

## LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

(coste/uso intensivo/almacenamiento subterráneo/uso conjunto/protección acuíferos)

ANDRÉS SAHUQUILLO HERRÁIZ \*

\* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (A. Correspondiente). Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. C de Vera s/n 46080 VALENCIA. Fax 96-3877618. E-mail asahuq@hma.upv.es.

### RESUMEN

El agua subterránea es barata, fácilmente accesible y vital para un tercio de los riegos y el abastecimiento de la población mundial. En los últimos decenios del siglo pasado ha aumentado su utilización de forma espectacular. Este crecimiento se ha efectuado por los agricultores de países pobres en zonas áridas y semi-áridas sin ayuda técnica y económica de los gobiernos y ha sido muy eficaz para el alivio de la pobreza. La causa principal para que se produzca este hecho es que el coste del agua subterránea es pequeño comparado con el desarrollo de embalses y canales, puede utilizarse en las proximidades del punto de extracción, y además supone un seguro contra las sequías al tener la mayoría de los acuíferos un almacenamiento de agua decenas o centenares de veces superior a su alimentación media anual.

En algunos casos de explotación intensa se han producido descensos importantes de los niveles de agua, disminución de caudales de ríos y manantiales, secado de humedales, intrusión marina o subsidencia del terreno. Por su interrelación las aguas superficiales y las subterráneas se afectan mutuamente y se deben analizar como un recurso único, potencial que aun esta lejos de utilizarse. Además de utilizar sus recursos, los acuíferos pueden utilizarse como grandes embalses subterráneos para almacenar agua superficial o de otra procedencia. La *utilización conjunta* de aguas superficiales y subterráneas puede hacerse utilizando la *recarga artificial* o con el *uso conjunto alternante*. En este último se usa más agua superficial en periodos

húmedos y más agua subterránea en los secos. Así sin aumentar el almacenamiento superficial estos esquemas aprovechan más agua superficial a través del volumen proporcionado por las oscilaciones de nivel en los acuíferos.

Los análisis preliminares realizados en California indican que es posible amortiguar los efectos del cambio climático a un coste razonable, debido a la gran interconexión existente en el sistema, haciendo una utilización aun más intensa del almacenamiento subterráneo, mejorando la operación del sistema, la eficiencia de riegos y usos urbanos y haciendo uso de los mercados de agua.

A pesar de las posibilidades que permiten las aguas subterráneas y existir tecnología para analizarlas, las aguas subterráneas no se consideran adecuadamente en las administraciones hidráulicas de muchos países como el nuestro. Además muchos no tienen suficientes hidrogeólogos, y tienen carencias serias en la protección contra la contaminación.

### ABSTRACT

Groundwater is cheap, easy to develop and essential for one third of human water supply and world irrigation needs. Its use has grown spectacularly during the last decades. This development has been performed by poor farmers in arid and semiarid areas without technical and economic help of governments and has been very effective to alleviate poverty. The

main incentive for this change is the usually low cost from groundwater as compared with the cost of water from dams and canals. Additionally water can be used close to the wells, and finally ground water storage is used as an insurance against droughts, its stored volume being tens or hundreds larger than their average annual recharge.

In some cases intense groundwater pumping has produced important depletion in water levels, decrease of stream flows and springs, interference or drying of wetlands, seawater intrusion or land subsidence. As surface water and ground water are connected, and their use interferes with one another, they must be analyzed and used jointly, which is far from being usual. In addition to their water resources, aquifers can be used as big subsurface dams to store either surface water or water from other sources. Conjunctive use of groundwater and surface water can be made through artificial recharge or through alternate conjunctive use. In the latter, groundwater is generally used by preference over surface water during dry periods. Conversely, its use decreases and that of surface water increases during wet climatic cycles when more water is flowing in rivers and stored in reservoirs. So without increasing surface storage, alternate conjunctive schemes use more surface water through the subsurface storage induced by water level oscillations.

Preliminary analysis made in California mark the possibility of alleviate the effects of climate change in water systems making a more intense use of aquifer storage, improving the system operation, irrigation and urban water supply efficiency and water markets. In spite of the possibilities that aquifers offer and the availability of technology, groundwater is not adequately considered by the Hydraulic Agencies in most countries. Additionally they lack professionals with adequate hydrogeological training and they hold serious deficits in protection against contamination.

## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso natural muy valioso que es un componente esencial del Ciclo Hidrológico. La contribución de agua de los acuíferos al flujo de los ríos es responsable de que el río siga teniendo caudal cuando no hay precipitaciones. El

porcentaje de la aportación del caudal base con respecto al total del río es muy variable dependiendo de la geología y el clima, pudiendo variar desde casi cero a ser próximo al 100% en cuencas muy permeables. Como promedio, en la zona continental de los EE.UU., es del orden del 40% (Wolock 2003). En España se ha estimado en un 30% (MMA 2.000). El agua subterránea cumple una función ambiental en la naturaleza por su contribución a los caudales de ríos, manantiales, lagos, humedales y estuarios, tiene un papel importante en muchos procesos geológicos, y es un solvente activo por lo que el flujo subterráneo actúa como vehículo en el transporte de contaminantes o en el control de la intrusión de aguas salinas. (Custodio 2001, Younger 2007).

Las aguas subterráneas se han aprovechado desde la antigüedad para abastecimiento de poblaciones y para riego. La mejora de las técnicas de perforación de pozos y la introducción de la bomba sumergida ha originado un aumento importante de la utilización de las aguas subterráneas. En los últimos decenios el aumento ha sido espectacular, especialmente para el riego en las regiones áridas y semiáridas. En algunos casos la explotación intensa de los acuíferos ha producido descensos importantes de los niveles de agua, descensos de los caudales de ríos y manantiales, ha afectado a humedales y ecosistemas, o ha producido degradación de la calidad del agua o intrusión marina en acuíferos costeros.

Las aguas subterráneas se pueden valorar, aprovechar y controlar como cualquier recurso natural y su conocimiento no presenta dificultades superiores a las de las superficiales, aunque son distintos los principios y las técnicas, y existen modelos de flujo subterráneo y transporte de contaminantes de libre disponibilidad que se utilizan rutinariamente para analizar el comportamiento de los acuíferos y sus relaciones con otros componentes del ciclo hidrológico, ríos, lagos, atmósfera y zona no saturada. El progreso en el conocimiento científico también ha sido importante en estos últimos decenios. El número de artículos sobre temas de hidrología subterránea, contaminación de aguas subterráneas y gestión de acuíferos en las revistas de mayor prestigio científico y técnico es análogo en los últimos decenios a las de aguas superficiales y otras disciplinas hidrológicas. En la revista de Hidrología que se considera por muchos la de mayor

prestigio, en el periodo 1988-1992, se publicaron 438 artículos sobre Hidrología Subterránea, más del doble que las del periodo 1978-1982 y también superaron en número a las dedicadas a Hidrología Superficial, que fueron 392 (Sorooshian 1993).

## EL AUMENTO DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Históricamente la utilización de aguas subterráneas ha sido un factor clave para el desarrollo de muchas ciudades. Algunas de las más pobladas del mundo se abastecen mayoritariamente con aguas subterráneas. Entre ellas están México, Calcuta, Shangai, Buenos Aires, Dhaka, Manila, Pekín, París y Londres, y más de 4 millones de neoyorquinos se suministran del acuífero que hay a sus pies en Long Island. España es uno de los países europeos donde el porcentaje de utilización de aguas subterráneas para usos urbanos es más bajo, solo alcanza a un 30% de la población, siendo habitual en los europeos superar el 70%, es casi el 100% en Dinamarca, y supera al 50% en los Estados Unidos (Hutson et al 2004). En EE.UU. la utilización relativa de aguas subterráneas para riego ha ido creciendo de forma continua, desde el 23% del total en 1950 hasta el 42% en el 2000. Este porcentaje supera el 50% en la mayoría de los estados del Oeste. La extracción total de agua subterránea para todos los usos en 2000 fue de 115 km<sup>3</sup>; un 14% más que en 1985. El bombeo actual de aguas subterráneas en España para todos los usos es del orden de 6,5 km<sup>3</sup>. El aumento de la perforación de pozos para riego se produjo en nuestro país en la década de los 70 del siglo XX. En la actualidad con aguas subterráneas se riegan alrededor de un millón de hectáreas, casi el 30% de toda la superficie regada, a las que se aplica el 20% del total del volumen utilizado para riego. Aunque hay que decir que como también ocurre con la utilización de aguas superficiales, en nuestro país estas cifras se conocen con poca precisión.

En el Sureste de Asia, el norte de China, Méjico y en casi todas las regiones áridas y semiáridas del mundo se ha producido en las tres últimas décadas un aumento exponencial del riego con aguas subterráneas, en un proceso que Llamas (2004) denomina como *revolución silenciosa* por haberse realizado por millones de agricultores pobres de esos países, que han per-

forado millones de pozos, sin apenas control ni ayuda técnica de las agencias de agua, ni subvenciones del estado o de organismos estatales. Pozos de los que estima que es probable se extraigan entre 700 y 1000 km<sup>3</sup>/año de agua. La causa principal para que se produzca este hecho es que el coste de la explotación de las aguas subterráneas es relativamente pequeño.

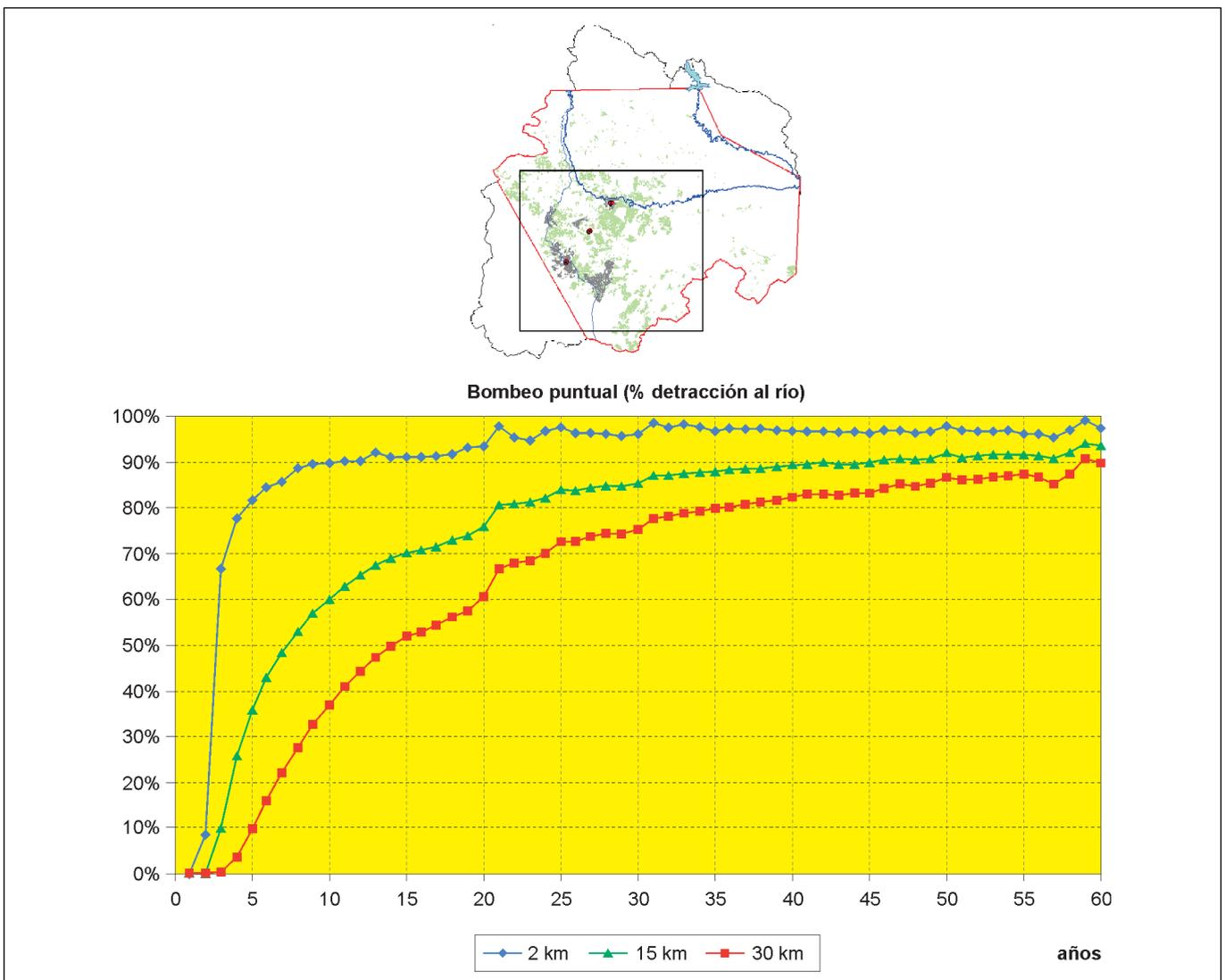
## LA RELACIÓN ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

Los recursos de agua dulce del planeta constituyen solo una pequeña porción del ciclo hidrológico y están alimentados por la precipitación en forma de lluvia y nieve. Parte de esta agua fluye por la superficie del terreno y se recoge en canales y cauces de distinto tamaño y orden hasta circular por los cauces permanentes. Es lo que se denomina *escorrentía superficial*. Una fracción de la lluvia se infiltra en el terreno de la que una parte normalmente muy importante se evapora o es transpirada por las plantas y vuelve a la atmósfera como evaporación y transpiración. La que escapa a lo que se denomina *evapotranspiración* llega a recargar los *acuíferos*. El agua recargada a los acuíferos descarga a su vez en los ríos, lagos, manantiales o zonas húmedas, aunque en zonas costeras puede desaguar en todo o en parte directamente al mar. La descarga de agua subterránea a los ríos o *flujo base*, proporciona el caudal que mantiene en periodos secos un flujo permanente en nuestros ríos. En zonas áridas o semiáridas no solo es menor la *escorrentía superficial*, también la recarga de los acuíferos es mucho más reducida que en las zonas húmedas o templadas y los niveles de agua en los acuíferos son más bajos que en los de zonas húmedas. Por eso la densidad de cauces con caudal permanente es mucho menor. Los tramos en los que los niveles freáticos de los acuíferos están por debajo del cauce son perdedores en vez de ganadores y esto se acentúa más en las regiones más secas, cuando la topografía es más acusada y los terrenos tienen mayor permeabilidad. Muchos ríos tienen a la vez tramos ganadores y tramos perdedores. Además, como los niveles de agua en el acuífero cambian estacionalmente con la recarga y la descarga, el intercambio de flujo entre río y acuífero y la situación de los tramos de río ganadores o perdedores puede cambiar. Incluso los acuíferos en cuencas de ríos efímeros que están habitualmente secos, excepto

después de tormentas fuertes, y con el nivel freático muy por debajo del cauce pueden tener algún tramo conectado por el que desaguan.

La cantidad de agua de la escorrentía superficial más la recarga de los acuíferos se puede considerar equivalente a la lluvia menos la evapotranspiración. La evapotranspiración es en general el componente más importante del balance hídrico después de la precipitación. En toda la superficie de EE.UU. se ha estimado en el 67%, (Reilly et al, 2008). En España también es alrededor de los dos tercios de la lluvia, siendo menor en las cuencas húmedas del Norte de España y sensiblemente mayor, del 90% ó el 95%, en las zonas más áridas en las que la recarga distribuida

solo ocurre esporádicamente después de precipitaciones extremas. La evapotranspiración es difícil, o imposible de medir y sólo se puede estimar con una incertidumbre grande. En EE.UU. se ha determinado para todo el país el *índice de caudal base*, con técnicas de separación de hidrogramas, con la hipótesis de que la recarga natural media de los acuíferos en un periodo largo es igual a la descarga natural media a los ríos. Con esto se obtiene una pintura global, pero no se caracteriza la variabilidad espacial y temporal de la recarga. En las zonas en las que los ríos están regulados o existen derivaciones o retornos de riegos, las hipótesis básicas pueden no cumplirse (Wollock 2003). En las zonas húmedas la descarga más importante de los acuíferos es el caudal base. En zonas áridas



**Figura 1.** Detracción del caudal del río Júcar por el bombeo de pozos a distintas distancias del cauce, (Font 2004).

puede haber un flujo subterráneo muy pequeño a los ríos si existe una evapotranspiración importante desde el acuífero cuando los niveles freáticos están próximos a la superficie, (Healy et al). En muchas zonas áridas el bombeo para riego y usos domésticos constituye la parte mayor de las descargas.

En España se ha utilizado el modelo distribuido SIMPA para determinar las series de aportaciones de los cauces más importantes en toda la España peninsular (MMA 2000) en puntos no aforados. Se consideraron los resultados intermedios para determinar la recarga de los acuíferos pero en opinión del autor de este trabajo solo representan una primera aproximación que hay que tomar con reservas al no haberse realizado la calibración para los caudales base. Alcalá y Custodio (2007) aplican para toda España el balance de cloruros teniendo en cuenta los aportados por la lluvia y la deposición seca en suelo y su concentración en el agua subterránea para determinar la recarga.

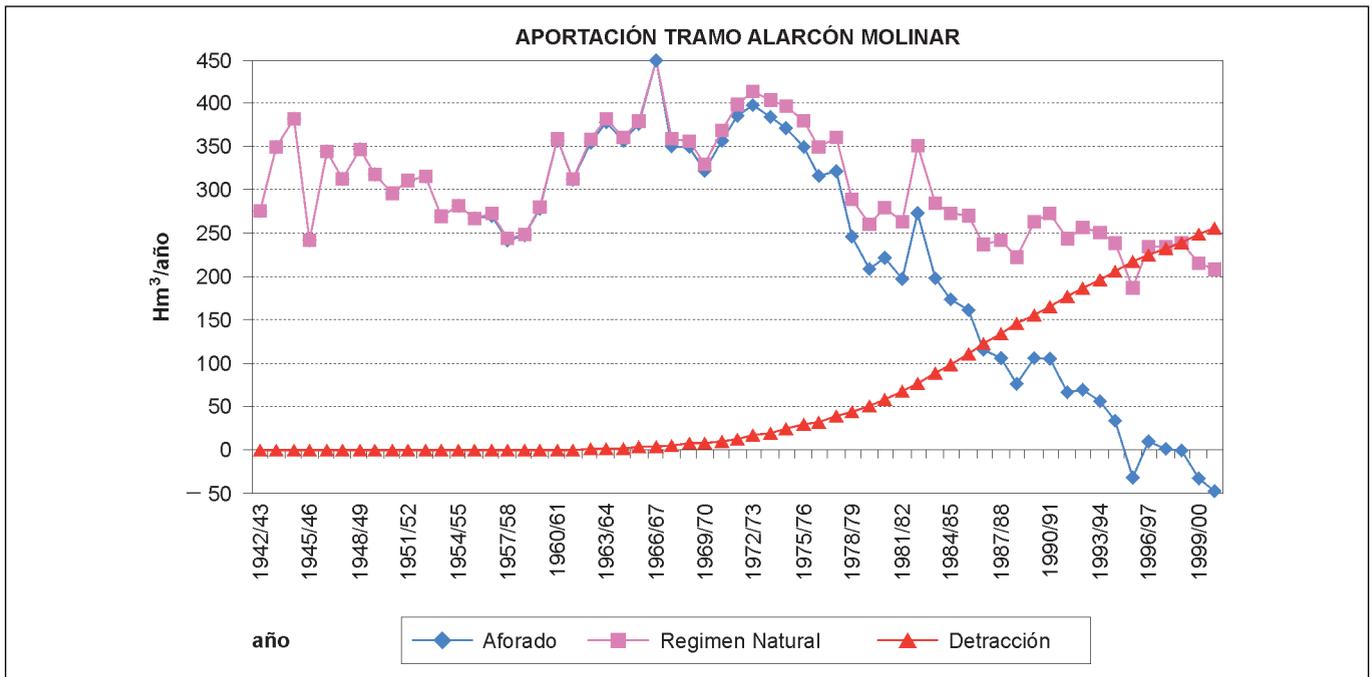
## **EFFECTOS DE LOS BOMBEO SOBRE LOS ACUÍFEROS, LAS AGUAS SUPERFICIALES Y EL AMBIENTE**

La principal diferencia de comportamiento entre las aguas superficiales y las subterráneas reside en la relación entre el volumen almacenado y el flujo en cada componente. En los acuíferos el volumen almacenado puede ser de decenas a cientos de veces la recarga media anual. Valor que puede llegar a ser de miles de veces en los grandes acuíferos de zonas áridas. En las aguas superficiales la situación es la contraria; la relación de volumen a flujo es muy pequeña y el periodo de renovación es de días a semanas, o meses para los grandes ríos. Igualmente la velocidad del flujo superficial es sensiblemente mayor en los ríos. Las aguas subterráneas forman el componente lento del ciclo hidrológico, lo que las hace más predecibles si se analizan adecuadamente. La inercia de los acuíferos proporcionada por su gran almacenamiento hace que las fluctuaciones del flujo subterráneo y por tanto del caudal base, lo mismo que las de los niveles de agua sean pequeñas en casi todos excepto en algunos acuíferos kársticos. Lo mismo sucede con la calidad química del agua. El tiempo de respuesta de los niveles o flujos a una sollicitación en el acuífero, por ejemplo un bombeo, depende de sus características hidrodinámicas, de sus dimensiones, geometría, distancia del

bombeo al río y de la conexión entre el río y el acuífero.

En España es bien conocido el caso de la disminución de los caudales del Río Júcar por los efectos de los riegos con aguas subterráneas en la provincia de Albacete, que deja de ganar casi todo el caudal que le aportaba el acuífero de la Mancha Oriental. Actualmente un tramo importante del río pasa a ser perdedor al final del periodo de riegos. En la figura 1 se puede ver el efecto de la distancia de los pozos al río sobre los caudales del río. El agua que se bombea a un pozo hace descender los niveles en el acuífero. Al comienzo del bombeo proviene de la almacenada en su entorno y paulatinamente se va extendiendo su influencia. Solo después de un cierto tiempo, se produce una disminución del flujo del acuífero al río, o un aumento de sus pérdidas si es perdedor. Si continua el bombeo aumenta el agua que procede del río y disminuye la que proviene del acuífero hasta que se alcanza un régimen de equilibrio en el que toda el agua procede de la que se resta al río. Dependiendo de las características del acuífero y de la distancia del pozo de bombeo al río en acuíferos medianos o grandes pueden pasar meses, años o decenios para que los efectos del bombeo sean significativos. De forma análoga a la amortiguación que produce el almacenamiento de los acuíferos sobre el efecto de los bombeos, también amortigua la variabilidad de las recargas. En un periodo de sequía disminuye el almacenamiento del acuífero, pero el descenso relativo es pequeño en el caso de acuíferos grandes y lo mismo le pasa al caudal base de los ríos. Esa es la causa de que los ríos sigan teniendo caudal en épocas de sequía. En la figura 2 se puede ver el efecto de los bombeos sobre los caudales del Río Júcar.

El agua de los bombeos no solo se detrae del almacenamiento y del caudal del río, en muchos caso también procede de otros componentes del ciclo hidrológico. Entre otros están la recarga inducida desde otros cauces, la disminución de la evapotranspiración desde el acuífero en zonas húmedas, al bajar los niveles freáticos o al desaparecer o decaer las freatofitas en zonas áridas. La intensa explotación de aguas subterráneas en el Alto Guadiana, tal como se predijo (Sahuquillo et al 1982), ha secado los Ojos del Guadiana por donde se producía su drenaje al río y ha producido la práctica desaparición de las Tablas de



**Figura 2.** Detracción de los caudales del río Júcar debido a los bombeos de los acuíferos de la Mancha Oriental (Font 2004).

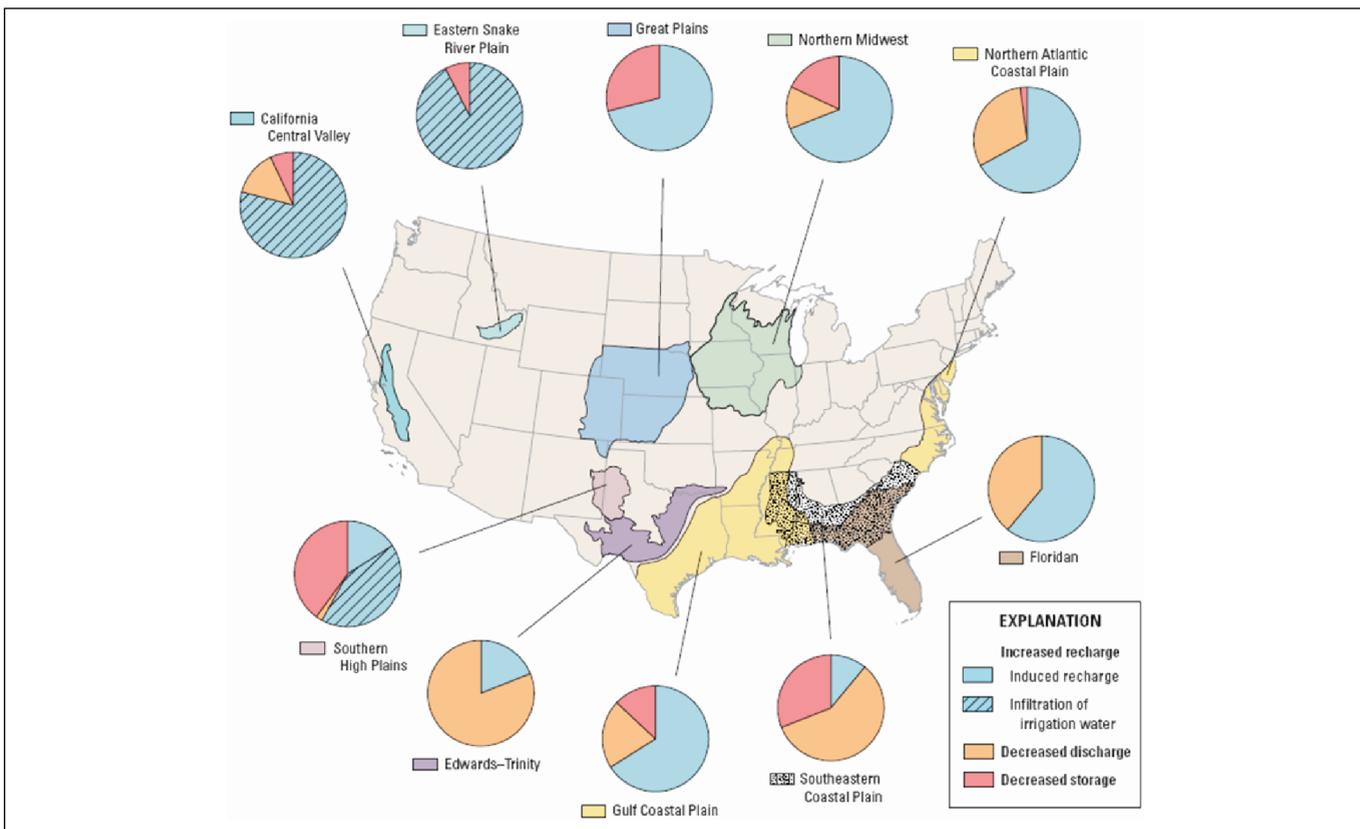
Daimiel. Esto, y el aumentado la recarga en algún cauce que ha pasado a ser perdedor, ha producido un aumento de las disponibilidades de agua del acuífero entre 100 y 200  $\text{hm}^3/\text{año}$ , (Cruces et al 1997). En otros casos la desecación de los manantiales y pequeños humedales se ha producido hace mucho tiempo, y el efecto más importante es el de la bajada de niveles freáticos, que en algunos casos del Sureste español ha sido de más de 100 m.

En la figura 3 se refleja el resultado proporcionado por la simulación de algunos acuíferos en EE.UU. entre 1970 y 1980. En general en esa época se produjo un aumento importante de los bombeos y se puede comprobar que excepto en dos acuíferos muy transmisivos (los de Florida y Edwards-Trinity) se alcanza el equilibrio de forma rápida, en los demás se produce una disminución del almacenamiento. En otros la infiltración del retorno de riegos es importante (Reilly et al 2008).

Los bombeos en un acuífero además de producir descensos en los niveles piezométricos y afectar los caudales pueden hacer que el río pase de ser ganador a perdedor. El descenso de niveles puede producir el deterioro de la calidad del agua del acuífero por intrusión de agua del mar, o por la entrada de aguas

subterráneas salinas o de calidad química deficiente. Igualmente la infiltración en embalses puede recargar los acuíferos y se producen recargas por retornos de riego, de aguas residuales o por pérdidas en las redes de abastecimiento y saneamiento. En otros casos la regulación por la construcción de embalses o las derivaciones en ríos perdedores pueden producir disminución de la recarga de acuíferos situados aguas abajo. La modificación de los intercambios de flujo entre río y acuífero tienen que tenerse en cuenta además en relación con los problemas de calidad de agua y episodios de contaminación.

El descenso de niveles produce un aumento en la presión efectiva entre partículas, que en el caso de formaciones poco permeables no consolidadas en el acuífero produce una compactación irreversible. Esto ha dado lugar a subsidencias del terreno cuando los descensos de nivel son importantes. Se han producido bajadas del terreno de hasta 9 metros en Ciudad de México y en el Valle Central de California, además de en otros acuíferos. La compactación del terreno y los asentamientos han producido rotura de tuberías de pozos y conducciones, cambio de inclinación en canales, daños en pavimentos y en las conducciones urbanas de agua y gas, o de la red de saneamiento. En España, parece haberse ocasionado subsidencia en el delta del



**Figura 3.** Fuentes de agua a los bombeos en algunos acuíferos de EE.UU. obtenidas con modelos de simulación para periodos entre 1970 y 1980, Tomado de Reilly et al 2008.

Llobregat (Barcelona), pero no se ha documentado más que en la ciudad de Murcia en la que se han producido daños de una magnitud relativamente pequeña.

### OTRAS INFLUENCIAS SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los cambios en el uso del suelo afectan, a veces de forma intensa, a las aguas superficiales y a las subterráneas. La urbanización y el talado de bosques afectan a la escorrentía e infiltración. Pero sin duda la actividad que más influye en los procesos hidrológicos es la agricultura y especialmente los riegos. Las influencias van desde la disminución de caudales y el aumento de salinidad de los ríos por el consumo y derivaciones de agua, hasta la creación de problemas de drenaje y salinización de suelos y agua por la infiltración de retornos de riego. A esto hay que añadir el problema del aumento de nitratos por aplicación excesiva de fertilizantes y los efectos de la aplicación y con frecuencia mala utilización de biocidas.

Los problemas de drenaje y salinización son habituales en los riegos de las zonas áridas. En la India, las estimaciones de la superficie con problemas de drenaje varían en este país entre 8.5 y 1.6 millones de hectáreas con subidas de niveles de hasta 1m/año. Para mitigarlos sugieren mejorar la eficiencia de los riegos utilizando menos agua y aumentar el uso de agua subterránea para rebajar los niveles freáticos (Sondi et al 1989). Pero el mayor problema de encharcamiento y salinización que se ha producido nunca es el de los riegos del Punjab en Pakistán. La mayor parte de los canales están sin revestir y tienen grandes pérdidas que alimentan al enorme acuífero situado debajo. Los niveles de agua subieron entre 30 y 90 m desde principios del siglo XX. Para resolver el problema de drenaje se propuso la construcción de decenas de miles de pozos para bombear 70 km<sup>3</sup> de agua, rebajar el nivel freático y utilizarla conjuntamente con la de los canales (Fiering 1971). El gobierno de Pakistán inició un proyecto de construcción de pozos denominado SCARP (Salinity Control and Reclamation Project) que consiguió mejorar el drenaje; proyecto que sus-

pendió al descubrir la capacidad del sector privado que continuó con esa tarea para aprovechar el agua del acuífero (Van Steenberghe and Oliemans 2002). El problema de drenaje en zonas de riego es corriente en los países áridos. Las pérdidas en los canales y sistemas de distribución pueden disminuirse revistiendo los canales, pero si estas alimentan acuíferos susceptibles de utilizarse conjuntamente con las aguas superficiales es preferible no hacerlo a no ser que las pérdidas de agua mantengan demasiado altos los niveles del acuífero y no se puedan evitar los problemas de salinidad y drenaje (Task Committee on Water Conservation 1981).

En muchas ciudades en las que había una explotación importante de aguas subterráneas que se ha interrumpido, ya sea por la contaminación de los acuíferos, por haberse producido intrusión marina o por haber cesado la actividad a la que suministraban agua, se han producido aumentos importantes de los niveles piezométricos que han ocasionado problemas de inundaciones de sótanos, garajes o túneles urbanos que habían sido construidos en seco cuando los niveles estaban más bajos. Tal es el caso del metro de Barcelona y de algunas zonas de los deltas del Besòs y del Llobregat, en el condado de Kings de la ciudad de Nueva Cork, y en muchos más sitios.

## EL CONOCIMIENTO DE LOS ACUÍFEROS

El agua subterránea es un recurso escondido (Reilly et al 2008) que no podemos ver ni medir directamente. Se puede conseguir información de sus niveles y su variación en el tiempo con medidas realizadas en los pozos, tratando de deducir cual es el caudal base que procede de los acuíferos y determinando sus características y límites con la ayuda de la geología, geofísica datos de las perforaciones y ensayos de bombeo. Los pozos son una ventana directa para estudiar los acuíferos y proporcionan la información esencial para su conocimiento. Entre otras permiten medir los niveles de agua, tomar muestras del agua subterránea y hacer ensayos de bombeo para determinar las propiedades hidrodinámicas del entorno de la perforación (Alley et al, 1999). La integración de toda esta información lleva a formar un modelo conceptual del funcionamiento de un acuífero. Con el tiempo se puede mejorar ese modelo y sus parámetros

si se dispone datos de más pozos, de más observaciones de niveles y de la respuesta del acuífero a la explotación durante periodos más largos.

En los acuíferos siempre hay que considerar los procesos transitorios en las afecciones a alturas piezométricas, caudales de ríos y humedales, a la intrusión de agua de mar o de aguas salinas continentales y a los cambios de calidad del agua, o transporte de contaminantes. En cualquier caso para los acuíferos es necesario mantener una red de observación de niveles y calidad del agua, cuyos datos hay que publicar y poner en Internet. La información sobre niveles y calidad química de los acuíferos son de un valor inapreciable; lo mismo que los datos de lluvia y los caudales de los ríos. Se les debe dar continuidad y hacerlos públicos (Taylor y Alley 2002). Por ahora el mayor periodo de datos continuados en España en algunos acuíferos, como en casi todo el mundo, es de menos de cuarenta años, aunque en muchas zonas los periodos con observaciones continuadas son mucho más cortos y frecuentemente con interrupciones importantes. Además de tomar y publicar los datos, hay que evaluarlos con informes periódicos en los que se valore la respuesta del acuífero a la explotación. En España solo se pueden consultar en Internet los datos de alguna cuenca y al parecer no hay protocolos establecidos para la toma de datos y su publicación. Otra información que debería determinarse de forma detallada y rigurosa es la de la utilización de agua superficial, subterránea o reutilizada; y esto para cada uso, ya sea urbano, de riego, industrial, etc. y para cada acuífero, cuenca o sistema de gestión independiente. Estos datos se deberían analizar y publicar periódicamente en forma análoga a como lo hace el Servicio Geológico de EE.UU. (Hutson et al 2004).

En España se conocen las características de los acuíferos a gran escala y de forma aproximada la recarga de los acuíferos. Pero hay todavía una tarea importantísima que realizar en el conocimiento e investigación más detallada de una mayoría de acuíferos para hacer una labor eficaz de gestión de las aguas subterráneas. Las inversiones dedicadas al estudio de las aguas subterráneas disminuyeron de forma importante a partir de la aprobación nueva Ley de Aguas en la que se declaraban las aguas subterráneas de dominio público, como lo eran las superficiales, a pesar de de que una de las razones esgrimidas

para el cambio legal fue la necesidad de hacer públicas las aguas subterráneas para poderlas gestionar adecuadamente, y apenas se incorporaron hidrogeólogos a las plantillas de las Confederaciones Hidrográficas. La falta de inversiones y personal ha hecho que no se haya podido aprovechar el inmenso caudal de información hidrogeológica del número importante de perforaciones realizadas desde entonces, que solo se han podido recoger e incluir de forma limitada en los inventarios y bases de datos oficiales, (MMA 2006, Sahuquillo et al 2009).

## ASPECTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES

El riego es la actividad que utiliza un porcentaje mayor de agua en las regiones secas, que en España es del orden del 80%, aproximadamente igual que en California y en general en muchas regiones semi-áridas. La superficie de riego total en el mundo es de unos 390 millones de hectáreas, un tercio de las cuales se riegan con aguas subterráneas, que utilizan dotaciones de riego por hectárea sensiblemente más pequeñas que los riegos con agua superficial. Las dotaciones medias en Andalucía son de 8200 m<sup>3</sup>/ha y año para las aguas superficiales y 4700 m<sup>3</sup>/ha y año para las subterráneas Corominas (1999), que deben de ser próximas a las del resto de España. Es evidente que los regantes con agua subterránea están más motivados para realizar un uso más eficiente porque los usuarios pagan los costes de extracción, además de estarlo en cultivar productos más rentables. En general el coste real de las aguas subterráneas es mucho menor que el del agua proporcionada por presas y canales, que en la mayoría de los países está fuertemente subvencionada. Normalmente las captaciones se pueden situar próximas al sitio de utilización, las inversiones son mucho más reducidas que las necesarias para presas o grandes canales y se pueden escalonar; el aumento de su utilización, que es habitual en todo el mundo, tiene sentido como un seguro para hacer frente a sequías (Bredehoeft y Young 1983; Tsur 1990; Deb Roy y Shah 2004 y Shah 2005).

En la India las hectáreas regadas en 2005 eran 50 millones que extraían 200 km<sup>3</sup> de agua al año y se esperaba llegar a 64 millones de hectáreas en 2007. El número de pozos de bombeo, entre los que se incluyen los pozos a pedal, que parece están cayendo en desuso

al subir el nivel de vida del país, han pasado de 1 millón en 1960 a 26-28 millones en 2002. Por otra parte la seguridad de abastecimiento que proporcionan las aguas subterráneas ha animado a realizar inversiones complementarias en fertilizantes, plaguicidas y semillas de alto rendimiento. En el Punjab de Pakistán se pasaron de unos miles de pozos en 1960 a 0.5 millones en la actualidad y en el Norte de China se estima que existen 3.5 millones de pozos entubados que extraen 75 km<sup>3</sup> de agua al año. Según Mukherji y Shah (2005) si las predicciones neomalthusianas hubiesen sido ciertas, hace años que gran parte de la población india y del Sureste de Asia hubiese muerto literalmente de hambre. Por el contrario la India es hoy uno de los grandes exportadores de alimentos, alcanzó una producción de grano record en 2003-2004, y Bangla Desh, donde a pesar de las enormes aportaciones de agua del Brahmaputra se riegan con agua subterránea el 70% del total de los riegos, también ha conseguido recientemente el autoabastecimiento de productos agrarios, aunque en este último país los avances en los abastecimientos de agua poblacional y rural están contrapeados por el grave problema del contenido en arsénico del agua subterránea, que afecta a casi veinte millones de personas.

## ASPECTOS INSTITUCIONALES

El pequeño coste de las aguas subterráneas ha inducido problemas en algunos acuíferos por el aumento excesivo de los bombeos, lo que ha ocasionado bajadas continuadas de los niveles del agua, disminución del caudal de los ríos, ha afectado a los usuarios de aguas abajo y a humedales relacionados con los acuíferos. Esta situación ha hecho que se extienda la opinión de que las aguas subterráneas son un recurso frágil y poco confiable, opinión a la que ha contribuido el libro *Pillar on sand* de Postel (1999) que sugiere que el 10% de la producción mundial de alimentos está en peligro de colapsar. La fragilidad y poca fiabilidad del agua subterránea según Custodio y Llamas (1997) es uno de los *hidromitos* sin fundamento científico que se han difundido sin existir información ni conocimiento suficiente sobre el problema. La gestión centralizada de los acuíferos, no solo en España si no en todo tipo de países ricos y pobres, como demuestra la experiencia, parece inviable. Difícilmente se puede gestionar de forma centralizada

del orden de 2 millones de pozos cuya situación técnica y legal solo se conoce en parte, teniendo en cuenta además que la Administración Hidráulica española no tiene suficiente personal para una labor como esta, y ni siquiera para llevar a cabo las labores inexcusables de investigación, control y protección de los acuíferos. El problema es como limitar la explotación en muchos acuíferos. En general son problemas difíciles de resolver, no por sus componentes técnicos o legales, sino por la dificultad de actuar sobre las decisiones de cientos o miles de usuarios. Se necesita un inventario de captaciones y derechos, es imprescindible realizar un seguimiento de extracciones, niveles y calidad del agua, y se requieren instituciones que aseguren el cumplimiento de las normas. Son problemas de lo que la ciencia política denomina como *gobernanza*. La disponibilidad de agua es función no solo de la cantidad y calidad del agua de un acuífero de la cuenca; además depende de las estructuras físicas existentes y de las leyes, regulaciones y factores socioeconómicos que controlan los usos y las demandas de agua. Las restricciones y perspectivas de la sociedad cambian además con el tiempo (Reilly et al 2008). Hace unos cincuenta años en España no parecía necesario el mantenimiento de los humedales. Hasta entonces y aun después se propugnaba su desecación para cultivarlos y combatir la malaria.

Por otra parte los vertidos incontrolados industriales y urbanos, la inexistencia de regulaciones adecuadas y rigurosas de ciertas actividades contaminantes y la utilización masiva de fertilizantes y agroquímicos en la agricultura están produciendo la contaminación de los acuíferos, que en algunos casos ha llegado a ser grave.

## EL USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

En los casos en los que hay un desarrollo importante de los recursos hídricos, al utilizar tanto las aguas superficiales como las subterráneas se afectan mutuamente. Por su interrelación se deben considerar y analizar como un recurso único (Winter et al 1998). Además los acuíferos pueden considerarse como fuentes de agua y realizar funciones de almacenamiento, distribución y tratamiento de agua complementarias a las delos sistemas clásicos de recursos

hidráulicos, (Sahuquillo, 2002). Un aspecto clave de los acuíferos es el gran volumen de agua que almacenan. Además de usarlos como embalses subterráneos para almacenar agua superficial o de otra procedencia, se puede usar el agua que hay en ellos. Esta es la razón por lo que se ha dicho que el agua subterránea no es un recurso no renovable, como un mineral o un yacimiento de petróleo, ni es completamente renovable como la energía solar, (Alley et al 1999). No obstante hay acuíferos con un almacenamiento tan grande que su explotación se realiza sin considerar su recarga que es muy pequeña comparada con la que tienen almacenada. Entre los casos más notables esto sucede con los enormes acuíferos de las areniscas de Nubia en el Sahara. En Libia se está extrayendo más 1 km<sup>3</sup>/año de agua que se trasvasa hasta la costa del Mediterráneo para riego y abastecimiento, y se piensa llegar a 2 km<sup>3</sup> anuales en 2010, (Khater 2004). En Arabia Saudita se ha proyectado un programa de riego para asentamiento de la población nómada y el autoabastecimiento de productos vegetales. En los estudios realizados se ha estimado que el agua almacenada hasta 300 m por debajo del suelo es de 2250 km<sup>3</sup> (Ahberraman 2004). Resultando el agua mucho más barata que la desalación de agua de mar. En el acuífero Ogalalla de unos 400.000 km<sup>2</sup> de extensión, situado en varios estados del medio Oeste de EE.UU., en el siglo XX se han extraído con un coste muy pequeño 240 Km<sup>3</sup> de agua, un 6% del total almacenado. En la zona sur más árida hay zonas en las que el espesor saturado del acuífero ha descendido hasta el 50% y se ha producido el secado de algunos tramos de cauce que drenaban el acuífero (Sophocleus 2004), pero todavía es posible continuar decenios con una explotación importante.

Otro planteamiento distinto es el de utilizar el agua almacenada en un acuífero muy por encima de su explotación sostenible hasta alcanzar una situación de niveles algo por encima de la aceptable, bajando los bombeos a partir de ese punto. De esta forma, utilizando lo que se ha llamado reserva utilizable una sola vez o ("*one time reserve*") se ha conseguido en Israel retrasar el desarrollo de recursos superficiales antes de construir el trasvase del Jordán desde el Lago de Tiberiades. En California y en el sureste de España la intensa explotación de los acuíferos se hizo de manera incontrolada hasta que produjeron problemas que obligaron a adoptar otras soluciones. En California

fueron los trasvases desde el Río Colorado y desde el norte del estado al sur. En el Sureste de España se vienen explotando una mayoría de los acuíferos muy por encima de su recarga media anual. En cuatro de ellos Guadalentín, Ascoy-Sopalme, Jumilla-Villena y Cingla-Cuchillos se bombean unos 250 hm<sup>3</sup>/año de agua que han proporcionado más de 7 km<sup>3</sup> de agua por encima de su recarga media en los últimos 25 a 30 años, cifras que se superarían bastante si se considerasen todos los acuíferos que se explotan por encima de su recarga media anual. Son volúmenes del mismo orden o superiores a los trasvasados por el acueducto Tajo-Segura desde su inauguración. Las simulaciones hechas con los modelos de flujo indicaban que en los 15 a 20 años siguientes sería posible continuar explotándolos a costes algo mayores que los actuales. En otros casos como el de Dalias parece difícil que se puedan mantener los bombeos actuales sin crear problemas graves de intrusión marina u otros. Se han agotado algunos acuíferos pequeños que prácticamente han dejado de bombearse y en algún otro el abandono se ha producido por aumentos de salinidad del agua bombeada. Desde hace decenios se han secado los manantiales asociados con los acuíferos y han desaparecido algunas zonas húmedas; aunque como en todo el litoral mediterráneo muchas de las zonas húmedas se habían desecado para poderlas cultivar o por motivos sanitarios. Los modelos de simulación también reflejan que si se deja de bombear se tardarían decenios en recuperarse los manantiales y humedales que se habían afectado. No parece razonable imponer el cese de los bombeos por motivos ambientales cuando además el coste del agua resultante es mucho menor que la desalada.

## Recarga artificial

Las grandes construcciones hidráulicas implican casi siempre problemas legales, económicos, sociales y ambientales. Y en muchos casos las grandes inversiones realizadas han creado problemas financieros graves en países en desarrollo. Para aumentar las disponibilidades de recursos hidráulicos se deben considerar en primer lugar las alternativas con uso conjunto y las mejoras en la gestión de los sistemas.

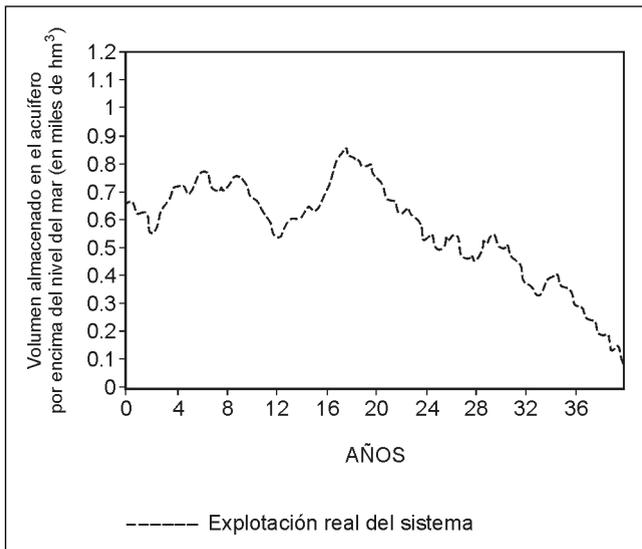
Hay dos posibilidades fundamentales para utilizar el almacenamiento de los acuíferos. Con la *recarga*

*artificial* se almacena agua en los acuíferos para poder utilizarla posteriormente. En el *uso conjunto alter-nante* (UCA) se utiliza tanta agua superficial como se pueda en periodos húmedos y se bombean más los acuíferos en periodos secos. Operando así el almacenamiento se consigue con las diferencias entre los volúmenes extremos almacenados en los acuíferos (Sahuquillo 1993, 2000, 2002).

La recarga artificial se aplica en muchas partes del mundo, pero donde se hace en mayor cantidad es en California. En el Sur de California desde el comienzo del siglo XX se hizo un desarrollo muy intenso de los acuíferos que produjo problemas de intrusión marina y descensos importantes en algunos acuíferos. Para aumentar las disponibilidades y hacer frente a los problemas se empezó a hacer uso de la recarga artificial de aguas superficiales locales y posteriormente de agua importada. En etapas posteriores se han recargado aguas residuales tratadas para su reutilización e inyectarlas en las barreras de inyección de agua dulce para prevenir la intrusión marina. En Israel el agua importada del Jordán elevada desde el Lago Tiberiades a 220 m bajo el Mediterráneo se recarga para almacenarla en los acuíferos, mientras que las avenidas de los ríos efímeros se recargan en balsas de infiltración. Las aguas residuales tratadas de la zona metropolitana de Tel Aviv se recargan en las dunas de la región de Dan.

En todo el mundo hay una tendencia cada vez más clara de utilizar la recarga artificial para conseguir un tratamiento adicional de las aguas residuales. Sin duda la recarga artificial va a aumentar en España para resolver algunos problemas, pero no es de esperar que se haga en grandes volúmenes, ni que se aplique de forma generalizada.

El método conocido como almacenamiento y recuperación en acuíferos (ASR) se empleó por vez primera en el estado de Florida; su uso es predominantemente para usos urbanos. Consiste en el almacenamiento subterráneo de agua tratada durante periodos de menor demanda para usarla como agua potable durante periodos de demanda alta. La operación se realiza con pozos de uso dual para recarga y bombeo. En Londres los acuíferos se recargan en invierno con agua tratada de los ríos Támesis y Lee (UK Groundwater Forum 1998) utilizando este concepto. Para el abastecimiento de Barcelona se recargan hasta



**Figura 4.** Acuífero de La Plana de Castellón. Cambio en el almacenamiento para la utilización actual de los embalses y el acuífero (Sahuquillo2002).

20 millones de  $m^3$  al año en pozos de uso dual en el delta del Llobregat para realizar la misma función de almacenamiento temporal, en un depósito natural de grandes dimensiones.

### Uso Conjunto Alternante

Como se ha comentado antes el UCA es un tipo de uso conjunto con el que se usa agua superficial preferentemente en periodos húmedos y agua subterránea en periodos secos. El uso del almacenamiento subterráneo se consigue por las diferencias del volumen de agua almacenada al final de un periodo húmedo, con recargas mayores durante varios años y bombeos menores, con el volumen almacenado después de una serie de años secos en los que ha habido mayores bombeos y menores recargas en el acuífero. Un aspecto importante del UCA que hay que resaltar es que a través de la operación del sistemas se consigue utilizar más agua superficial sin aumentar la capacidad de embalse y sin recurrir a la recarga artificial (Sahuquillo 1993, 2002). El caso más estudiado y probablemente uno de los mejor planteados es el del acuífero de la Plana de Castellón con el río Mijares, al norte de Valencia. El almacenamiento subterráneo que se consigue (ver figura 4), es del orden de  $700 \text{ km}^3$ , más de tres veces el de los embalses superficiales de la cuenca, localizado además donde está situada la demanda.

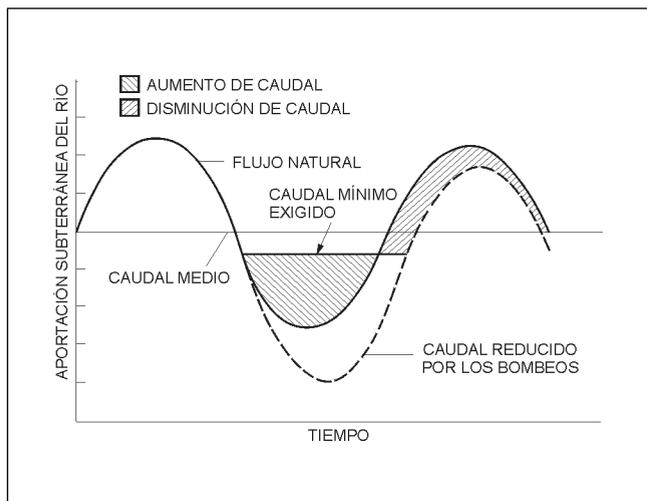
En toda la cuenca del Júcar la tercera parte de la superficie regada se hace con aguas superficiales, fundamentalmente en los riegos históricos tradicionales, otra tercera parte son riegos exclusivos con agua subterráneas y en el tercio restante se realiza utilización conjunta alternante (UCA). En toda la cuenca se bombean al año unos  $1,8 \text{ km}^3$  de agua, más de la cuarta parte de las aguas subterráneas que se extraen en nuestro país. Con ellas se riega casi la mitad de la superficie regada en la cuenca y se abastece a casi la mitad de su población; y ésta es sin duda la razón por la que incluso las mayores sequías no producen perjuicios importantes.

### Sistemas río-acuífero

El concepto de uso alternante se aplica a acuíferos aluviales o a otros pequeños. Es lo que se denomina un sistema río-acuífero. Su rasgo fundamental es que la influencias mutuas entre el río y el acuífero son mucho más rápidas que en acuíferos mayores. En todo caso la inercia del almacenamiento del acuífero produce un retraso del descenso en el caudal del río, suficiente para que correspondan a periodos de mayores caudales. Son clásicas las utilizaciones para riego de los aluviales de los ríos Arkansas y South Platte en el Estado de Colorado en EEUU y en los ríos del Medio Oeste. En el Reino Unido se hace un uso generalizado de los sistemas río-acuífero. Los acuíferos se bombean y se vierte a los ríos para aumentar su caudal en periodos secos para mantener un caudal adecuado para las necesidades de los usuarios de aguas abajo y las ambientales, (ver figura 5). Estos esquemas que se conocen como "*river augmentation*" se utilizan de forma sistemática y de una manera muy eficiente en Inglaterra y Gales (Downing et al 1974). En España existe alguna posibilidad de hacerlo aunque algunas opciones tendrían problemas institucionales y legales para su implantación.

### Uso de manantiales kársticos

En España se han construido pozos de gran capacidad en las proximidades de manantiales kársticos para riego y abastecimiento urbano, bombeando para conseguir en periodo secos caudales mayores que los que proporciona el manantial. Los descensos producidos



**Figura 5.** Esquema de aumento del caudal de un río. Modificado de Downing et al (1974).

por el bombeo anulan los caudales del manantial. Así se visualiza la utilización del acuífero como si fuera un embalse subterráneo. Las demandas altas se obtienen con bombes mayores, lo que conceptualmente es igual a lo que se hace con el *uso conjunto alternante*. En muchos casos se han obtenido pozos con caudales muy altos; de 850 y 350 L/s en dos pozos en el manantial  *río de los Santos* en Valencia, 2.250 L/s en cinco pozos de 100 m de profundidad en el manantial de *Deifontes* cerca de Granada y 800 L/s en dos pozos en el manantial de *El Algar*. En algunos casos la regulación de manantiales se utiliza como un componente más de un sistema más complejo de recursos de agua. Este es el caso de La Marina Baja en la provincia de Alicante donde el sistema está formado por dos embalses; dos acuíferos (uno de los cuales contiene el Manantial de *El Algar*), además de la reutilización de aguas residuales para riego (Sahuquillo 2007).

## LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA

El deterioro de la calidad del agua, además de tener incidencia sobre la salud pública y el medio ambiente, puede representar una disminución efectiva de su disponibilidad. El problema se agrava por el coste y la dificultad, que en muchos casos es imposibilidad, de limpiar los acuíferos contaminados. Esto hace que sea vital proteger su calidad, pero más especialmente en zonas con recursos hídricos escasos (Shuval 1980). Ni

en la administración pública española, ni en la clase política, ni en los ciudadanos existe preocupación sobre este problema al que se le ha dedicado menos atención que en otros países de nuestro entorno socioeconómico; no hay programas relacionados con la contaminación de los acuíferos y existen muy pocos estudios de detalle a escala nacional sobre insecticidas y plaguicidas. Tampoco existen normas claras y rigurosas sobre su aplicación, así como sobre nitratos.

La información sobre el contenido de nitratos se suele referir a su distribución en planta y en general no se ha estudiado su variación en profundidad, o la influencia de la construcción de pozos sobre la migración de nitratos a niveles permeables inferiores. Las perforaciones pueden transmitir tanto nitratos como otros compuestos al ser los acuíferos someros más vulnerables a la contaminación. Hay estudios recientes sobre el acuífero del sur de la provincia de Buenos Aires donde con la cementación de la parte superior de los pozos, lo que denominan anillo sanitario, se ha conseguido una disminución drástica del contenido de nitratos en el agua bombeada (Cionchi 2005). En la costa mediterránea para resolver el problema causado por el contenido elevado de nitratos se han sustituido a un coste bastante elevado pozos de abastecimiento urbano por otros en captaciones más alejadas que con el tiempo también han visto aumentar su contenido. No obstante, en algunos sondeos en los que se habían aislado los tramos acuíferos superiores, se ha podido comprobar la existencia de tramos inferiores con un contenido bajo en nitratos, como cabía esperar. Con normas adecuadas de construcción y abandono de pozos se conseguiría una mayor protección en algunos acuíferos, entre ellos en muchos de los de la costa Mediterránea.

Sorprendentemente tampoco existen normas para la protección de los acuíferos contra los vertidos de tanques enterrados de productos químicos, o almacenamiento de carburantes en estaciones de servicio y de muchas otras actividades potencialmente contaminantes. La protección de las aguas subterráneas requiere una información hidrogeológica mucho más detallada, a escala de pozo más que de acuífero. Los procesos de movimiento y transporte de los contaminantes por el agua subterránea precisan un conocimiento mucho más detallado y cuantificado del flujo subterráneo.

## CAMBIOS HIDROLOGICOS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Existe un consenso generalizado de que existe un aumento actual de la temperatura que ha sido provocado por la acción del hombre y que se requiere una intervención activa e inmediata para mitigar este proceso. Más de 30 asociaciones científicas y academias de ciencias de muchos países han apoyado estas conclusiones. El eco de los informes del IPCC ha promovido que algunas naciones y grupos ambientalistas se hayan decidido a desarrollar y apoyar programas para tratar de limitar el aumento de los gases de efecto invernadero y reducir su contenido de CO<sub>2</sub> y de GEI (gases de efecto invernadero) en la atmósfera. Es lo que se conoce como mitigación. La atenuación consiste en acciones directas para cada uno de los supuestos efectos negativos del calentamiento global. En el caso del agua sería mejorar la planificación y la operación de los sistemas hidráulicos.

El aumento de las temperaturas producirá cambios en las precipitaciones y su distribución estacional en el globo terráqueo. Los cambios a su vez inducirán cambios en la escorrentía tanto en su valor anual medio como en su variabilidad anual y estacional. En zonas áridas y semiáridas, en las que la explotación de los recursos hidráulicos sea intensa y sufran descensos pluviométricos, el impacto del calentamiento global puede ser muy importante. Los posibles efectos sobre la disponibilidad de agua son: variaciones en la escorrentía superficial y en la recarga de los acuíferos, cambios en las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas y en su calidad; aumento de la severidad de las sequías y las avenidas. Y por último aumento de la evapotranspiración potencial y de las necesidades de riego de los cultivos y mayor evaporación en embalses y humedales. Estos cambios provocarán aumentos de las demandas de agua urbana, de riegos y la ambiental al aumentar la temperatura y la evapotranspiración, y aumentará la necesidad de disponer de mayor capacidad de embalse para protección contra las avenidas y en general de almacenamiento de agua. Además en las zonas más afectadas puede ser necesario disponer de mayores recursos de agua, actuar sobre la demanda y mejorar la gestión y operación de los sistemas de recursos hídricos. El aumento de recursos se puede conseguir con la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas, con la reutilización y con la desalación o desalobración.

Para la actualización para 2009 del California Water Plan de 2005 se está considerando la adaptación para reducir y atenuar los efectos climáticos e hidrológicos. Se han realizado simulaciones del comportamiento del sistema hidráulico de California para distintos escenarios climáticos futuros según las predicciones de varios modelos de circulación global. El sistema de recursos hídricos de California tiene una alta conectividad que le permite una intervención amplia en su gestión y operación. La conectividad la proporciona la amplia red de conducciones de las transferencias de agua; las del norte al sur del estado, la del Río Colorado y otras como el acueducto de Los Ángeles. En la Universidad de California-Davis se ha desarrollado el modelo CALVIN (CALifornia Value Integrated Network) para analizar sistemas de recursos hidráulicos complejos con componentes superficiales y acuíferos. Es un modelo de optimización económica que se ha aplicado a California para diversos escenarios climáticos, hasta final de este siglo. El modelo de optimización resuelve la operación mensual del sistema hasta 2100 en el que se considera una población de 92 millones de habitantes, Lund et al (2003), Tanaka et al (2006). Proporciona los precios sombra y los beneficios y costes marginales. Incluye los acuíferos de forma agregada, restricciones ambientales y las restricciones en las conducciones. Hace posibles los cambios en la asignación del agua a través de mercados de agua, haciendo transferencias según la capacidad de pago de cada uso, lo que permite la transferencia de agua en periodos de sequía desde los usos agrícolas a los urbanos y cambios de cultivos y barbechos. Tiene en cuenta el ahorro en usos urbanos y la eficiencia de riego, la reutilización y la desalación. Para la operación del sistema de recursos de agua de California propone una operación de la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas mucho más radical que la efectuada hasta ahora. El modelo tiene más de 1200 elementos, 51 embalses superficiales, 28 subterráneos, más de 600 conexiones o trasvases y representa más del 88% del regadío y del 92% de la población de California. Los resultados del estudio preliminar indican la posibilidad física de un sistema complejo y diverso interconectado para adaptarse a cambios notables en el clima y en población, aunque a costes importantes pero soportables para la economía del estado. La adaptación es posible gracias a cambios importantes en la operación de la gran capacidad de almacenamiento del sistema, transfe-

rencias de agua entre los usuarios y una cierta adaptación a tecnologías nuevas.

Las conclusiones preliminares que se pueden sacar de este trabajo, que habrá que ampliar y desarrollar con más detalle, son que el sistema de California puede adaptarse con un coste relativamente reducido para su economía a la disminución de recursos que produciría el calentamiento global. Esto es posible debido a la utilización del almacenamiento subterráneo que proporcionan los acuíferos para amortiguar la gran variabilidad de las situaciones más secas y para dejar más espacio en embalses superficiales para retener las avenidas; a la gran conectividad producida por las conducciones y transvases existentes; a la inclusión de nuevos recursos como reutilización y en menor medida desalación; al aumento de la eficiencia (eficiencia de riegos, eficiencia en la gestión, ahorros urbanos, etc.) y a los cambios en la asignación del agua (mercados y cambios de asignación).

### **Consideraciones sobre la situación en España**

Las previsiones de los informes del IPCC para España son de aumento de temperaturas y descenso de precipitaciones. Dependiendo de los escenarios de emisiones, y de cada simulación, en algunos escenarios se producen aumentos de precipitaciones en el Norte y descensos en el Sur y Sureste de la Península. La conectividad de los sistemas hídricos en España es mucho menor que en California, lo que disminuye las posibilidades de actuación. Pero en cualquier caso será precisa la consideración global de todos los recursos incluyendo los acuíferos, la utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas, la reutilización, la desalación y desalobración, la mejora de la eficiencia, cambios de cultivos y el intercambio de asignaciones a través de los mercados de agua.

Con independencia de las incertidumbres que puedan existir sobre los efectos del cambio climático, hay que realizar de forma sistemática una gestión más eficiente de los sistemas hidráulicos y plantear análisis más detallados de los sistemas hidráulicos españoles. El conocimiento de los acuíferos y su relación con las aguas superficiales es aun muy deficiente y es urgente superarlo para poder hacer una gestión adecuada, sobre todo en las cuencas en las que se hiciera nece-

saria una utilización conjunta agresiva, como la descrita antes para California. Para poder contar con la contribución de los acuíferos y su almacenamiento es preciso cambiar radicalmente esta situación, para lo que se requieren muchos años (Sahuquillo et al 2009). En cualquier caso la necesidad de un mejor conocimiento de los recursos subterráneos es imprescindible para hacer una gestión más eficiente de muchos de nuestros sistemas hidráulicos. Las posibilidades adicionales que plantean la utilización conjunta con las aguas superficiales y la utilización del almacenamiento de los acuíferos son importantes, pero conviene empezar cuanto antes a mejorar la gestión de los distintos sistemas y a proteger los acuíferos de la contaminación de forma eficiente. Si se continúa con la falta de protección actual de la contaminación de los acuíferos no será posible realizar la gestión conjunta de los recursos superficiales y subterráneos. Peor aun, una contaminación importante de algunos acuíferos produciría una pérdida irrecuperable de recursos no solo subterráneos, también de parte de los superficiales relacionados con ellos. Sería imperdonable no poder hacerlo por no haber tomado en su momento las decisiones adecuadas.

### **CONCLUSIONES**

Las aguas subterráneas forman una parte muy importante del ciclo hidrológico y están íntimamente relacionadas con el resto de los componentes del ciclo, en particular con las superficiales. Son fáciles de explotar y en general su coste es sensiblemente más barato que el del agua proporcionada por presas y canales, con la ventaja adicional de que en este caso el coste, o la mayor parte de él, repercute directamente en los usuarios, con lo que se satisface el precepto que impone la Directiva Marco Europea de que el coste del agua debe pagarse totalmente por estos. Las aguas subterráneas proporcionan actualmente una parte muy importante de los recursos utilizados en todo el mundo. La explotación intensiva de aguas subterráneas ha permitido un incremento espectacular de la superficie regada en muchos países en desarrollo, con unas inversiones muy pequeñas comparadas con las que son necesarias para el aprovechamiento de las superficiales, y además pagadas casi exclusivamente por los usuarios, sin apenas aportación de los estados. En algún país que tenía carencias importantes en la

producción de alimentos ha permitido la salida de la pobreza e iniciar un despegue económico importante. En algunos casos la explotación intensa de los acuíferos ha ocasionado efectos negativos por descensos progresivos de nivel del agua en el acuífero.

El gran volumen de agua almacenado en los acuíferos les confiere la particularidad de poderse intensificar su aprovechamiento en periodos secos, o en sequías, o en casos de emergencia. Esto y su dimensión espacial, les proporciona unas oportunidades muy interesantes y ventajosas para el uso conjunto con las aguas superficiales. Estas ventajas se vienen utilizando en muchas partes del mundo a través de la recarga artificial y en España del *uso conjunto alternante*, como se hace en un porcentaje importante de los riegos de la Comunidad Valenciana.

La administración debe dedicar más medios financieros y humanos a estudiarlas y controlarlas. La preocupación de las administraciones estatal y autonómicas sobre los problemas ambientales es escasa, y mínima sobre los de calidad y contaminación de las aguas subterráneas, y no corresponde a nuestro lugar cultural y económico en el mundo.

## REFERENCIAS

1. Ahberraman, W. 2004. Should intensive use of non-renewable groundwater always be rejected?. In: *Intensive Use of Groundwater*. M.R. Llamas y E. Custodio (eds.) Balkema Publishers, The Netherlands pp. 191-203.
2. Alcalá, F.J., Custodio, E. 2007. Recharge by rainfall to Spanish aquifers through chloride mass balance in the soil. En: *Groundwater and Ecosystems*. Proc. 35<sup>th</sup> IAH Congress. Lisboa. (eds. L. Ribeiro, A. Chambel y M.T. Condesso de Melo). CD
3. Bredehoeft, J.D. and R.A. Young, 1983. "Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water for Irrigated Agriculture: Risk Aversion". *Water Resources Research*, Vol. 19, n° 5, pp. 1111-1121.
4. Cionchi, J. L. 2005.- La influencia de las características constructivas en la caracterización hidroquímica de aguas subterráneas. IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Río Cuarto Argentina
5. Custodio, E. 2001. Effects of groundwater development on the environment. *Bol. Geolog. Minero*, Madrid, 111(6): 107-120.
6. Custodio, E., Llamas, M.R. 1997 Consideraciones sobre la génesis y evolución de ciertos "hidromitos" en España. En *Defensa de la Libertad: Homenaje a Víctor Mendoza Oliván*. Instituto de Estudios Económicos. Madrid: 167-179.
7. Custodio, E., Kretsinger, V., Llamas, M.R. (2005) Intensive development of groundwater: concept, facts and suggestions. *Water Policy*, 7: 151-162.
8. Corominas J. El papel de las aguas subterráneas en los regadíos. En Actas de las Jornadas sobre Aguas subterráneas en el *Libro Blanco del Agua en España*. Samper y Llamas (Eds).Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español pp65-79.
9. Cruces, J., Casado, M., Llamas, M. R., Hera, A. De La And Martínez, L. 1997. El desarrollo sostenible en la Cuenca Alta del Guadiana: aspectos hidrológicos. *Revista de Obras Públicas*, No. 3362, Febrero, pp. 7-18.
10. Deb Roy, A. and Shah, T. 2004. Socio-ecology of groundwater irrigation in India. In: M.R. Llamas and E. Custodio (eds.), *Intensive Use of Groundwater. Challenges and opportunities*. Balkema Publishers. Lisse, the Netherlands: 307-336.
11. Downing, R.A, Oakes,D.B, Wilkinson, W.B. & Wright, C.E. 1974. Regional Development of Groundwater Resources in Combination with Surface Water. *Journal of Hydrology*. 22: 174-177.
12. Fiering, M.B. 1971. Simulation Models for Conjunctive Use of Surface and Ground Water. Seminar of Ground Water, Granada, España, FAO-Gobierno Español, p.1-25.
13. Font, E. 2004.- Colaboración en el desarrollo y aplicación de un modelo matemático distribuido de flujo subterráneo en la Mancha Oriental. E.F.C. Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.
14. Healy, R.W., Winter, T.C., LaBaugh, J.W., and Franke, O.L., 2007, Water budgets. Foundations for effective water-resources and environmental management: U.S. Geological Survey Circular 1308, 90 p.
15. Hutson, S.S., Barber, N.L., Kenny, J.F., Linsey, K.S., Lumia, D.S., and Maupin, M.A., 2004, Estimated use of water in the United States in 2000: Reston, Va., U.S. Geological Survey Circular 1268, 46 p
16. Khater, A. R. 2004. Intensive Groundwater Use in the Middle-East and North Africa. In: *Intensive Use of Groundwater*. Llamas and Custodio (eds.). Balkema Publishers, The Netherlands
17. Llamas, M.R. (1975). Non-economic motivations in ground water use: hydro-schizophrenia. *Ground Water*, 13(3): 296-300

18. Llamas (2004). La gestión de las aguas subterráneas y los Conflictos sociales relativos al plan hidrológico Nacional *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)Vol. 98, N° 2, pp 235-254, 2004*
19. Llamas, M. R. & Custodio, E. (2004). Intensive use of groundwater: a new situation which demands proactive action. In Llamas, M. R. & Custodio, E. (eds.). *Intensive Use of Groundwater*: Balkema. The Netherlands, pp. 13–31.
20. Llamas, M. R. & Custodio, E. (eds.) (2003b). *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Balkema, The Netherlands.
21. MMA (2000) *Libro blanco del agua en España*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 1–637.
22. 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. Memoria. Dirección general del Agua, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
24. Mukherji, .A and T. Shah.(2005) - Groundwater socio-ecology and governance: a review of institutions and policies in selected countries. *Hydrogeology Journal .Official Journal of the International Association of Hydrogeologist Vol13328-345*
25. Postel, S. (1999) *The pillar of sand*. W.W. Norton and Co. New York, USA: 1–31
26. Reilly, T.E., Dennehy, K.F., Alley, W.M., and Cunningham, W.L., 2008, Ground-Water Availability in the United States: U.S. Geological Survey Circular 1323, 70 p. <http://pubs.usgs.gov/circ/1323/>
27. Sahuquillo. A. (1985) Groundwater in Water Resources Planning: Conjunctive Use, *Water International Vol. 10, n° 2 pp 56-63*
27. Sahuquillo, A. (1993).- Papel de los acuíferos en la regulación de los recursos hidráulicos. Jornadas sobre las aguas subterráneas. *Instituto Tecnológico Geominero de España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.
28. Sahuquillo, A. (1999) La calidad y la contaminación de las aguas subterráneas en España. ¿quo vadimus?. *La Contaminación de las Aguas Subterráneas: Un problema Pendiente* (eds. J. Samper, A. Sahuquillo, J.E. Capilla, J.J. Gómez Hernández). A.I.H–I.T.G.E Madrid.
29. Sahuquillo, A. 2000. La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en las sequías. Monográfico sequías. *Rev. Real Acad. Cienc. Esact. Fis. Nat. (esp)*. 94, 2: 183-196.
30. Sahuquillo. A 2.002 [Chapter *Conjunctive use of Groundwater and Surface Water*]. [Theme Groundwater], [Edited by Luis Silveira and Eduardo Usunoff], in *Encyclopaedia of Life Support System*. (EOLSS) Eolss Publishers, Oxford UK, [<http://www.eolss.net>]
31. Sahuquillo, A (2007).- Regulating variable karstic spring flow with high capacity wells. *Groundwater and Ecosystems*. XXV AIH Conference. Lisboa. CD
32. Sahuquillo, A., J. López García and B. López Camacho. Transient simulation of an aquifer connected to a wetland ecosystem” *Mathematics and computers in simulation XXIV* (1982) pp161-172.
33. Sahuquillo, A. and Lluria (2004). Conjunctive use as potential solution for stressed aquifers: social constraints. In Llamas M.R. and Custodio, E., 2004 (Eds). *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. A.A. Balkema Publishers, the Netherlands: 478 pp.
34. Sahuquillo, A., Martinez-Cortina, L., Sanchez-Vila, X. and Capilla. J 2005. Selected Papers on Intensive Use of Water. International Assotiation of Hydrogeologist. Taylor & Francis -Balkema. Netherlands
35. Sahuquillo, A., Custodio, E. y Llamas, M.R. 2009 “La gestión de las aguas subterráneas” Tecnología del Agua, primera parte: febrero, pp. 60–67; segunda parte: marzo, pp. 54–67, I.S.S.N.: 211/8173
36. Task Committee on Water Conservation of the water Resources Planning Committee of the Water Resources Planning and Management Division. 1981. Perspectives on Water Conservation. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division. ASCE* 107, (1)
37. Shah, T. (2005) “Groundwater and Human Development: Challenges and Opportunities in Livelihoods and Environment”, *Water Science and Technology*, vol. 8, pp. 27-37.
38. Shuval, H,I.(1980) Editor, *Water Quality Management under Conditions of Scarcity*, Israel as a Case Study, Academic Press.
39. Sondí, S. K., Rao, N. H. & Sarma, P. B. S. 1989. Assessment of groundwater potential for conjunctive water use in a large irrigation project in India. *Journal of Hydrology, 107: 283-296*.
40. Sophocleus, M. 2004. Environmental Implications of Intensive Groundwater Use with special regard to streams and wetlands. In: *Intensive Groundwater Use*. Llamas and Custodio (eds.). Balkema Publishers, The Netherlands, pp. 93-112.
41. Sorooshian, S. 1993. Editorial. *Water Resources Research*, Vol. 29, NO. 1, pp 1-3
42. Tanaka, S. K, Tingju Zhu, Jay R. Lund, Richard E. Howitt, Marion W. Jenkins, M. A. Pulido, Mélanie Tauber, Randall S. Ritzema and Inés C. Ferreira.2006 - Climate Warming and Water Management Adaptation for California. *Climat Change*
43. Taylor, C.J., and Alley, W.M., 2002, Ground-water-

- level monitoring and the importance of long-term waterlevel data: U.S. Geological Survey Circular 1217, 68 p.
44. Tsur, Y.,1990. "The Stabilization Role of Groundwater When Surface Water Supplies Are Uncertain: The Implications For Groundwater Development".Water Resources Research, Vol. 26, N1 5, pp. 811-818, May, 1990
  45. Van Steenberg, F. and Oliemans, W. 2002. A review of policies in groundwater management in Pakistan 1950-2000 *Water Policy. Ed Elsevier.*
  46. UK Groundwater Forum 1998. Groundwater our hidden asset. Compiled by R.A. Downing. Groundwater Forum Wallinford. UK
  47. Younger, P.L. 2007. *Groundwater in the environment, an introduction.* Blackwell Publ. Oxford: 1-317..
  48. Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., and Alley, W.M., 1998, Ground water and surface water. A single resource: U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p.
  49. Wolock, D.M., 2003b, Base-flow index grid for the conterminous United States: U.S. Geological Survey Open-File Report 03-263, digital dataset, accessed on November 20, 2007, at <http://water.usgs.gov/lookup/getspatial?bfi48grd>