 437 hm<sup>3</sup>) y una capacidad total de almacenamiento de cerca de 1.150 hm<sup>3</sup> para una cuenca próxima a 19.000 km<sup>2</sup>, ha contado, además, con una notable aportación procedente del trasvase desde el río Tajo para hacer frente a una demanda que supera ampliamente a las aportaciones. El Segura cuenta con un sistema de bombeo de agua desde la misma desembocadura, que eleva el agua por ambos márgenes del río para su reaprovechamiento –Riegos de Levante Margen Derecha y Margen Izquierda– tras un largo recorrido por acequias y azarbes.

En lo que sigue se pretende describir someramente el medio geológico e hidrogeológico del SE español, identificar los principales materiales acuíferos y sus características, comentar las demandas de agua y los recursos disponibles, haciendo énfasis en algunas singularidades, para describir posibles actuaciones que permitan garantizar la sostenibilidad del medio desde el punto de vista del recurso hídrico.

## 2. La recarga en regiones semiáridas

La poca disponibilidad de agua en las regiones semiáridas deriva de la escasez y variabilidad de las precipitaciones. Su cálculo preciso es muy complejo debido a la dificultad de cuantificar la recarga. Si no se conoce el agua disponible, difícilmente se podrá planificar su uso con las garantías adecuadas. Existen numerosos métodos posibles para cuantificar la recarga en regiones semiáridas, todos ellos con incertidumbres. El más clásico es el que aplica la ecuación del balance a un área determinada y cuantifica o estima la precipitación, la evapotranspiración real por métodos empíricos u otros más sofisticados, la escorrentía, quedando la fracción que se in-

filtra como elemento final. Ha sido el método tradicionalmente utilizado en todos los estudios, llegando a emplearse de forma rutinaria al extremo de trabajar directamente con porcentajes de precipitación como cantidad estimada de la recarga, frecuentemente como valor único, sin cuantificación de las incertidumbres asociadas al método y, sobre todo, sin tener en cuenta que al variar tanto la precipitación, el valor medio asignado a la recarga tiene escaso significado real. Más rigurosos son los métodos empíricos que utilizan parámetros locales (Samper, 1998; Andreu *et al.*, 2008) aunque son de fácil aplicación y aparente alta precisión.

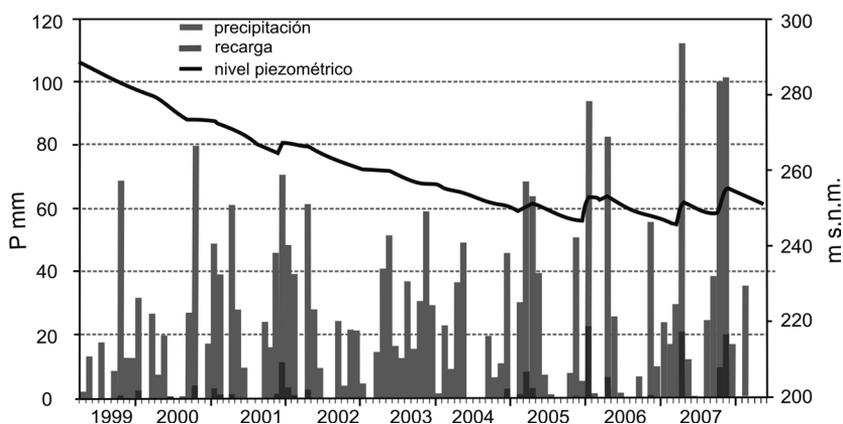
Más sofisticados son los modelos ecohidrológicos basados en imágenes de satélite que permiten estimar la recarga potencial –la evapotranspiración real es lo que en realidad estiman estos métodos– (Contreras, 2006). El balance de masas de cloruros para estimar la recarga potencial en tránsito (Alcalá y Custodio, 2008) es otro método muy interesante, aplicable en un entorno SIG. Y también los modelos numéricos de simulación que permiten determinar la recarga real en determinados casos, y los estudios isotópicos, que ayudan a identificar las fuentes de alimentación y su altitud, entre otras cosas (Vallejos *et al.*, 1997; Edmunds, 2001). También son de notable utilidad los métodos que tienen en cuenta el uso del suelo, la vegetación y procesos superficiales simulados con el apoyo de sensores remotos (Bellot *et al.*, 2007; Frot y van Wesemael, 2009)

La recarga potencial, obtenida por algunos de los métodos citados, en áreas montañosas del SE alcanza un valor medio  $40 \pm 15$  % de la precipitación medida, con notable dispersión en años extremos (1 a 75 %; Contreras *et al.*, 2008; Cantón *et al.*, 2008). Ello se traduce en que la recarga es despreciable en años secos y puede ser especialmente significativa en los años húmedos a muy húmedos (Martínez-Santos y Andreu, 2010; Alcalá *et al.*, 2011). Cuando los materiales aflorantes en los acuíferos carbonáticos incluyen tramos de baja permeabilidad (calcoesquistos y metapelitas en sierra de Gádor y margocalizas y calizas margosas en las Zonas Externas), la mayor parte de la escorrentía tiende a infiltrarse en los bordes ocupados por materiales detríticos cuaternarios tipo piedemonte (Martín-Rosales *et al.*, 2007b). Este hecho complica la aplicación de los métodos que calculan la recarga potencial para estimar la recarga real.

El programa ERAS es un modelo unicelular basado en la respuesta de la piezometría –medida en un piezómetro– frente a la explotación y la recarga de la lluvia en acuíferos sobreexplotados (Aguilera y Murillo, 2008). Los valores de recarga obtenidos mediante este código en el SE español son muy expresivos e indicativos de la complejidad del problema, al variar entre 0 y 45 % de la precipitación en pequeños acuíferos kársticos bien individualizados. El Gráfico 1 muestra el resultado de la aplicación de este modelo a un pequeño acuífero kárstico de la provincia de Alicante, en el que existe una estación pluviométrica, un sondeo instalado de bombeo conocido y un piezómetro instalado.

Con estos datos hemos querido dar una pincelada sobre la dificultad de cálculo y estimación de este elemento clave del balance hídrico, base de una sólida y real planificación del uso sostenible de las aguas subterráneas.

**Gráfico 1. Recarga obtenida mediante el modelo ERAS en el acuífero del Ventós para el período de simulación 1999-2008**



Fuente: Modificado de Martínez-Santos y Andreu (2010).

### 3. Marcos geológico e hidrogeológico

Desde el punto de vista geológico, el área que nos ocupa, de unos 23.000 km<sup>2</sup>, se sitúa dentro de la Cordillera Bética, perteneciendo la parte meridional a las Zonas Internas (Complejos Nevado-Filábride, Alpujárride y Maláguide, superpuestos tectónicamente e integrados por varias unidades o mantos de naturaleza muy diversa, que abarcan desde el Paleozoico –y eventualmente más antiguo– hasta el Trías); y el resto a las Zonas Externas, constituidas por terrenos sedimentarios esencialmente marinos con series carbonatadas potentes de edades variables –jurásicas esencialmente en el Subbético, situado al sur; y cretácicas en el Prebético– y margas, margocalizas y potentes series terciarias (Vera, 2004).

Los materiales acuíferos por excelencia son los carbonatos triásicos –calizas y dolomías más o menos metamorfizadas– dentro de las Zonas Internas (Almería y parte de Murcia), y las calizas y dolomías esencialmente liásicas en el Subbético –Norte de Almería y Murcia– y las calizas y dolomías cretácicas –frecuentemente del Cenomaniense Turoniense– en el Prebético, bien desarrolladas en las provincias de Murcia y Alicante. Además, existen numerosos acuíferos detríticos que rellenan las partes superiores de los valles y depresiones, y jalonan los lechos de ríos y ramblas. En la base y bordes de estas depresiones pueden existir materiales terciarios carbonáticos y calcareníticos que pueden constituir acuíferos de notable interés. Como más anecdóticos, se tienen los yesos del Messiniense que localmente están densamente karstificados (Calaforra y Pulido Bosch, 2003).

La intensa actividad tectónica que ha afectado a esta área ha generado una estructura extremadamente compleja en detalle; si a ello se une la existencia de numerosos materiales de permeabilidad baja a muy baja como son el Trías de facies Keuper, arcilloso con evaporitas, las margas y margocalizas de diversas edades, el resultado es una notable compartimentación que da lugar a acuíferos de muy desigual envergadura y cuya continuidad lateral es difícil de establecer. Algunos de esos accidentes tectónicos, tipo fallas regionales de largo recorrido, pueden constituir puntos de salida de manifestaciones termales diversas, relativamente abundantes en el sector (Alhama de Almería y de Murcia, Alhama, Cela, los Guiraos, como más relevantes).

En la provincia de Almería la unidad hidrogeológica de mayor desarrollo corresponde a sierra de Gádor con su prolongación hacia el Campo de Dalías y las ventanas de Turón y Peñarrodada. Los acuíferos dispersos de la cuenca de Almanzora y la sierra de María destacan dentro de los sistemas carbonáticos. La Cubeta de Pulpí, Saltador, Overa, aluvial del Almanzora, detrítico del Andarax, delta del Adra, y Campo de Níjar completan esta breve pincelada de masas de agua almerienses de un interés mucho más anecdótico.

## 4. Demandas y disponibilidades

### 4.1. Consideraciones generales

Se puede afirmar que el desarrollo económico del Sudeste peninsular ha tenido un pilar básico en el agua subterránea. Con las características climáticas señaladas, la actividad agrícola estuvo tradicionalmente ceñida a algunos lugares privilegiados a los que llegaba el agua, con el sistema tradicional de boqueras o canales de derivación, que conducían agua de ríos o de surgencias hacia determinados enclaves que tradicionalmente se regaban. Sirva como ejemplo el dato de que en 1946 en el Campo de Dalías el número total de hectáreas regadas no llegaba a mil (Pulido Bosch *et al.*, 2000). En la actualidad son más de 20.000 las hectáreas de invernaderos que se riegan, esencialmente y mediante agua bombeada en más de un centenar de perforaciones que extraen el agua de la Sierra de Gádor. De menos de 30.000 habitantes en esos años hoy se superan los 300.000, con puntas turísticas considerables en verano.

En el dominio turístico, Benidorm sería uno de los ejemplos de crecimiento espectacular en el área mediterránea, pasando de menos de 3.000 habitantes en la primera mitad del siglo pasado a más de 70.000 en la actualidad, con más del doble de turismo flotante. Algo similar puede decirse de Roquetas de Mar en Almería (de 3.800 habitantes en 1950 alcanza unos 90.000 en la actualidad) o la Manga del Mar Menor en Murcia.

La demanda de productos agrícolas y el crecimiento del turismo generaron un aumento de las necesidades de agua que obligó a la perforación de numerosos sondeos, desde iniciativas privadas o favorecidas

por las subvenciones de las administraciones. Este desarrollo se inició de manera desordenada, sin que existieran estudios de sostenibilidad. El efecto más inmediato fue el agotamiento de los acuíferos más pequeños y la explotación intensiva de la mayor parte de ellos. Tras los numerosos problemas generados por el agotamiento de los acuíferos, se iniciaron tímidos estudios para tratar de encontrar soluciones a la escasez de agua. En general, todos ellos partían de la premisa de satisfacer las demandas por todos los medios, sin que la sostenibilidad de los aprovechamientos fuera inquietud de los planificadores.

Agotados los acuíferos de pequeña dimensión, las soluciones pasaban necesariamente por la importación de recursos externos (trasvases de ríos “excedentarios”). A mediados de los años ochenta y en los años noventa del siglo pasado los planificadores obtienen cifras que cuantificaban las necesidades hídricas, que en fases sucesivas incluían una parte del agua que se emplearía para recuperar los acuíferos sobreexplotados, poniendo a punto para tal fin sistemas de recarga artificial. Desde la perspectiva de la última revisión de los Planes Hidrológicos de Cuenca que afectan al SE, las demandas de agua superan ampliamente a las disponibilidades naturales, existiendo problemas tanto de cantidad como de calidad del agua (MMA, 2007; Junta de Andalucía, 2011; CHS, 1998). Estos problemas son más graves y acuciantes en los períodos secos en que los trasvases no pueden funcionar por carecer de agua en origen y por ser despreciables los aportes pluviométricos en el SE.

Algunas de las consecuencias negativas directas asociadas a la sobreexplotación han sido identificadas en el SE español: descenso de los niveles piezométricos; subsidencia y compactación inducida del terreno (Mulas *et al.*, 2003) ; compartimentación de acuíferos (Rodríguez Estrella, 2004); aumento de los costos de explotación; deterioro de la calidad del agua; abandono de pozos; modificaciones inducidas en el régimen de los ríos; afección o secado de zonas húmedas (Robledano *et al.*, 2010); problemas legales por afección a los derechos de terceras personas. Igualmente, estas otras consecuencias negativas indirectas son asignables a áreas del SE: problemas en redes de evacuación y roturas de infraestructuras; salinización de suelos (Sánchez-Martos *et al.*, 2007); desertización progresiva; inducción de hundimientos y colapsos; cambios en las propiedades físicas de los acuíferos.

## 4.2. Algunos ejemplos

### El alto Guadalentín

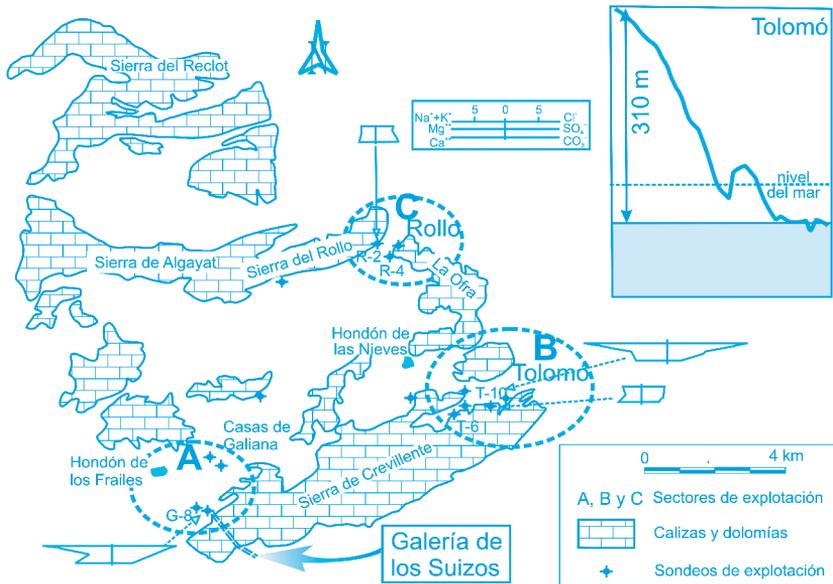
El acuífero detrítico del alto Guadalentín, objeto de explotación durante varias decenas de años, comienza a detectar un descenso continuado de los niveles a partir de 1973. La magnitud de este descenso, variable de unos sectores a otros, llegó a ser de 4,5 m/año entre 1976 y 1983 y de 10 m/año entre 1984 y 1985, según los datos publicados en 1988 por la Dirección General de Recursos Hidráulicos de la Comunidad de Murcia. La peculiaridad de este caso reside en el hecho de que con el avance de la sobreexplotación se registra un notable aumento del contenido en  $\text{CO}_2$  de las aguas, de manera especialmente marcada a partir del año 1983 en el que la profundidad del nivel piezométrico era de 140 m; el contenido en bicarbonato de las aguas, que en régimen natural era cercano a 300 mg/L, pasa a 800 mg/L a principios de 1986 y a 1800 mg/L en 1987, en los sectores más “contaminados” (Rodríguez Estrella *et al.*, 1987). La liberación de estos gases (predomina el  $\text{CO}_2$ , aunque también se han detectado  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , y  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  y He en mucha menor proporción; *op. cit.*) parece estar relacionada con la disminución de la carga hidráulica; como consecuencia inmediata las aguas resultaron mucho más agresivas, de manera que los equipos de bombeo, las conducciones metálicas y otras instalaciones fueron corroídas debiendo proceder a su renovación tras tan sólo algunos meses de utilización, con el consiguiente costo adicional (Cerón y Pulido Bosch, 1996).

### La sierra de Crevillente

El acuífero de la sierra de Crevillente (Figura 1) está integrado por calizas y dolomías jurásicas subbéticas. Ha sido intensamente explotado desde mediados de los años sesenta (Pulido Bosch, 1998). El sistema inicial de explotación, llevado a cabo por iniciativa privada, fue la denominada “galería de los suizos” o Riegos de la Salud (figura 4; Andreu, 1997; Andreu *et al.*, 2002) consistente en una galería de 2.360 m de longitud que se inicia en las margas blancas miocenas, pasa por conglomerados y calcarenitas para posteriormente seguir en yesos triásicos y,

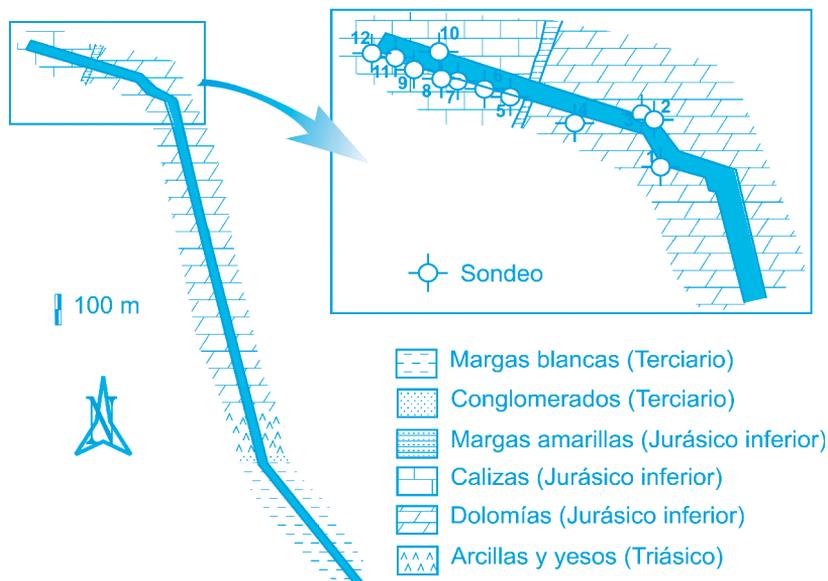
por último, alcanzar las dolomías liásicas subbéticas. Los primeros 700 m fueron revestidos de hormigón, mientras que el resto, salvo complicaciones muy locales, permanece sin revestir, aunque el fondo sí que está hormigonado por las propias necesidades de explotación. En este caso también se pagó un precio por los desconocimientos hidrogeológicos, lo cual no es de extrañar si tenemos en cuenta que las primeras ideas sobre esta captación se remontan a los años 50 del siglo pasado.

**Figura 1. Esquema hidrogeológico del acuífero de la sierra de Crevillente con indicación de las áreas de mayor explotación, ritmo de vaciado en el Tolomó (B) y diagramas de Stiff de las aguas de algunos pozos**



En efecto, se partía de la idea de que la sierra de Crevillente era el punto de salida de un inmenso acuífero conectado con la Mancha, con unas disponibilidades hídricas cifradas en  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ . La captación original autorizada por la Jefatura de Minas consistió en un pozo con dos galerías laterales, sustituida en 1956 por otro proyecto más ambicioso y de casi nulo coste de explotación: la galería actual. Dicha galería atravesaría toda la sierra, con 2,5-3 m de ancho, unos 3,5 de alto y una pendiente del 1 por mil (Andreu *et al.*, 2002); y el agua saldría por su pie. Fue ejecutada con el diámetro actualmente visible, pero con la intención de aumentarlo una vez comprobado el buen resultado de la misma con un caudal inicial de 5.000 L/s.

**Figura 2. Esquema de la galería de los suizos y detalle de la misma con indicación de los sondeos perforados en su interior**



Fuente: Andreu *et al.* (2002).

El nivel del agua en el acuífero se encontraba por encima del techo de la galería, quedando al ras de la misma al poco tiempo de su terminación (en 1964), sin que su caudal de salida nunca superara 1 m<sup>3</sup>/s. 12 sondeos en su interior (*op. cit.*), de escasa profundidad inicial, pero que llegaron a 300 m con los años, fueron los encargados de extraer hasta más de 600 L/s, con valores máximos de 18 hm<sup>3</sup>/año en 1980, bajando a 4 hm<sup>3</sup>/año a partir de 1997 (*op. cit.*). Para poder perforar, la máquina de percusión que se introducía con el mástil plegado, necesitaba una “campana” de algo más de la altura del mástil desplegado. Posteriormente, otros sectores al oeste de este mismo relieve y en la vecina sierra del Rollo se pusieron en explotación.

Con unos recursos medios estimados en 10 hm<sup>3</sup>/año, en este acuífero se han llegado a extraer en algunos años más de 40 hm<sup>3</sup>. Debido a ello los niveles piezométricos descendieron de forma continuada, más acusada en los años más secos; muchos sondeos tuvieron que ser reprofundizados y algunos abandonados, por pérdidas de rendimiento. Además, la calidad del agua sufrió un deterioro continuado, llegando la salinidad a superar varios gramos por litro en los sondeos más cercanos a los afloramientos o subafloramientos de materiales de facies Keuper (Pulido Bosch *et al.*, 1995; Andreu *et al.*, 2010). La declaración provisional de acuífero sobreexplotado, el deterioro de la calidad y la existencia de un período ligeramente más húmedo que la media tuvieron como consecuencia la inversión de la tendencia al descenso en los niveles especialmente en algunos sectores, de manera que algún año han llegado incluso a subir de forma manifiesta. En la actualidad los niveles en los dos sectores en los que se concentra la explotación (Tolomó y Suizos) se sitúan bajo el nivel del mar (Andreu *et al.*, 2008; Figura 3).

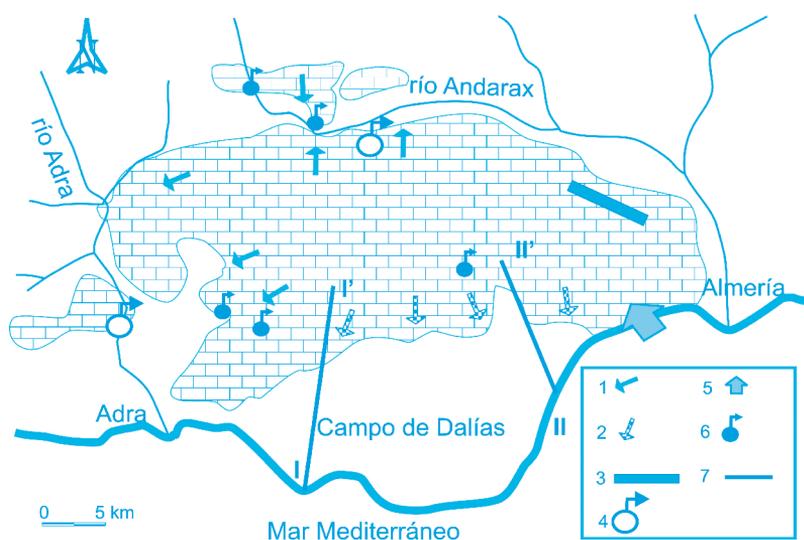
## El macrosistema Turón-sierra de Gádor

### *Marco general*

El macrosistema Turón-sierra de Gádor ocupa una superficie cercana a 700 km<sup>2</sup> (Figuras 3 y 4). El tramo acuífero por excelencia está integrado por dolomías y calizo-dolomías de edad triásica, con algunas intercalaciones de calcoesquistos. La potencia total puede superar el mi-

llar de metros. Estas rocas pertenecen al manto de Gádor, aunque hay algunas escamas del manto de Felix en donde los carbonatos están algo menos desarrollados y las metapelitas basales, de color rojizo en este caso, afloran más ampliamente (Vallejos, 1997; Sánchez Martos, 1997; Martín Rosales, 2002; Molina, 1998; Pulido Bosch *et al.*, 2005).

**Figura 3. Esquema hidrogeológico**



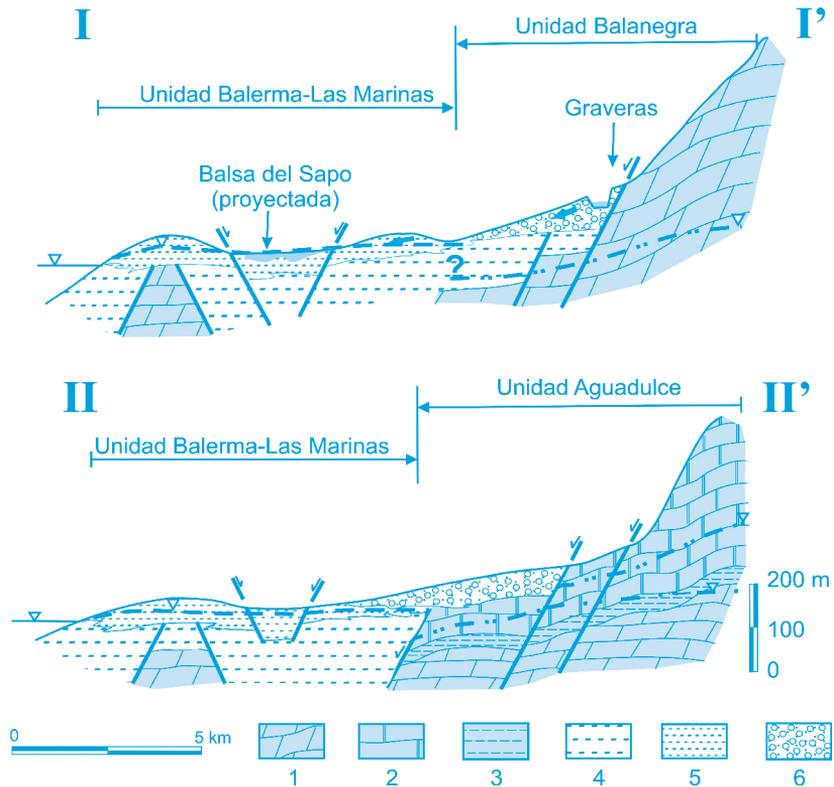
1: Flujo subterráneo no termal; 2: Flujo subterráneo hacia los niveles carbonatados profundos del Campo de Dalías; 3: Flujo subterráneo termal; 4: Principales manantiales; 5: Influencia marina; 6: Otros manantiales; 7: cortes hidrogeológicos esquemáticos (Fig. 6).

Fuente: Modificado de Pulido Bosch *et al.* (2011).

En régimen natural este gran acuífero tenía dos puntos principales de drenaje; en el interior las denominadas “fuentes de Marbella”, junto al río Adra y aguas abajo del embalse de Benínar; y el sector de Aguadulce, en donde la descarga subterránea sería en realidad la componente mayor del balance (Díaz Puga *et al.*, 2011). La explotación intensiva, iniciada en los años sesenta, eliminó prácticamente las salidas de agua dulce e incluso se generaron avances del contacto agua dulce –agua salada (Vallejos *et al.*,

1997). Sin embargo, las fuentes de Marbella han mantenido su caudal e incluso lo han aumentado considerablemente como consecuencia de las fugas en el embalse. Eso ha hecho que la Agencia Andaluza del Agua, en la revisión del Plan Hidrológico, diferencie un supuesto acuífero excedentario en relación con dicha surgencia, mientras que el resto del área estaría sobreexplotado. No obstante, los puntos de observación en uno y otro acuífero muestran evidencias de descensos más o menos continuados (Junta de Andalucía, 2011).

Figura 4. Cortes hidrogeológicos esquemáticos y representativos



1: Calizas y dolomías Felix; 2: ídem Gádor; 3: metapelitas basales de Felix; 4: margas mio-pliocenas; 5: calcarenitas pliocenas; 6: gravas, arenas y lutitas de los abanicos aluviales cuaternarios.

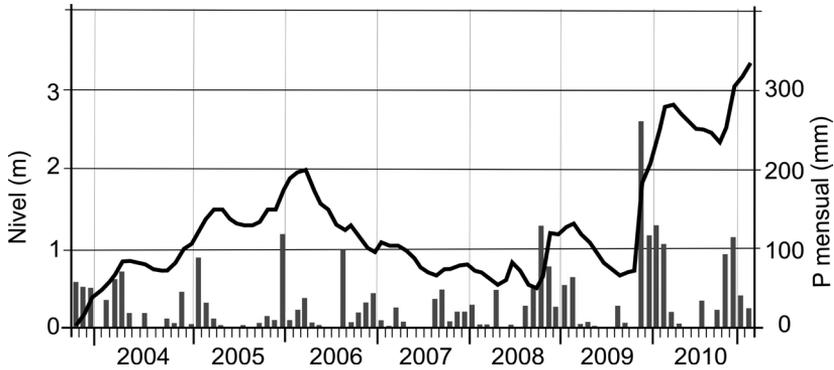
Las cifras de bombeos más o menos actualizadas indican que en las formaciones carbonatadas se bombean unos 120 hm<sup>3</sup>/año; en la denominada unidad Balerma-Las Marinas, desarrollada esencialmente en la plataforma litoral emergida del Campo de Dalías, los bombeos en los años sesenta eran inferiores a 10 hm<sup>3</sup> y fueron creciendo hasta superar 45 hm<sup>3</sup> en los años ochenta. Al final de los noventa los bombeos superaban ligeramente 15 hm<sup>3</sup>/año. Analizando los datos históricos (Vallejos *et al.*, 2008) se concluye que la explotación minera del acuífero durante los últimos treinta años puede alcanzar 600 hm<sup>3</sup>.

*La Balsa del Sapo, una singularidad hidrológica en un medio intensamente explotado*

Dentro de este esquema llama poderosamente la atención el hecho de que la denominada Balsa del Sapo o la Cañada de las Norias, que en realidad era un fondo de explotación de arcillas de donde se extraían finos para soporte de invernaderos, comenzó a inundarse a principios de los años noventa. En la actualidad hay varios humedales, algunos de ellos de más de 1 km<sup>2</sup> de superficie, que ya han engullido numerosos invernaderos. Las intensas lluvias otoñales e invernales de los años 2008, 2009 y 2010 tuvieron en jaque a las viviendas de las poblaciones circundantes (Las Norias).

En la actualidad estos recientes humedales tienen ya una figura de protección y son más de setenta las especies avícolas que nidifican. Los fondos de estas explotaciones están situados sobre las potentes margas amarillas miocenas, y la cota del agua refleja la del nivel freático del acuífero, ligado a las calcarenitas pliocuaternarias. En el Gráfico 2 se muestra la evolución del nivel del agua en la laguna principal durante los últimos ocho años. Las intensas lluvias ocurridas en los dos últimos años han producido ascensos que superan dos metros.

**Gráfico 2. Evolución del nivel de la Balsa del Sapo desde 2003**



Fuente: Datos tomados por la Concejalía de Agricultura de El Ejido, a los que se superpone la precipitación mensual medida en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar.

Lo sorprendente de estos humedales es que en un entorno sometido a explotación intensiva del agua se tiene un grave problema de “exceso” de agua y así parece que está siendo abordado. Es una realidad el hecho de que la Balsa del Sapo es una cuenca endorréica ligada a la tectónica reciente del Campo que hace que el agua que converge a ella quede acumulada o no sea drenada ni superficial ni subterráneamente. El salto de la falla meridional prácticamente pone en contacto las margas arenosas pliocenas con el fondo de la balsa, por lo que la única salida aparente de esa agua es la evaporación. En planes hidráulicos anteriores (*Plan Global de actuaciones hidráulicas prioritarias de la provincia de Almería*, 1998) se diseñó un sistema calificado de “recarga artificial” consistente en la perforación de un túnel filtrante que salvaría el umbral meridional, por lo que se creía que desde el túnel se alimentaría al acuífero con el agua de la Balsa. El problema es que el nivel freático en las calcarenitas pliocenas es superior al de la Balsa, lo que quiere decir que sería un túnel drenante, transportando el agua de la Balsa hacia el mar y bajando el nivel freático en las calcarenitas.

Desde el punto de vista social, resulta claro que estamos en un área de escasas precipitaciones, con evidencias de explotación intensiva del agua. Por ello, la simple idea de arrojar el agua al mar mediante el túnel sorprendería notablemente, cuando lo más intuitivo –también en opinión de los agricultores consultados al respecto– es que sea aprovechada adecuadamente, bien mezclándola con agua de mejor calidad o,

lo que sería posiblemente más sencillo, mediante desalobración. Todo ello en una cantidad que elimine el riesgo de inundación del área y sin que aumente la cota de llenado, al tiempo que se garantice y respete la reciente decisión de declarar protegida la Balsa. La puesta en explotación de los sondeos que utilizaban este acuífero contribuiría también a reducir el problema derivado del aumento de la cota de llenado de la balsa. Acua-med presentó un proyecto donde se planteaban diferentes alternativas, y entre la que se considera como más adecuada está la construcción de una planta desalobrador que reduzca la salinidad de las aguas, con el objetivo de aprovechar para riego las aguas de la Balsa del Sapo que actualmente se vierten al mar (MARM, BOE, 30 de junio de 2011).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que hemos pasado un período extremadamente húmedo para lo que es usual en el área; en los períodos secos que seguro que le afectarán, la evaporación reducirá el nivel en la Balsa al tiempo que el contenido salino del agua aumentará. Quiere ello decir que se trata de un recurso hídrico limitado a períodos concretos, lo cual ha de ser tenido en cuenta al momento de gestionar de forma sostenible ese entorno.

En resumen, se puede concluir que el esquema de suministro de agua en la provincia de Almería no es sostenible con los planteamientos actuales, pudiendo colapsar el sistema productivo en cualquier momento de no hacer las correcciones oportunas. Ahorro de agua, reutilización de las aguas residuales convenientemente depuradas y esterilizadas son dos de las soluciones imprescindibles, aunque no bastan.

## 5. Algunas actuaciones posibles

Ya hemos comentado algunas de las propuestas de la administración para hacer frente a la problemática del agua. Por nuestra parte, desde hace mucho tiempo proponemos actuaciones “blandas” cuya finalidad es aprovechar el agua de escorrentía, especialmente las generadas por lluvias de alta intensidad. Estas y otras actuaciones (Ferguson, 1994; Prinz, 2002), además del aprovechamiento del agua de escorrentía, permitirían reducir el riesgo de daños producidos por los elevados caudales que se pueden alcanzar. Los elementos a considerar serían, por un lado las pre-

precipitaciones en cantidad como en intensidad, la naturaleza del terreno, los diques construidos en los lechos de las ramblas, los numerosos huecos de las canteras extractoras de gravas para sustratos de invernaderos y las balsas y zanjas que podrían construirse. También podrían tener su interés los huecos mineros, ya que en la sierra de Gádor, durante el siglo XIX, llegó a haber 20.000 familias trabajando en la explotación del plomo en minería subterránea, y posteriormente, en el flúor, por lo que puede haber más de mil huecos mineros distribuidos por toda la sierra. Esta actividad minera tuvo también como impacto negativo el derivado de la práctica desaparición de la cobertura vegetal de la sierra, que fue utilizada para la metalurgia y, en menor medida, para la entibación minera.

En la sierra de Gádor pueden existir unos 200 diques que jalonan los lechos de las ramblas que drenan el macizo. De ellos, 110 se sitúan en el borde meridional, 9 de los cuales son de hormigón en masa, 29 de gaviones y 72 de mampostería hidráulica, con un volumen original de almacenamiento de unos 300.000 m<sup>3</sup> que con el tiempo se ha reducido en casi 20 % como consecuencia de los arrastres (el potencial erosivo medio de las ramblas es de 50 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año, aunque algunas superan 2.000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año; Martín Rosales, 2002). Además, en las zonas apicales de los abanicos aluviales y las salidas de los canales de desagüe de algunas de las 55 subcuencas del borde sur de la sierra, hay graveras de superficies muy variables.

Nuestro Grupo de Investigación (Pulido-Bosch *et al.*, 2002) ha instalado numerosos pluviógrafos en la sierra, así como tres estaciones de aforo en otras tantas cuencas, para intentar cuantificar y comprobar los datos teóricos de escorrentía obtenida. Se realizaron pruebas de infiltración en lechos de ramblas mediante los métodos del doble anillo y de Haefeli, para obtener datos orientativos de la permeabilidad de los lechos. Todos los cálculos contemplaron una duración de tormentas de seis horas con la máxima intensidad alcanzada a los 30 minutos del inicio de la tormenta. Con estos datos, y a partir de las bases geológicas, de la vegetación del suelo, y de un modelo digital del terreno, y mediante el método del número de curva y el *software* HEC-HMS (USACE, 2000), hemos estimado la escorrentía y el poder de recarga de los diques y de las graveras. Se estimaron las pérdidas a lo largo del lecho mediante el método de Muskingum-Cunge.

Los trabajos realizados pusieron de manifiesto que el volumen de embalse total de los diques era ligeramente superior a 200.000 m<sup>3</sup>, y que el tiempo de infiltración en las graveras era siempre inferior a 24 horas, incluso para eventos con cien años de período de retorno. El volumen excedente para un aguacero de 5 años de período de retorno, en todo el borde meridional, se estima en algo más de 3 hm<sup>3</sup>, de los que el 10 % se infiltra en los diques. Sin embargo, las graveras serían teóricamente capaces de infiltrar estos 11 hm<sup>3</sup> en el año más húmedo, 6 hm<sup>3</sup> en el año medio, y 3 hm<sup>3</sup> en el año seco. Los diques, por su lado, sólo recargarían 2, 4 y 1 hm<sup>3</sup> en esos mismos años, en los que se estima una “escorrentía restante” de 20, 38 y 9 hm<sup>3</sup>, respectivamente en los años medio, húmedo y seco (Pérez Parra *et al.*, 2005). Aunque estas cifras son el resultado de detallados cálculos, resultan algo elevadas si nos atenemos a lo observable en campo.

Los eventos lluviosos de diciembre de 2009 permitieron constatar los efectos en las graveras de la rambla de Carcáuz. Dichas canteras, con varios hm<sup>3</sup> de capacidad, se llenaron con el agua de la escorrentía de varios eventos lluviosos de intensidad relativamente elevada; al cabo de mes y medio, prácticamente todo el agua se había infiltrado y/o evaporado (esto contradice las estimaciones previamente realizadas sobre el tiempo de infiltración, pero en la estimación teórica se trataba de graveras muy poco profundas, y con más desarrollo lateral). Como hipótesis de trabajo a demostrar adecuadamente, consideramos que una fracción de esa agua puede terminar en la Balsa del Sapo, de ahí que una gestión racional de los recursos deba contemplar esa eventualidad. En cualquier caso, es muy razonable que se aborde la explotación de las calcarenitas pliocuaternarias, retomando antiguas explotaciones, pero con la óptica de la sostenibilidad.

## 6. Consideraciones finales

Las regiones semiáridas tienen graves problemas para mantener un desarrollo económico sostenible. La escasez de agua es posiblemente el factor más limitante. El uso tradicional del agua, puede ser un enemigo de la sostenibilidad y, sobre todo, la desinformación y la falta de criterios de la administración al momento de gestionar los recursos. La experiencia nos

hace ser defensores de las *obras blandas*, y muy poco partidario de las grandes infraestructuras, de gran utilidad en regiones de climatología más favorable, pero que en clima semiárido son muy poco eficaces. Grandes embalses, como el de Cuevas de Almanzora en Almería que está casi permanentemente seco, o que evapora grandes cantidades de agua con el consiguiente deterioro de la calidad del agua almacenada, no contribuyen a mejorar la gestión.

El diseño de las citadas obras blandas y el aprovechamiento de los diques y graveras, si se hace de manera adecuada, pueden tener resultados muy relevantes a un coste ambiental bastante reducido. Aunque no se ha hecho énfasis en la cuestión, el diseño adecuado de estas obras debe tener en cuenta, entre otros aspectos, los riesgos de movimiento de taludes y la colmatación de las balsas de recarga que en nuestros estudios no han sido abordados. De igual manera, si se quieren llevar a cabo experiencias serias al respecto, parece imprescindible realizar detenidos estudios hidroeconómicos para cuantificar adecuadamente los costes reales de tales actuaciones.

Pero si se parte del hecho de que el gran consumidor de agua es la agricultura, cuanto contribuya al ahorro de agua, a mejorar la eficiencia del riego, a reutilizar las aguas residuales debidamente depuradas, estaremos avanzando en la mejoría de la gestión del escaso recurso hídrico disponible; por ello, éstas son otras tantas prácticas que deben llevarse a cabo. La construcción de grandes plantas desaladoras, que constituye una solución casi definitiva desde el punto de vista técnico, plantea el problema del costo real de explotación (Martínez Rodríguez, 2011). Muchos de los agricultores no están dispuestos o no se pueden permitir pagarlo. Ahora bien, la coordinación entre la aplicación urbana del agua desalada y el posterior uso en agricultura de las aguas residuales tratadas permitirá aumentar las disponibilidades y la disminución de los actuales bombeos, con la consiguiente mitigación de los efectos negativos ya producidos. En suma, se habrá avanzado en la línea de la sostenibilidad.

¿Y las transferencias desde otras cuencas? No deben ser descartadas, desde cuencas cercanas, si las condiciones fueran adecuadas. No tiene sentido cuando los costes son superiores a los de desalar aguas de mar, por ejemplo. En cualquier caso, siempre la decisión debería estar soportada por detallados estudios de viabilidad, con la participación de todos los sectores implicados y los intereses afectados, en donde la sostenibilidad y la conservación del medio sean parámetros a evaluar adecuadamente.

Pero el gran reto es conseguir aplicar los principios dinámicos de la gestión sostenible en un medio degradado, con respecto y recuperación de los ecosistemas, sin lesionar los legítimos derechos de la ciudadanía sobre el disfrute de un medio sano, con participación activa de cuantos colectivos se vean afectados, con máxima transparencia, cumplimiento de la normativa y de los compromisos adquiridos con la Unión Europea.

Las numerosas incertidumbres que tiene la planificación en estas regiones tienen que traducirse en profundizar en el conocimiento de los servicios ecosistémicos. Investigar y mejorar los procedimientos y métodos de cuantificación más precisa de los elementos tan importantes como la cuantificación de la recarga de los acuíferos y sus variaciones espaciales y temporales, densificar y mejorar la eficiencia de las redes de observación y registro de los parámetros básicos relativos a la cantidad y a la calidad de las aguas, y avanzar igualmente en la asignatura pendiente del uso conjunto del agua superficial y del agua subterránea, intentando dar el peso específico adecuado a los embalses subterráneos como infraestructuras naturales no siempre bien entendidos ni óptimamente utilizados.

Es bien cierto que cuando la cantidad de agua disponible es escasa se es menos sensible a las deficiencias en la calidad de la misma. Pero eso tiene un límite que no puede ser superado bajo ningún concepto. En este sentido hay también mucho por hacer en numerosos frentes. Por citar algunos más relevantes, tendríamos las aguas residuales urbanas, los residuos agrícolas, y las aplicaciones de fertilizantes y pesticidas en agricultura. El aumento paulatino de la población o los notables incrementos estivales debidos al turismo, en muchos casos no han tenido la correcta adecuación de las infraestructuras de depuración de las aguas residuales. En muchos casos la solución a los problemas derivados no han sido atendidos debidamente por los responsables de la gestión, arrojando al medio un agua contaminada que es, a su vez, un foco potencial de contaminación que degrada la calidad de otras aguas de buena calidad y destruye ecosistemas. Estas situaciones se mantienen durante muchos años a la espera de soluciones que no llegan. Cuanta más conciencia se tome al respecto y se resuelvan antes estos problemas mejor será para el medio natural y para su sostenibilidad.

Finalmente, hay que tomar conciencia de que hay disponible un buen número de tecnologías y métodos que permiten abordar con éxito

la mayor parte de los problemas relacionados con su cantidad y su calidad, aunque también hay que tomar conciencia que estas tecnologías son costosas y hay que pagarlas. La toma de conciencia de todo ello y la enseñanza de tales principios desde la escuela será una contribución hacia la solución de los problemas.

### Agradecimientos

El presente trabajo sintetiza parte de los datos obtenidos en el proyecto de excelencia P06-RNM-01696, financiado por la Junta de Andalucía, y en los proyectos CGL2007-63450/HID y CGL2008-03649, financiados por el MICINN. Nuestro agradecimiento a Francisco J. Cortés, director de *Cuides*, por la invitación a presentar el presente texto.

### Referencias bibliográficas

- AGUILERA, H. y MURILLO, J. M. (2009): "The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain"; en *Environmental Geology* (57); pp. 963-974.
- ALCALÁ, F. J. y CUSTODIO, E. (2008): "Atmospheric chloride deposition in continental Spain"; en *Hydrological Processes* (22); pp. 3636-3650.
- ANDREO, B.; VÍAS, J.; DURÁN, J. J.; JIMÉNEZ, P.; LÓPEZ-GETA, J. A. y CARRASCO, F. (2008): "Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain"; en *Hydrogeology Journal* (16, 5); pp. 911-925.
- ANDREU, J. M. (1997): *Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid y Cabeçó d'Or (provincia de Alicante)*. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- ANDREU, J. M.; GARCÍA-SÁNCHEZ, E.; JORRETO, S.; FRANCÉS, I. y PULIDO-BOSCH, A. (2008): "Evaluación de la calidad del agua subterránea en la actual zona saturada del acuífero de Crevillente (Alicante)"; en *Geogaceta* (44); pp. 151-154.

- ANDREU, J. M.; GARCÍA-SÁNCHEZ, E.; PULIDO-BOSCH, A.; JORRETO, S. y FRANCÉS, I. (2010): "Influence of Triassic deposits on water quality of some karstic aquifers to the south of Alicante (Spain)"; en *Estudios Geológicos* (66); pp. 131-138 [doi:10.3989/egeol.40150.098].
- ANDREU, J. M.; ALCALÁ, F. J.; VALLEJOS, A. y PULIDO-BOSCH, A. (2011): "Recharge to mountainous carbonated aquifers in SE Spain: different approaches and new challenges"; en *Journal of Arid Environments* (75); pp.1262-1270.
- BELLOT, J.; BONET, A.; PEÑA, J. y SÁNCHEZ, J. R. (2007): "Human impacts on land cover and water balances in a coastal Mediterranean county"; en *Environmental Management* (39); pp. 412-422.
- CALAFORRA, J. M. y PULIDO BOSCH, A. (2003): "Evolution of the gypsum karst of Sorbas (SE Spain)"; en *Geomorphology* (50); pp. 173-180.
- CANTÓN, Y.; VILLAGARCÍA, L.; MORO, M. J.; SERRANO-ORTIZ, P.; WERE, A.; ALCALÁ, F. J.; KOWALSKI, A. S.; SOLÉ-BENET, A.; LÁZARO, R. y DOMINGO, F. (2010): "Temporal dynamics of soil water balance components in a karst range in southeastern Spain: estimation of potential recharge"; en *Hydrological Sciences Journal* (55); pp. 737-753.
- CERÓN, J. C. y PULIDO BOSCH, A. (1996): "Groundwater problems resulting from CO<sub>2</sub> pollution and overexploitation in Alto Guadalentín aquifer (Murcia, Spain)"; en *Environmental Geology* (28, 4); pp. 223-228.
- CHS (1998): *Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura*. Memoria.
- CONTRERAS, S. (2006): *Distribución espacial del balance hídrico anual en regiones montañosas semiáridas. Aplicación en Sierra de Gádor (Almería)*. Tesis Doctoral, Universidad de Almería.
- CONTRERAS, S.; BOER, M. M.; ALCALÁ, F. J.; DOMINGO, F.; GARCÍA, M.; PULIDO-BOSCH, A. y PUIGDEFÁBREGAS, J. (2008): "An ecohydrological modelling approach for assessing long-term recharge rates in semiarid karstic landscapes"; en *Journal of Hydrology* (351); pp. 42-57.
- DÍAZ PUGA, M. A.; VALLEJOS, A.; DANIELE, L.; SOLA, F.; RODRÍGUEZ-DELGADO, D.; MOLINA, L. y PULIDO-BOSCH, A. (2011): "An oceano-

- graphic survey for the detection of a posible submarine groundwater discharge in the coastal zone of Campo de Dalías, SE Spain”; 9th International Hydrogeological Congress (poster). Kalavrita, Grecia. In: *Advances in the research of aquatic environment*. Eds. N. LAMBRAKIS *et al.* [DOI: 10.1008/978-3-642-19902-8].
- EDMUNDS, W. M. (2001): “Palaeowaters in European coastal aquifers –goas and main conclusions of the PALAEAUX project”; en *Geol. Soc. London*, Special Publ. (189); pp. 1-16.
- FROT, E. y VAN WESEMAEL, B. (2009): “Predicting runoff from semi-arid hillslopes as source areas for water harvesting in the Sierra de Gador, southeast Spain”; en *Catena* (79); pp. 83-92.
- FERGUSON, B. K. (1994): *Stormwater infiltration*. Lewis Publ.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (2011): *Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas*. CMA, Agencia Andaluza del Agua.
- MARTÍN ROSALES, W.; PULIDO-BOSCH, A.; VALLEJOS, A.; GISBERT, J.; ANDREU J. M. y SÁNCHEZ MARTOS, F. (2007a): “Hydrological implications of desertification in Southeastern Spain”; en *Hydrological Sciences Journal* (52, 6); pp. 1146-1161.
- MARTÍN-ROSALES, W.; GISBERT, J.; PULIDO-BOSCH, A.; VALLEJOS, A. y FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2007b): “Estimating groundwater recharge induced by engineering systems in a semiarid area (southeastern Spain)”; en *Environmental Geology* (52); pp. 985-995.
- MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, F. J. (2011): *Estudio de la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería*. Trabajo de Investigación Máster. Departamento de Hidrogeología, Universidad de Almería [<http://repositorio.ual.es/jspui/handle/10835/1152>].
- MARTÍNEZ-SANTOS, P. y ANDREU, J. M. (2010): “Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers”; en *Journal of Hydrology* (388); pp. 389-398 [doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.018].

- MMA (1998): *Plan Global de actuaciones hidráulicas prioritarias de la provincia de Almería*. Real Decreto Ley. También en el *Libro Blanco sobre el agua en España 2000*.
- MMA (2000): *Libro blanco del agua en España*. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad del Agua e Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- MMA (2006): *Síntesis de la información remitida por España para dar cumplimiento a los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua en materia de aguas subterráneas*. Dirección General de Aguas, Madrid.
- MMA (2007): *Estudio general sobre la Demarcación Hidrográfica del Júcar*.
- MARM (2011): *Resolución de 15 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto Desalobrador de la Balsa del Sapo, Almería*. BOE 30 de junio de 2011.
- MULAS, J.; ARAGÓN, R.; MARTÍNEZ, M.; LAMBÁN, J.; GARCÍA-ARÓSTEGUI, J. L.; FERNÁNDEZ-GRILLO, A. I.; HORNERO, J.; RODRÍGUEZ, J. y RODRÍGUEZ, J. M. (2003): "Geotechnical and hydrogeological analysis of land subsidence in Murcia (Spain)"; en *RMZ e Materials and Geoenvironment* (50); pp. 249-252.
- MURILLO, J. M. y RONCERO, F. J. (2005): "Natural recharge and simulation of the management using the model 'ERAS'. Application to the Penarrubia aquifer (Alicante)"; en *Boletín Geológico y Minero* (116); pp. 97-112.
- PÉREZ PARRA, J. et al. (2005): *Recarga en la sierra de Gádor e hidrogeoquímica de los acuíferos del Campo de Dalías*. Estación Experimental de Cajamar, Almería.
- PNUE/PAM/PLAN BLEU (2004): *L'eau des Méditerranéens: situation et perspectives*. Technical report, Athènes.
- PRINZ, D. (2002): "The role of water harvesting in alleviating water scarcity in arid areas"; en *Water resources development and management*. AL-RASHED, SINGH y SHERIF, eds.; pp. 107-122.

- PULIDO BOSCH, A. (1998): "Karst water exploitation. Introduction"; en *Karst hydrogeology and human activities*. IAH (20); pp. 225-234.
- PULIDO BOSCH, A. (2001): "Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible"; en *Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas*. Eds. A. PULIDO BOSCH, J. M. CALAFORRA y P. A. PULIDO LEBOEUF. Instituto de Estudios Almerienses-Diputación de Almería; pp. 115-132.
- PULIDO BOSCH, A.; MORELL, I. y ANDREU J. M. (1995): "Hydrochemical effects of groundwater mining of the Sierra de Crevillente aquifer (Alicante, Spain)"; en *Environmental Geology* (26); pp. 232-239.
- PULIDO-BOSCH, A.; MARTÍN-ROSALES, W.; PULIDO-LEBOEUF, P. y VALLEJOS, A. (2002): "Stormwater and groundwater management in a semi-arid region (Campo de Dalías, SE Spain)"; en *Hydrology and Water Resources*; SHERIF, SINGH y AL-RASHED eds., pp. 135-149.
- PULIDO-BOSCH, A.; PULIDO-LEBOEUF, P.; MOLINA, L.; VALLEJOS, A. y MARTÍN-ROSALES, W. (2000): "Intensive agriculture, wetlands, quarries and water management. A case study (Campo de Dalías, SE Spain)"; en *Environmental Geology* (40); pp. 163-168.
- PULIDO BOSCH, A.; DÍAZ PUGA, M. A.; VALLEJOS, A.; DANIELE, L.; MOLINA, L.; SÁNCHEZ MARTOS, F.; GISBERT, J.; MARTÍN ROSALES, W. y DÍAZ, E. (2011): "Gestión de recursos hídricos en regiones semiáridas: el caso de Almería y macrosistema de Turón-sierra de Gádor (SE español)"; VII Congr. Argentino de Hidrogeología; en *Hidrogeología Regional y Exploración Hidrogeológica*, pp.:1-14. Salta, Argentina.
- RODRÍGUEZ ESTRELLA, T.; GARCÍA, V. y ALBACETE, M. (1987): "Problemática de la presencia de gases en las aguas subterráneas del Valle del Guadalentín (Murcia)"; en *Hidrogeol. Rec. Hidr.* (XII); pp. 117-137.
- ROBLEDANO, F.; ESTEVE, M. A.; FARINÓS, P.; CARREÑO, M. F. y MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J. (2010): "Terrestrial birds as indicators of agricultural-induced changes and associated loss in conservation value of Mediterranean wetlands"; en *Ecological Indicators* (10); pp. 274-286.

- SAMPER, J. (1998): “Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres”; en *Boletín Geológico Minero* (109); pp. 31-54.
- SÁNCHEZ-MARTOS, F.; PULIDO-BOSCH, A.; MOLINA-SÁNCHEZ, L. y VALLEJOS-IZQUIERDO, A. (2007): “Identification of the origin of salinization in groundwater using minor ions (Lower Andarax, Southeast Spain)”; *The Science of the Total Environment* (297); pp. 43-58.
- SCANLON, B. R.; KEESE, K. E.; FLINT, A. L.; FLINT, L. E.; GAYE, C. B.; EDMUNDS, M. W. y SIMMERS, I. (2006): “Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions”; en *Hydrological Processes* (20); pp. 3335-3370.
- SIMMERS, I.; HENDRICKX, J. M. H.; KRUSEMAN, G. P. y RUSHTON, K. R. (1997): “Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi)arid Areas”; en *Contributions to Hydrogeology* (19). International Association of Hydrogeologists e Balkema, Rotterdam.
- USACE (2000): *Hydrologic modelling system HEC-HMS technical reference manual*. Davis, CA: Hydrologic Engineering Centre.
- VALLEJOS, A.; PULIDO-BOSCH, A.; MARTÍN-ROSALES, W. y CALVACHE, M. L. (1997): “Contribution of environmental isotopes to the understanding of complex hydrologic systems. A case study: Sierra de Gador, SE Spain”; en *Earth Surface Processes and Landforms* (22); pp. 1157-1168.
- VALLEJOS, A.; PULIDO-BOSCH, A.; DANIELE, L. y MARTÍN ROSALES, W. (2008): “The intensive exploitation of aquifers and its implications for sustainable water management in a semi-arid zone (Almeria, SE Spain)”; *IAHR International Groundwater Symposium*. Estambul (Turquía).
- VERA, J. A., ed.: (2004): *Geología de España*. Sociedad Geológica de España and Instituto Geológico y Minero de España, Madrid; 3 vols.

