

Ponencia para el XII Congreso Nacional de Comunidades de Regantes de España, organizado por FENACORE, a celebrar en Tarragona, Mayo de 2010.

USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

Joaquín Andreu Álvarez¹, Andrés Sahuquillo Herráiz², Abel Solera Solera¹, Manuel Pulido Velázquez¹, y Javier Paredes Arquiola¹.

1: Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n – 46021 – Valencia

2: Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n – 46021 – Valencia

Email: ximoand@upv.es

Resumen:

La Comunidad Europea establece en su Directiva Marco de Aguas, que se debe encontrar soluciones para conseguir el buen estado de todas las masas de agua continentales y costeras, así como la sostenibilidad de los sistemas de explotación, garantizando un suministro de agua adecuado a los usos. Para ello, y dada la intensa utilización de recursos hídricos en la mayor parte de las cuencas mediterráneas españolas, con escasez de recursos y propensión a largas sequías, será necesario desarrollar unas políticas de agua mediante una planificación y una gestión de las cuencas que, además de actuar sobre la demanda para su racionalización, consideren de forma integrada todos los tipos de fuentes de recursos, convencionales y no convencionales, aprovechando las características de cada una de forma lo más optimizada posible. Dentro de este enfoque tiene un destacado papel la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, tanto por los volúmenes de los flujos de agua que puede generar, como por incidir en el subconjunto de fuentes renovables por el ciclo hidrológico y que están íntimamente relacionadas con el estado ecológico de las masas de agua continentales y costeras. En la ponencia se revisan los distintos tipos de esquemas de utilización conjunta, poniendo de relieve que en las cuencas españolas, el esquema que más posibilidades de aplicación tiene para producir disponibilidades adicionales y mejoras de garantías es la utilización alternativa de aguas superficiales y subterráneas. Se revisan las herramientas y metodologías para el análisis, y las características de este para que las soluciones obtenidas sean coherentes con el sistema real. Se hace énfasis en que la utilización conjunta tiene una componente muy fuerte de gestión, y que esta gestión debe ser optimizada si se quieren obtener todas las ventajas que puede proporcionar, minimizando los efectos adversos que pueden derivarse de una práctica mal diseñada. Se destaca el papel de los usuarios en la factibilidad de la utilización conjunta, y las ventajas que proporciona esta práctica en la planificación y gestión de las sequías.

Introducción

La mayor parte de las cuencas españolas presentan un elevado desarrollo del uso de los recursos hídricos para actividades económicas. Como puede verse en la tabla 1, hay cuencas que tienen un cociente entre recursos demandados y recursos renovables (D/RR) próximo a la unidad, e incluso en algunos casos, superior a la unidad como puede verse en la tabla 1 para estimaciones efectuadas en el año 1998. Este último caso es factible mediante sobreexplotación de acuíferos, intensa reutilización de retornos, importación desde otras cuencas, y utilización de recursos hídricos no convencionales, por ejemplo procedentes de desalación de agua de mar, y normalmente también implica falta de garantías de suministro, y problemas de calidad de aguas y medioambientales.

AMBITO	DEMANDA	REC.RENOVABLE	D/RR
Galicia Costa	819	12.250	0,07
Norte I	617	12.689	0,05
Norte II	589	13.881	0,04
Norte III	486	5.337	0,09
Duero	3.860	13.660	0,28
Tajo	4.065	10.883	0,37
Guadiana I	2.312	4.414	0,52
Guadiana II	219	1.061	0,21
Guadalquivir	3.760	8.601	0,44
Sur	1.350	2.351	0,57
Segura	1.834	803	2,28
Júcar	2.962	3.432	0,86
Ebro	10.378	17.967	0,58
C.I. Cataluña	1.357	2.787	0,49
Baleares	288	661	0,44
Canarias	427	409	1,04
Total España	35.323	111.186	0,32

Tabla 1.- Relación entre demandas y recursos renovables para los ámbitos de planificación españoles estimadas en 1998 (valores en hm³) (Fuente: elaboración propia, a partir de datos de MMA, 2000).

Normalmente, estos valores tan altos de este sencillo indicador, implican con alta probabilidad problemas de falta de garantía en el suministro a las demandas, sobre todo en épocas de sequía (tan frecuentes en esas cuencas), problemas de calidad de aguas, y problemas medioambientales.

Por otra parte, como puede verse en la figura 1, en las cuencas del Guadiana, Segura, Júcar y Sur de Andalucía hay un gran número de masas de agua subterránea en las que la relación entre bombeos y recarga natural (B/RN) es superior a 1 y, si tenemos en cuenta que puede decirse, de forma simplificada, que cuando esta relación es superior a 0,8 el estado cuantitativo de la masa de agua subterránea no es satisfactorio, el número de acuíferos con problemas de sobreexplotación técnica es todavía más elevado (MMA, 2000).

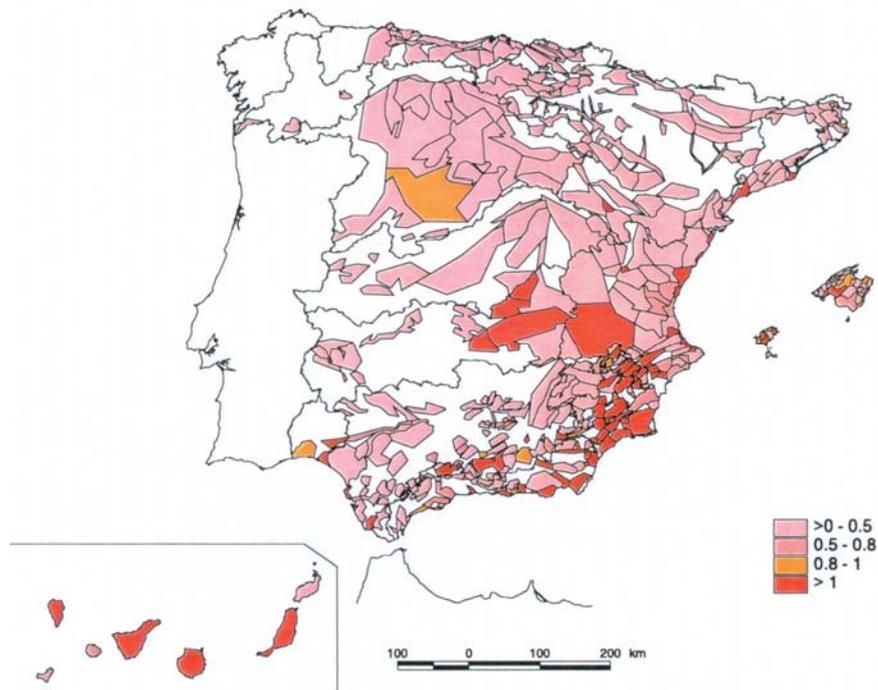


Figura 1.- Relación entre bombeos y recarga natural (B/RN) en las masas de agua subterránea españolas (Figura tomada del Libro Blanco del Agua en España (MMA, 2000)).

Como es bien sabido, los nuevos planes de cuenca que se están ultimando como respuesta al mandato que la Comunidad Europea establece en su Directiva Marco de Aguas (DMA), deben encontrar soluciones para conseguir el buen estado de todas las masas de agua continentales y costeras, así como la sostenibilidad de los sistemas de explotación, garantizando un suministro de agua adecuado a los usos. Para ello, en la situación en que se encuentran las mencionadas cuencas con escasez de recursos, y sus masas de agua, será necesario desarrollar unas políticas de agua mediante una planificación y una gestión de las cuencas que, además de actuar sobre la demanda para su racionalización, consideren de forma integrada todos los tipos de fuentes de recursos, convencionales y no convencionales, aprovechando las características de cada fuente de forma lo más optimizada posible.

Dada la complejidad de los sistemas de explotación en estas cuencas, y la interacción existente entre los elementos que los componen, es indudable que la búsqueda y validación de las soluciones integradoras de las fuentes debe realizarse mediante un riguroso análisis de los sistemas, el cual normalmente debe abordarse a escala de cuenca, o de sistema de explotación como mínimo, pues de otra forma, soluciones aparentemente adecuadas para problemas locales pueden no ser las mejores, o incluso causar perjuicios, cuando se analiza su efecto a escala de cuenca. Además, el análisis debe incluir otras dimensiones de la integración a escala de cuenca, como son las integraciones de los aspectos de calidad de aguas, medio ambiente, y economía, así como aspectos legales y sociales.

Resulta obvio que un análisis tan complejo no puede realizarse de forma simplificada, sino que necesita el apoyo de herramientas con suficiente base técnica y científica como para capturar de forma adecuada las interacciones entre los elementos del sistema, y así poder evaluar las implicaciones de las soluciones propuestas sobre los mencionados aspectos, proporcionando

información sobre los intercambios que se producen entre unas soluciones y otras en términos de los objetivos de distinto tipo perseguidos en la gestión de las cuencas.

Actualmente se dispone de herramientas de este tipo, las cuales se integran en sistemas de apoyo a la decisión, de forma que su utilización cotidiana por los gestores del agua no resulta complicada. En experiencias recientes (Andreu et al., 2009a y 2009b), se demuestra que estas herramientas pueden ser la base para el desarrollo de sistemas soporte de decisión que proporcionan una visión del funcionamiento de la cuenca que puede ser compartida entre los distintos actores del proceso de planificación (gestores de la cuenca, administraciones, usuarios, organizaciones y público en general), ayudando al análisis participativo y transparente de los problemas de planificación, e incluso de la gestión y explotación del día a día, y de la gestión de las sequías, tan frecuentes en las cuencas mediterráneas españolas.

Pues bien, dentro de este marco de análisis y soluciones que integren las distintas fuentes de recursos, juega un destacado papel la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, tanto por los volúmenes de los flujos de agua que puede generar, como por incidir en el subconjunto de fuentes renovables por el ciclo hidrológico, las cuales están íntimamente relacionadas con el estado ecológico de las masas de agua continentales y costeras.

Definiciones y tipos de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas.

Las aguas superficiales y subterráneas son dos denominaciones que se han venido utilizando para designar dos formas de presentación del agua en las cuencas. Estas denominaciones también han adquirido un matiz inherente a la forma de obtención del agua, normalmente para un uso o propósito determinado. Así, se suele denominar agua superficial a aquella que fluye por los cauces, o reside en lagos y embalses, donde es susceptible de ser captada para los usos. Esto es así independientemente de que este agua pueda haber pasado una fase de infiltración en el subsuelo y de permanencia en acuíferos que eventualmente han drenado hacia un manantial o un cauce. Y se suele denominar agua subterránea a aquella que reside en un acuífero, y que para ser captada necesita de una actuación intrusiva en forma de pozo o galería drenante. Tan vinculadas están estas denominaciones al uso del agua y su origen, que se emplea también los términos recursos superficiales y recursos subterráneos.

Ya que nos encontramos en un foro eminentemente agrario, hay que decir que, normalmente, y salvo casos de no aptitud que se pueden dar en ambas formas, no existe ninguna propiedad física o química inherente a ninguna de las dos fuentes de agua que haga que estas sean mejores o peores para su aplicación en la agricultura, aunque en algunos debates lo pueda parecer. Normalmente, son otros factores del uso del agua (técnicos, económicos y organizativos, entre otros) los que hacen que se den ejemplos de aplicaciones eficientes o ineficientes, tanto desde el punto de vista técnico como económico, que pueden encontrarse en zonas de riego de cualquiera de los dos tipos de procedencia.

Dicho esto, es habitual resaltar en este tema, las propiedades características de cada una de las fuentes de recursos, entre las cuales se suelen citar más frecuentemente las que se

mencionan a continuación. La captación de recursos superficiales proporciona caudales importantes, requiere normalmente poca o ninguna energía, pero es preciso realizar grandes inversiones iniciales en obras de regulación (normalmente utilizadas para usos múltiples), derivación y conducción, produciéndose pérdidas por evaporación en los embalses; su variabilidad es mayor, y las masas de agua superficial son inicialmente más fáciles de contaminar. La captación de recursos subterráneos necesita normalmente de inversiones iniciales menos costosas, tanto para infraestructuras de captación como de transporte y distribución en algunos casos, pero requiere más energía para la extracción (excepto en galerías drenantes y pozos artesianos); normalmente, tampoco hay pérdidas por evaporación en los acuíferos (salvo casos especiales de niveles muy próximos a la superficie, capilaridad, y/o plantas freatofitas), suelen gozar de buena pureza biológica (lo que abarata su tratamiento para algunos usos) y su contaminación no es tan fácil, aunque su descontaminación puede ser muy difícil y costosa, y una eventual contaminación puede pasar mucho tiempo sin ser advertida.

Además, es preciso hacer énfasis en otros factores físicos determinantes en la práctica de la utilización conjunta. Una es la distinta velocidad de circulación del agua. Las aguas superficiales se mueven más rápido, y las aguas subterráneas, dependiendo de la conductividad hidráulica, se mueven con velocidades que son varios órdenes de magnitud inferiores. En unas se mide en unidades m/s y en otras de m/día. Y la otra es la existencia en muchas cuencas de acuíferos capaces de contener unos volúmenes de agua importantes, de orden comparable e incluso superior al del total de aportaciones superficiales de la cuenca en cuestión en un año, como se verá más adelante.

En situación natural, las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas son importantes en las cuencas mediterráneas españolas, pues es muy frecuente que una parte importante de las aguas superficiales provengan de drenaje de aguas subterráneas (acuíferos de cabecera e intermedios), constituyendo una regulación natural que se da en menor medida que en otras cuencas. También es frecuente que en las llanuras litorales sobre las que discurren las partes finales de los cauces, las aguas de los ríos se infiltren contribuyendo a alimentar al acuífero costero subyacente, si bien estas relaciones pueden ser más complejas, y dependen de la posición relativa del cauce y del nivel piezométrico de los acuíferos, de forma que dependiendo del tramo, el río puede ganar o perder agua. En muchos cauces efímeros la relación es prácticamente siempre de río perdedor, con lo que una fracción importante de los caudales acaba infiltrándose al acuífero.

Salvo algunos casos anecdóticos que se mencionan más adelante, hasta hace relativamente poco, las aguas superficiales y subterráneas se han utilizado de forma inconexa, produciendo efectos indeseados de diverso tipo. El uso intensivo de aguas superficiales ha originado subidas de niveles piezométricos que originan problemas de drenaje y de salinización de terrenos, disminución de recargas en tramos de río afectando a manantiales dependientes de esas filtraciones, y la necesidad de construir embalses de gran capacidad. El uso de aguas subterráneas ha ocasionado descensos de niveles piezométricos, con problemas de subsidencia en algunos casos, secado de manantiales, disminución de caudales drenados a los cauces superficiales (llegando en algunos casos a invertir la relación), afección a zonas húmedas dependientes del acuífero, e intrusión salina, entre otros.

El uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas se define a como la utilización de forma consciente y coordinada de ambas fuentes de recursos con el objetivo de obtener mejoras sobre el uso inconexo o descoordinado de las mismas. Con el uso conjunto se intenta aprovechar las características de cada una de las fuentes arriba mencionadas de la forma más ventajosa para los objetivos que se persiguen, que pueden ser varios, y entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

- aumento de disponibilidades,
- mejora de garantías en general, y frente a situaciones de sequía en particular,
- mejora de la calidad del agua,
- resolver problemas de drenaje,
- resolver problemas de subsidencia,
- resolver problemas de sobreexplotación,
- resolver problemas de intrusión salina,
- resolver problemas medioambientales,
- disminuir los costes globales de desarrollo y explotación.

Pero en la mayor parte de las aplicaciones reales de utilización conjunta, los mayores beneficios se derivan de aprovechar la capacidad de almacenamiento de los acuíferos, las interconexiones entre aguas superficiales y subterráneas, y las diferentes dinámicas de circulación del agua superficial y subterránea. Para ello, pueden distinguirse inicialmente tres tipos o esquemas básicos de utilización conjunta, aunque después, en cada uno se pueden dar variaciones, e incluso darse esquemas mixtos.

El primer tipo es conocido como recarga artificial, y consiste en la introducción en los acuíferos de aguas superficiales para su almacenamiento, o para mejorar su calidad, o para otros fines (lucha contra la subsidencia, o la intrusión marina en acuíferos), o para una combinación de ellos. Estas aguas pueden proceder de los ríos (normalmente de excedentes), o también de efluentes de plantas de estaciones de depuración de aguas residuales. Y el agua se puede incorporar al acuífero mediante inyección en pozos, infiltración en balsas ad-hoc, infiltración en canales, o en cauces permeables de ríos (con o sin escarificado de estos). En este último caso, se puede potenciar enormemente la infiltración si esta se produce en un embalse permeable, mientras que en los dos primeros casos puede ser necesario un tratamiento previo del agua para evitar colmatación rápida del dispositivo de infiltración. Cuando el agua procede de estación de depuración de aguas residuales, el tratamiento debe ser lo más avanzado posible, aún cuando en muchas ocasiones en que esto se hace es para aprovechar la capacidad depuradora del proceso de infiltración a través de la zona no saturada y del propio acuífero.

La recarga artificial es un esquema de utilización conjunta muy utilizado en el mundo, siendo de destacar en California (por los grandes volúmenes de agua movilizados), Israel, Alemania y Holanda. En estos dos últimos casos, se usa fundamentalmente como mecanismo purificador del agua

para abastecimiento urbano. Pero, como ponemos de relieve en Rivera et al. (2005) la recarga artificial directa es técnicamente compleja en instalación y operación, y requiere supervisión y observación permanente. Por ello, los costos son elevados y para su repercusión es necesario identificar a los beneficiarios, así como un alto grado de desarrollo institucional. Con estos condicionantes, puede no resultar factible en algunos lugares, como por ejemplo en países en desarrollo, ni para algunos fines, como por ejemplo regadíos que no tengan altos rendimientos económicos. En España existen esquemas de recarga artificial, como puede verse en el Libro Blanco del Agua en España (MMA, 2000), destacando la de los ríos Besós y Llobregat, en Barcelona, y las experiencias piloto del ITGE. Además, se está construyendo una instalación de recarga artificial utilizando excedentes invernales del río Belcaire, en Castellón. No obstante, el volumen total de agua actualmente movilizado por la práctica de recarga artificial apenas alcanza los 50 hm³/año en toda España, muy poco significativo en comparación con los volúmenes movilizados en otros tipos de utilización conjunta. Es por ello, que en el mencionado Libro Blanco se concluye que con la utilización de la recarga artificial no cabe esperar que se consiga un aumento significativo de recursos en el país, pero sí es posible resolver o paliar algunos problemas locales, mejorando su garantía de suministro. A pesar de lo dicho, existe una modalidad de recarga artificial pasiva que viene propiciada por el hecho de que ciertos ríos en alguna parte de su extensión, están colgados con respecto a algún acuífero subyacente, y además, el cauce está formado por materiales permeables (sobre todo en llanuras costeras), o discurre por zonas carstificadas, con lo cual se produce de forma natural una recarga del acuífero por filtraciones en el lecho del río. En muchas ocasiones, embalses construidos en estas zonas para regulación de los caudales, o para protección frente a avenidas, se convierten involuntariamente en dispositivos que aumentan esta recarga de forma permanente y artificial. En estos casos, como se mencionará más adelante para el sistema de la Plana de Castellón, el volumen recargado puede llegar a ser mucho más importante que el que se maneja en instalaciones realizadas expresamente para recarga artificial. Y en determinadas ocasiones esta práctica ya no es involuntaria, ni pasiva, sino que se pueden conducir excedentes invernales a cauces secos y permeables mediante los canales de riego, o diseñar expresamente embalses en terrenos cársticos para este fin, como el caso del embalse de Algar, que ha sido creado en el río Palancia con el doble propósito de protección frente a avenidas y recarga artificial del acuífero de la Plana de Sagunto.

Un segundo tipo de utilización conjunta es el uso alternativo, en el que se aprovecha también la capacidad de almacenamiento del acuífero, utilizando fundamentalmente agua superficial en épocas en que esta es abundante (épocas húmedas), y haciendo un mayor uso del agua subterránea en épocas en que el agua superficial es más escasa (épocas secas). El volumen almacenado en el acuífero experimenta importantes variaciones, alcanzando valores más altos en épocas húmedas, en que la extracción es menor y la recarga mayor, y descendiendo en épocas secas, en que la recarga es menor y las extracciones mayores. Dependiendo del sistema, estas variaciones pueden ser inter-anales (con mayor rango) o intra-anales (con menor rango), siendo muy habitual el primer caso en las cuencas mediterráneas. Este es un tipo de utilización conjunta relativamente sencillo, de tal forma que en muchos casos, ha surgido por iniciativa de los propios usuarios, con puntos de partida a veces diferentes. En unos casos, como por ejemplo en los riegos del Palancia, en la Plana de Sagunto, usuarios de aguas superficiales desarrollaron pozos, tan temprano como en el primer cuarto del siglo XX,

para aumentar su garantía cuando el agua superficial escaseaba, aprovechando que en las zonas bajas el nivel piezométrico del acuífero costero estaba poco profundo (J.A. Pérez Pallarés, 2009) y que era más fácil abrir pozos en esos lugares (no se disponía de los medios actuales de perforación y extracción). Se da el caso de que en este ejemplo, el beneficio no era solo para las tierras donde se encontraban los pozos, sino que se destinaba el agua procedente del río, en una parte a regar las tierras altas de la comunidad que no podían aprovecharse de las aguas subterráneas, y con el numerario percibido se procedía a extraer agua subterránea con la que regar los campos que sí que podían recibirla, y con ello se cambiaba un agua por otra. Pero la sequía de los años 80 y la intensa explotación del acuífero dieron lugar a fenómenos de intrusión salina en algunas zonas del mismo, llegándose a la conclusión de que era necesario un mejor diseño de la utilización conjunta, y se montó un sistema centralizado de distribución del agua superficial y de más de veinte captaciones de agua subterránea, clausurando pozos que podían producir intrusión salina. Esa experiencia demostró que la gestión conjunta de las aguas supone un ahorro considerable en volumen de agua utilizada, en energía consumida, en mejora del acuífero, en ahorro de costes de todo tipo, desde personal hasta mantenimiento de instalaciones, etc.; y que es uno de los mecanismos con los que en esa zona se puede hacer frente a las sequías.

En otras ocasiones, zonas de secano situadas en cotas más altas que los riegos tradicionales de aguas superficiales, fueron transformadas en zonas de riego mediante la perforación de pozos, fenómeno que se produjo fundamentalmente en el tercer cuarto del siglo XX, si bien se dan casos que comenzaron a fines del siglo XIX (Comunidad de Labradores de Villarreal, 1914). Y posteriormente, infraestructuras de regulación superficial permitieron disponer de recursos que eran utilizados en estas tierras, pero con garantías no muy altas, de forma que pasaron a ser zonas de riegos mixtos, en las que se usa mayormente agua superficial en épocas húmedas, recuperándose los niveles en el acuífero, y en épocas secas, al recibir poca agua superficial, se vuelven a utilizar los pozos que iniciaron el regadío. Este es el caso de los riegos mixtos del Mijares, en la Plana de Castellón, del Canal Camp de Turia, o del Canal Júcar-Turia. En el primer caso, el acuífero costero de la Plana experimenta variaciones en su almacenamiento cuyo rango puede llegar a ser del orden de 500 hm^3 , unas cuatro veces la capacidad conjunta de almacenamiento de los embalses superficiales del sistema, y las normas de explotación de la utilización conjunta fueron acordadas por los usuarios agrarios del Mijares en 1970 mediante el denominado "Convenio de bases para la ordenación de las aguas del río Mijares", aprobado por OM del MOP en 1973. Hay que mencionar que en este sistema, al estar el río colgado con respecto al acuífero en su parte baja, se produce también una recarga artificial inducida en los embalses de Sichar y de María Cristina, con caudales infiltrados del orden de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en cada uno de ellos, y también se juega con la infiltración en el tramo final del Mijares en la Plana de Castellón, de forma que esta se fomenta cuando hay excedentes, y se evita cuando el agua superficial escasea mediante la utilización de un canal revestido; y se induce recarga artificial en cauces y ramblas habitualmente secos, mediante el vertido en ellos de excedentes conducidos mediante los canales de riego. También aquí se tienen problemas de intrusión salina en los extremos norte y sur del acuífero costero, donde la explotación es intensa. Estos se pueden resolver mediante reordenación de extracciones, extensión de la zona de aplicación de aguas superficiales, y utilización de recursos no convencionales.

También se tienen casos de utilización alternativa, entre otros muchos, en la cuenca del Tajo, donde el sistema de abastecimiento del Canal de Isabel II a la zona metropolitana de Madrid tiene una capacidad de extracción de agua subterránea de aproximadamente 4 m³/s, con capacidad para movilizar unos 100 hm³/año, con objeto de aumentar la disponibilidad y garantía, sobre todo en épocas de sequía; en el Valle del Guadalentín, entre otras zonas de la cuenca del Segura; y en cuencas del Sur de Andalucía, como el sistema Adra-Campo de Dalías, el Bajo Guadalhorce, en Vélez, y en Motril.

Según distintos estudios llevados a cabo por organismos de la Administración en los últimos años, en casi todas las cuencas españolas es posible hacer uso del concepto de utilización alternativa en mayor o menor medida. Las posibilidades, en cualquier caso, dependen de las aportaciones superficiales y de su variabilidad, de la capacidad de los embalses, de la localización y de la cuantía de las demandas, de las características y posibilidades de los acuíferos, y de las relaciones de éstos con los ríos. Un caso destacable es el de la cuenca del Duero, donde según los estudios, la utilización conjunta puede proporcionar ahorros importantes en obras de regulación superficial, como se verá más adelante.

Un tercer tipo de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas es el que trata de aprovechar fundamentalmente la dinámica de la relación acuífero-río o acuífero-manantial. Extracciones realizadas en el acuífero en zonas alejadas del río en épocas en que los caudales superficiales son insuficientes suponen una disponibilidad mayor de recursos en ese momento, con una pequeña afección al caudal del río, difiriendo la mayor parte de esta en el tiempo hasta épocas en que no afecten a la disponibilidad y/o en que los caudales superficiales sean mayores y menos aprovechables. Por comparación con la utilización alternativa, estas prácticas requieren de un mejor conocimiento de las relaciones entre acuífero y río, y de un análisis más profundo de las estrategias de bombeo para garantizar su eficacia, como por ejemplo, los realizados en la cuenca del río South Platte, en el centro-oeste de los Estados Unidos (Andreu et al., 1982). Ejemplos de este tipo se dan en cuencas españolas, por ejemplo, en los acuíferos de la Vega Alta y Media del Segura para paliar los efectos de la sequía.

Además de los tres esquemas básicos de utilización conjunta presentados, otra tipología corresponde a la regulación de manantiales kársticos. En España se han regulado diversos manantiales kársticos mediante bombeos en el acuífero para complementar los caudales necesarios para satisfacer la demanda, y se han estudiado distintas posibilidades de esta técnica (véase, por ejemplo, Sanz Pérez, 1987; y MMA, 2000). Un buen ejemplo de esta tipología la constituye el sistema de recursos de la Marina Baja (Alicante). Este sistema consta de dos pequeños embalses (Guadalest y Amadorio) y de una unidad hidrogeológica carbonatada (Serrella-Aixorta-Algar), que dispone de dos campos de pozos de alta productividad, uno de ellos aguas arriba del embalse de Guadalest y el otro, que se utiliza para regular el manantial kárstico del Algar, que drena al acuífero del mismo nombre. Este sistema atiende una demanda de abastecimiento de unos 20 hm³ año y el riego de 3.200 ha. Aunque el sistema no está totalmente integrado como una unidad de gestión, sus principales demandas se sirven indistintamente de agua superficial, del manantial del Algar y de los pozos. También se utilizan aguas residuales depuradas para el riego de cultivos arbóreos. Este sistema, además de ser un ejemplo de regulación de un manantial kárstico, lo es también de utilización alternativa y ha servido para hacer frente a sequías importantes.

Análisis del uso conjunto.

Como se ha visto, la recarga artificial es ya de por sí compleja, y requiere de un estudio y análisis adecuado para su factibilidad, y el uso conjunto basado en la dinámica de las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas también precisa de un estudio y análisis para asegurar su efectividad. También se ha visto que las primeras etapas del uso conjunto alternativo pueden desarrollarse y producir beneficios sin requerir muchos estudios ni análisis profundos. Pero la experiencia demuestra que, en sistemas como los de las cuencas mediterráneas, con explotación intensiva de los recursos, aparecen problemas asociados a estas prácticas cuya solución requiere de estudios y análisis más profundos. Además, los estudios y el análisis pueden proporcionar formas de operar el uso conjunto que resulten mejores desde el punto de vista económico y medioambiental.

Por lo tanto, en el estadio de desarrollo en que se encuentran las mencionadas cuencas, es imprescindible analizar el uso conjunto en el marco del uso integrado de todas las fuentes del recurso, a la escala de cuenca, y con el objetivo de ordenar las demandas y las disponibilidades, proporcionando garantías de suministro adecuadas, con especial atención a las épocas de sequía, y de forma sostenible, tanto medioambientalmente, como económicamente. Y, además de proporcionar esquemas sostenibles de uso integrado, el análisis debe de proporcionar también, las normas de explotación que han de utilizarse como reglas para la operación del sistema en distintas situaciones, con énfasis en las situaciones de sequía, llegando incluso a definir el régimen económico del uso integrado en los casos en que este factor sea clave en su funcionamiento y factibilidad, como sucede en muchos casos, alguno de los cuales **se mencionará más adelante.**

Como ya se mencionó en la introducción, para realizar dicho análisis y obtener las soluciones y las normas de explotación en sistemas complejos se necesita el apoyo de herramientas y metodologías con suficiente base técnica y científica como para capturar de forma adecuada las interacciones entre los elementos del sistema, y así poder evaluar las implicaciones de las soluciones propuestas sobre los aspectos mencionados, proporcionando información sobre los intercambios que se producen entre unas soluciones y otras en términos de los objetivos de distinto tipo perseguidos en la gestión de las cuencas.

Estas herramientas y metodologías se vienen desarrollando desde hace casi medio siglo por lo que se refiere a las aguas superficiales y subterráneas, fundamentalmente en la forma de modelos matemáticos basados en ordenadores. Como consecuencia de esta actividad, existen buenos modelos, tanto de hidrología subterránea, como de hidrología superficial, que permiten estudiar y explicar el comportamiento de acuíferos y ríos (véase, por ejemplo, Varela, 1984, y Andreu, 1993). Pero es conveniente que su utilización sea integrada y orientada al análisis del uso conjunto, ya que de otra forma, los resultados obtenidos pueden carecer de significado. Concretamente, hay que resaltar las siguientes características del análisis a tener en cuenta:

- Aunque en etapas iniciales los estudios hidrogeológicos y los estudios hidrológicos superficiales puedan ser desarrollados por separado, es imprescindible que se lleve a

cabo una identificación conjunta del sistema acuífero-río que asegure que se contempla de forma adecuada la relación entre ambos sistemas. Para ello, es incluso conveniente realizar una modelación y calibración conjunta que, partiendo de los datos proporcionados por los modelos individuales, capture la relación entre aguas superficiales y aguas subterráneas. En el Departamento de Ingeniería Hidráulica y medio Ambiente (DIHMA), y en el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia se vienen desarrollando desde hace casi tres décadas modelos específicos orientados a este objetivo (Sahuquillo, 1983; Andreu, 1984; Andreu y Sahuquillo, 1987; Capilla y Andreu, 1996, D.Pulido-Velázquez et al., 2006) con distintos grados de detalle, en función de los datos disponibles. Esta modelación y calibración conjunta es especialmente importante en el caso de sistemas acuífero-río altamente modificados, como por ejemplo, en el caso del acuífero de la Mancha Oriental y su relación con el río Júcar.

- El análisis del uso conjunto ha de hacerse a la escala de cuenca. Por lo tanto, han de incluirse en un modelo integrador todos los elementos relevantes, como cauces naturales, embalses, demandas de distinto tipo, acuíferos, y otras fuentes de recursos, y contemplar de forma adecuada las interacciones entre todos estos elementos. Esto hace necesario incluir en este modelo integrador varios submodelos, lo cual refuerza el argumento en el apartado anterior sobre la conveniencia de utilizar modelos específicos que capturan bien las interacciones y que tienen mayor eficiencia computacional que los modelos que suelen usarse para las modelaciones individuales de gran detalle.
- Como se ha visto anteriormente, en el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas (y en el uso integrado de todas las fuentes de recursos hídricos), la gestión juega un papel decisivo. Por tanto, el modelo integrador utilizado para el análisis debe ser capaz de incorporar prioridades y reglas de gestión que contemplen el uso conjunto, y determinen cuando se hace uso de cada fuente de recursos, y en qué cantidad, y que demandas las utilizan. Hay que mencionar, además, que las reglas de gestión que se utilicen en el modelo deben de ser realísticas, y corresponderse con las normas de explotación a aplicar en la vida real, las cuales deben de ser factibles, pues está comprobado que factores económicos, sociales, culturales, o de otros tipos, pueden hacer inaplicables normas de explotación que inicialmente parecen óptimas.
- Para un completo análisis, y para el ajuste del sistema y sus reglas de explotación óptimas, está demostrado que se deben de simular y analizar un gran número de alternativas y escenarios, lo que puede producir un gran número de simulaciones, del orden de varios centenares en algunos casos. Y es muy normal también que por distintos motivos, esas simulaciones tengan que repetirse para introducir actualizaciones de algunos de los datos que se producen a lo largo del estudio, con lo cual el orden del número de simulaciones realmente efectuadas puede acabar siendo en torno al millar. Es por tanto de extrema importancia que las herramientas de simulación y análisis sean lo más eficientes posibles, para facilitar el desarrollo del estudio en un tiempo razonable.

Todos estos motivos hacen que las herramientas que se utilicen en los estudios deben ser herramientas que hayan sido desarrolladas teniendo en cuenta las mencionadas características del análisis de la utilización conjunta.

Si bien desde hace muchos años existen modelos pensados para la simulación de la gestión de recursos hídricos a escala de cuenca (véase Sigvaldason, 1976, y Martin, 1982), estos se centraban casi exclusivamente en las aguas superficiales, considerando a los acuíferos como simples depósitos, a lo sumo. La necesidad de herramientas específicas para el análisis del uso conjunto en las cuencas españolas ya dio lugar al desarrollo en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) de un modelo general para análisis preliminar del uso conjunto a escala de cuenca denominado USOCON (Andreu y Marco, 1983), que permitía incluir en el modelo a escala de cuenca varios modelos de acuíferos con énfasis en la relación río-acuífero (además de los elementos superficiales, como ríos y embalses), así como reglas de gestión para el uso conjunto, y que fue aplicado al análisis del uso conjunto en varias cuencas para estudios del Servicio Geológico de Obras Públicas (véase, por ejemplo, Marco y Andreu, 1983). Pero, probablemente, el modelo general más completo en la actualidad para el análisis de la gestión conjunta es el modelo SIMGES, desarrollado también en la UPV en 1989, con una amplia variedad de elementos disponibles para la definición del modelo de gestión de un sistema de recursos hídricos, tanto en lo que se refiere a fuentes del recurso, como a requerimientos ambientales, demandas de distinto tipo, conducciones, e instalaciones de recarga artificial (véase Andreu et al., 1992). Por lo que se refiere a los acuíferos, SIMGES permite su representación mediante varios tipos de modelos, que van desde sencillos modelos agregados, tipo depósito, o unicelulares, a sofisticados modelos distribuidos resueltos mediante el método de los autovalores anteriormente mencionado, con especial énfasis en la relación río-acuífero. Las posibilidades para definición de reglas de gestión están también adaptadas al uso conjunto, permitiendo la definición de curvas de zonado de embalses superficiales, o de reservas conjuntas en varios de ellos que sean gestionados de forma unificada, que sirven como umbrales para la activación de distintas políticas de uso conjunto, no solo de aguas superficiales y subterráneas, sino también de recursos convencionales y recursos alternativos. Mediante SIMGES se pueden estudiar las posibilidades de uso conjunto, así como las garantías de las demandas del sistema, y de los requerimientos ambientales, siendo útil también para el dimensionamiento adecuado de las infraestructuras del sistema y la definición de las reglas de gestión óptimas. SIMGES fue utilizado de forma intensiva en la cuenca del Segura en 1989, juntamente con el modelo de optimización OPTIGES, desarrollado en 1987 (véase Andreu, 1992), y posteriormente en cuencas de la CH del Júcar.

Demostrada la utilidad de ambos modelos, se desarrolló un entorno para la elaboración de Sistemas Soporte de Decisión en materia de Planificación y Gestión Integradas de Recursos Hídricos. Esta herramienta, denominada AQUATOOL, se concibió para facilitar la utilización de los mencionados modelos, con interfaces gráficas para el diseño del esquema del sistema de recursos hídricos, la creación y mantenimiento de las bases de datos que alimentan los modelos, y el análisis de resultados mediante tablas y gráficos de variables y de indicadores (Andreu et al., 1994). La herramienta AQUATOOL ha seguido ampliándose y desarrollándose desde entonces, introduciendo módulos para el análisis de riesgos de sequía y su gestión (Andreu et al., 1996), para el análisis económico (Andreu et al., 2004), para la simulación de la calidad del agua (Paredes et al., 2006), y para análisis de requerimientos ambientales (Paredes

et al., 2009), y adaptándose a las necesidades de aplicación que han ido surgiendo, como por ejemplo, para estudios enmarcados en la aplicación de la DMA (Solera et al., 2007). En todo este tiempo, AQUATOOL ha sido utilizado para el desarrollo de SSD para la planificación y gestión integrada de recursos hídricos en la mayor parte de las cuencas españolas, y en la mayor parte de estas aplicaciones existe una componente, más o menos fuerte, de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Por estar más específicamente enfocadas al análisis de la utilización conjunta se pueden mencionar las aplicaciones en el estudio de la utilización conjunta de los recursos superficiales y subterráneos de las cuencas de los ríos Cega-Pirón y Adaja-Eresma, en la cuenca del Duero (IGME, 2001), donde se obtienen aumentos de garantías en demandas tanto superficiales como subterráneas, e importantes reducciones de las dimensiones de embalses superficiales en proyecto, y se analizan las posibilidades y costes de recarga artificial; en el estudio para la determinación del Plan de Ordenación del Campo de Dalías (CHS, 2001), donde se analiza el uso conjunto en la cuenca del Adra, en Almería, así como la posibilidad que proporciona de paliar la sobreexplotación del vecino acuífero del Campo de Dalías, y la intrusión marina en algunos de sus sectores (Pulido et al., 2001); en el análisis de la cuenca del Guadalfeo (Granada), estimando las posibilidades de satisfacer, mediante un uso óptimo de los recursos globalmente excedentarios de la cuenca, además de las demandas internas, las de zonas adyacentes deficitarias mediante posibles trasvases e investigar sobre las políticas más adecuadas para la explotación del embalse de Béznar, y las de éste en coordinación con el de Rules y con los propuestos de Otívar (en el río Verde de Almuñécar) y Trevélez, considerando conjuntamente el uso de los acuíferos de la zona (Pulido et al., 1999); y en el estudio de uso conjunto llevado a cabo en el sistema constituido por los embalses de Quebrajano y Víboras, en la provincia de Jaén, y 15 acuíferos, que suministra agua potable a una población que se aproxima a las 221.000 personas y permite el riego de unas 4.100 ha (Murillo y Navarro, 2008).

El uso conjunto en la gestión de sequías.

A pesar de que ya se ha mencionado en la descripción del uso alternativo que en este enfoque es durante las sequías cuando mayor uso de agua subterránea se realiza, creemos necesario enfatizar este punto por la gran importancia que tiene en la mitigación de sequías en las cuencas mediterráneas españolas. Para ello, mencionaremos que en la gestión de la sequía que tuvo lugar durante los años hidrológicos 2004/05 a 2007/08 en la cuenca del Júcar, se estima que se movilizaron en los años más críticos, del orden de 35 hm³ adicionales sobre lo normal de extracciones en pozos privados, y del orden de 40 hm³ adicionales mediante pozos de sequía instalados en las inmediaciones de las principales canalizaciones de riego, como el Canal Júcar-Turía y las acequias de los riegos tradicionales de la Ribera del Júcar. La parte de extracciones realizadas en los pozos de sequía de la zona de la Ribera se realizaron en el marco de un esquema económico en el que los usuarios de esta zona ceden parte de sus reservas de aguas superficiales a otros usuarios (fundamentalmente urbanos), y a cambio, estos compensan por los costes de extracción a los primeros. También es importante destacar que durante esos años, además de recursos superficiales y subterráneos, se movilizaron recursos no convencionales consistentes en dos tipos de reutilización: la de drenajes de los arrozales en la Ribera del Júcar (denominados “rebombes”), hasta 90 hm³/año (también con costes

compensados por otros usuarios a quienes cedieron parte de sus reservas de agua superficial), y la reutilización de hasta 94 hm³/año de aguas residuales depuradas del área metropolitana de Valencia, y que se permutaron parcialmente por aguas superficiales correspondientes a usuarios tradicionales en la Vega del Turia, usadas por el abastecimiento del Área Metropolitana, liberando así recursos del Júcar.

Así pues, la gestión realizada, que permitió superar la sequía más intensa del registro histórico, consistió en un uso conjunto, no solo de recursos superficiales y subterráneos, sino de todas las fuentes de recursos disponibles, incluyendo una gestión conjunta de las cuencas de los ríos Júcar y Turia. El diseño de las soluciones y estrategias empleadas se basó también en el uso de los sistemas soportes de decisión mencionados anteriormente, que contribuyó, además, a una mejor comprensión de las alternativas por parte de todos los involucrados (Andreu et al., 2009). Otro aspecto a destacar fue el del gran esfuerzo de seguimiento del estado del sistema, tanto superficial como subterráneo, y tanto en términos cuantitativos (caudales, niveles piezométricos, etc.), como de calidad de aguas.

Conclusiones

La intensa utilización de recursos hídricos en la mayor parte de las cuencas mediterráneas españolas, con escasez de recursos y propensión a largas sequías, hace necesario desarrollar unas políticas de agua mediante una planificación y una gestión de las cuencas que, además de actuar sobre la demanda para su racionalización, se consideren de forma integrada todos los tipos de fuentes de recursos, convencionales y no convencionales, aprovechando las características de cada una de forma lo más optimizada posible. Dentro de este enfoque tiene un destacado papel la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, tanto por los volúmenes de los flujos de agua que puede generar, como por incidir en el subconjunto de fuentes renovables por el ciclo hidrológico y que están íntimamente relacionadas con el estado ecológico de las masas de agua continentales y costeras.

Se han revisado los distintos tipos de esquemas de utilización conjunta, poniendo de relieve que en las cuencas españolas, el esquema que más posibilidades de aplicación tiene para producir disponibilidades adicionales y mejoras de garantías es la utilización alternativa de aguas superficiales y subterráneas. Así mismo, se han revisado las herramientas y metodologías para el análisis, y las características de este para que las soluciones obtenidas sean coherentes con el sistema real.

Se hace énfasis en que la utilización conjunta tiene una componente muy fuerte de gestión, y que esta gestión debe ser optimizada si se quieren obtener todas las ventajas que puede proporcionar, minimizando los efectos adversos que pueden derivarse de una práctica mal diseñada.

Es de destacar el importante papel de los usuarios en la factibilidad, gestión, organización y seguimiento de la utilización conjunta, así como la necesidad de mejorar los mecanismos de control de los flujos de agua en los sistemas de recursos hídricos y del estado de los acuíferos, y la continua monitorización de los mismos.

Aunque no se ha abordado en la ponencia por limitación de la misma, hay al menos un aspecto importante adicional a considerar en el uso conjunto, y es el aspecto económico. Como ya se ha mencionado, existen herramientas con capacidad para ese análisis, y con la ayuda de estas, o de otras no mencionadas, es necesario incluir esta faceta en el diseño de esquemas de uso conjunto (Pulido et al., 2004).

Finalmente, se aboga desde aquí por un esfuerzo permanente para incrementar y mejorar las prácticas de uso conjunto, no solo de aguas superficiales y subterráneas, sino de todas las fuentes disponibles de recursos, por las enormes ventajas de todo tipo que proporciona esta práctica de gestión integral, no solamente en la gestión en situaciones normales, sino especialmente en situaciones de sequía, y ante escenarios futuros que puedan presentarse como consecuencia de variaciones climáticas.

Referencias

Andreu, J. (1984). Aplicación del método de los autovalores al análisis de sistemas con uso conjunto de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, Tesis Doctoral, U. Politécnica de Valencia.

Andreu, J. (1992). Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos. ISBN 84-7721-191-4. Editorial: SPUPV, Valencia.

Andreu, J., editor (1993). Conceptos y Métodos para la Planificación Hidrológica. Editorial: C.I.M.N.E., Barcelona. ISBN: 84-87867-19-7.

Andreu, J. y J. Marco (1983). "El modelo USOCON de simulación de utilización conjunta de una cuenca", en Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas, Editado por M. Varela, D.L.: M.15.792-1983, Editorial: SGOP del MOPU y UPV, Cap. C-2.

Andreu, J., J. W. Labadie, and A. W. Burns (1982), "Optimal stream-aquifer system management", in Water and Energy: Technical and Policy Issues, edit. by F. Kilpatrick and D. Matchettedit, A.S.C.E., ISBN 0-87262-308-4, pp. 578-586.

Andreu, J. and Sahuquillo, A. (1987). Efficient aquifer simulation in complex systems, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 113, no. 1, pp. 110-129.

Andreu, J., J. Capilla y J. Ferrer (1992). Modelo de Simulación de Cuencas SIMGES. Manual del Usuario. ISBN 84-7721-169-8. Editorial: SPUPV, Valencia.

Andreu, J., J. Capilla, y F. Cabezas, "Los sistemas soportes de decisión en la planificación y gestión racionales de los recursos hídricos", en Ingeniería del Agua, vol. 1, núm. 2, pp.7-20, 1994.

Andreu, J, Capilla, J. and Sanchis, E. (1996). Generalized decision support systems for water resources planning and management including conjunctive water use. Journal of Hydrology, vol. 117 pp 269-291.

Andreu, J., M. Pulido Velázquez, G. Collazos y M.A. Pérez, (2004). "Metodologías y herramientas para el análisis económico de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la DMA", en IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Tortosa (España), 8-12 Dic. Publicado en actas del congreso.

Andreu, J., J. Ferrer-Polo, M. A. Pérez, and A. Solera (2009). "Decision Support System for Drought Planning and Management in the Jucar River Basin, Spain". In R.S. Anderssen et al. (eds), 18th IMACS World Congress - MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. ISBN: 978-0-9758400-7-8, pp. 3223-3229.

Capilla, J., and J. Andreu, (1996). "AQUIVAL: a GUI for groundwater modelling incorporated into the simulation of complex water resources systems", in Hydraulic Engineering Software, ed. by W.R. Blain, Computational Mechanics Publications, pp.71-80.

CHS (2001). "Plan de Ordenación del Campo de Dalías. Almería". Confederación Hidrográfica del Sur.

Comunidad de Labradores de Villarreal, 1914. Memoria demostrativa de sus servicios y de su labor agro-social: Años 1899-1913. (Edición facsímil de 1994). Temes Vila-realencs, Serie Técnica, no. 5. Publicaciones de Ilmo. Ayto. de Villarreal.

IGME (2001). "Estudio de la gestión conjunta de los recursos superficiales y subterráneos de las cuencas de los ríos Cega-Pirón y Adaja-Eresma, en la cuenca del Duero". Instituto Geológico y Minero de España.

Murillo Díaz, J.M.; Navarro Iáñez, J.A. (2008) "Las aguas subterráneas en la investigación y la gestión hídrica medioambiental. Uso conjunto y caudal ambiental. Aplicación al sistema de aprovechamiento del Quebrajano-Víboras". Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 978-84-7840-767-5. 236 pág.

Martin, Q.W. (1982). Multireservoir Simulation and Optimization Model SIM-V: Program Documentation and Users Manual", Rep. UM-38, Texas Depart. of Water Resources, Austin, Texas, USA.

Paredes, J., J. Andreu, M.A. Martín, y A. Solera (2006). Modelación de la Calidad del Agua a escala de cuenca. ISBN: 84-9705-952-2, 81 pág., Editorial: Universidad Politécnica de Valencia.

Pérez Pallarés, J.A., Comunicación personal de las Notas para ponencia presentada en mesa redonda de la Jornada del Agua, organizada por AVA-ASAJA, Valencia, 22 de Abril de 2009.

Pulido, M., J. Andreu, M. A. Gutiérrez, A. Solera, y S. Sánchez (1999). "Análisis de la gestión de grandes presas en el marco de sistemas complejos de recursos hídricos", en VI Jornadas Españolas de Presas (Comité Nacional Español de Grandes Presas, CNEGP). Publicado en actas del congreso.

Pulido, M., J. Andreu, A. Sahuquillo, V. Pinilla, A. Sánchez, J. Capilla, y J. Paredes (2001). "Modelo de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos del sistema Adra-Campo de Dalías", en V Simposio sobre el Agua en Andalucía (SIAGA), Almería, 25-28 Septiembre. V Simposio sobre el Agua en Andalucía. Actas (ISBN: 84-8240-460-1) pág. 265-277.

Pulido, M., J. Andreu y G. Collazos (2004). "Optimización económica del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en sistemas de recursos hídricos", en IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Tortosa, España. Publicado en actas (ISBN: 84-68900524)

Pulido-Velazquez, D., A. Sahuquillo and J. Andreu (2006). "A two-step explicit solution of Boussinesq Equation for efficient simulation of unconfined aquifers in Conjunctive Use models", *Water Resources Research*, 42, W05423, DOI:10.1029/2005WR004473, 25/05/2006

Rivera, A., A. Sahuquillo, J. Andreu, and A. Mukherji (2005), "Opportunities of conjunctive use of ground and surface waters", in *Groundwater Intensive Use: Selected Papers*, Sinex, Valencia, Spain 10-14 December 2002, edited by A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martinez-Cortina, and X. Sánchez-Vila. ISBN: 0415364442 ISBN-13: 780415364447, 978-0415364447, Taylor & Francis Group , pp. 385-393.

Sahuquillo, A. (1983). "An eigenvalue numerical technique for solving unsteady linear groundwater models continuously in time". *Water Resources Research*, 19(1), pp. 87-93.

Sanz Pérez, E. (1987). "La regulación de los manantiales y su incidencia en España". *Boletín geológico y minero*, ISSN 0366-0176, Vol. 98, Nº 6, pags. 105-132.

Sigvaldason, O.T. (1976). A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 263-277.

Solera, A., J. Paredes, y J. Andreu (2007). *AquatooldMA, SSD para planificación de cuencas. Manual de usuario v1.0*. ISBN: 978-84-8363-171-3, 123 pág., Ed. Universidad Politécnica de Valencia.

Varela, M., editor (1983). *Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas*. Editorial: SGOP del MOPU y UPV. Dep.Leg.: M.15.792-1983.