

Optimización del uso de los recursos hídricos del sector Sierra de Baza (Granada, cuenca del Guadalquivir, España) mediante el empleo de un modelo matemático de simulación conjunta

M. Henche Pena, J. M. Murillo Díaz y S. Castaño Castaño

Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas, 23, 28003-Madrid
E-mail: jm.murillo@igme.es

RESUMEN

En el entorno de la Sierra de Baza, situada en la provincia de Granada (España), un área cuyo principal pilar económico lo constituye la agricultura, existen serios problemas de suministro de agua, especialmente para aquellas demandas de carácter agrícola. En este espacio está prevista la construcción del embalse de Gor, situado sobre el río del mismo nombre, que ha de paliar en parte el problema de abastecimiento al actual regadío de Gor y Gorafe y la ampliación de 600 ha previstas en el Plan Hidrológico del Guadalquivir.

En el presente artículo se analiza, mediante un modelo de simulación de la gestión hídrica, el efecto que tanto el embalse como la ampliación de regadío tendrán sobre el nuevo esquema de explotación planteado, así como el beneficio que puede suponer la integración en el mismo del acuífero de la Sierra de Baza mediante una actuación que contemple el uso conjunto. Para lograr estos objetivos se ha utilizado como herramienta de apoyo el programa SIMGES, que ha sido desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Este soporte informático permite barajar las diferentes hipótesis de simulación, que corresponden a las distintas situaciones planteadas, ofreciendo unos resultados que posibilitan el estudio de alternativas de explotación no consideradas actualmente por los gestores del agua.

La opción que permite obtener una mayor garantía de suministro y un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos del sistema, es aquella que contempla la construcción del embalse de Gor, junto con la aplicación de medidas y políticas de ahorro de agua en el sistema, así como la incorporación de bombeos adicionales desde los acuíferos. Otro aspecto importante a considerar consiste en no incrementar en exceso la demanda agrícola en el área de Gor, situándola en unos rangos asumibles por los recursos sistema.

Palabras clave: Gestión de recursos hídricos, modelo de simulación, Sierra de Baza, uso conjunto

Water resources optimization by means of a simulation model in Sierra de Baza (Granada, Guadalquivir basin, Spain)

ABSTRACT

In the surroundings of the mountain range of Sierra de Baza, located in the province of Granada (Spain), an area whose main economic source is agriculture, there are serious water supply problems, specially for those demands dealing with agriculture. In this area the construction of the Gor dam, located in the river of the same name, is going to partly palliate the supply problem of the present irrigated land of Gor and Gorafe and the extension of 600 ha which is anticipated in the Hydrologic Plan of the Guadalquivir.

In this paper the effect on the new management system of the Gor dam and of the new irrigated extension is analysed, by means of a water resources management simulation model. The effects of the integration of the Sierra de Baza aquifer in the water resources system using conjunctive use is analysed too. The computer program SIMGES, developed by the Polytechnic University of Valencia (UPV), has been used as a support tool. It allows taking into account different hypothesis from simulations, that correspond to different situations, offering results that allows water managers to study different alternatives of operation.

The option that allows a greater supply guarantee and a greater use of the hydric resources of the system, is that which considers the construction of the Gor dam, along with the application of water saving policies and measures in the system, as well as the incorporation of additional pumping from the aquifer. An important point to take into account is to make a sustainable increase of the Gor district irrigation demand according with the system water resources possibilities.

Key words: Conjunctive use, simulation model, Sierra de Baza, water resources management

Introducción, objetivo y metodología

La utilización conjunta, entendida como *la satisfacción de una determinada demanda hídrica a partir del uso planeado y coordinado de la componente superficial y subterránea del ciclo hidrológico* (Sánchez y Murillo, 1997), es una de las ideas fundamentales que figuraba en la Ley de Aguas 29/1985 (BOE, 1985) y en el actual texto refundido de la Ley de Aguas 1/2001 (BOE, 2001).

No obstante, como queda reflejado en Sánchez y Murillo (1997), las actuaciones de gestión conjunta en España puede decirse que se han generado más por iniciativa de los usuarios privados, que en su momento percibieron la necesidad de crear explotaciones subterráneas de apoyo, que como consecuencia de una estrategia de planificación procedente de la Administración.

Dentro del Programa Nº 16 del Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MINER-MOPTMA, 1994) titulado "Integración de las Unidades Hidrogeológicas en los Sistemas de Explotación" se manifestaba la necesidad de planificar el uso coordinado de aguas superficiales y subterráneas en aquellos sistemas de explotación donde puede resultar interesante. Posteriormente (DGOHCA-ITGE, 1996; Sánchez y Murillo, 1997), se han identificado en España diversos sistemas de explotación de recursos hídricos donde hay posibilidades de implantarse o se ha implantado una actuación de uso conjunto.

Uno de los sistemas considerados en estos estudios es el Sistema de Explotación del Gadiana Menor. Este incluye el subsistema de la Sierra de Baza donde está previsto construir el embalse de Gor, con una capacidad estimada de 10,32 hm³, que regulará unos recursos que se utilizarán principalmente para mejora de 636 ha en Gor y Gorafe, así como para la ampliación de otras 600 ha previstas en el Plan Hidrológico del Guadalquivir (BOE, 1999).

El presente artículo constituye la síntesis de una serie de trabajos realizados con el objetivo principal de optimizar el subsistema de explotación de la Sierra de Baza, analizando su comportamiento mediante un modelo de simulación de la gestión, que utiliza distintos esquemas en lo referente a la relación y características de sus componentes y distintas alternativas en el manejo de sus recursos. Este esquema se puede considerar como un paso previo y necesario dentro de un proyecto más ambicioso que pretende integrar las Unidades Hidrogeológicas asociadas a la Cuenca del Alto Gadiana Menor en el actual esquema de explotación de sus recursos hídricos superficiales. Dicho proyecto al igual que el correspondiente a la Sierra de Baza, forma parte de los estudios que la

Administración Central (DGOHCA-ITGE, 1996) recomiendan realizar a los Organismos de Cuenca para integrar la explotación de las aguas subterráneas en la gestión global de los recursos hídricos.

Para la realización del presente trabajo se ha seguido, en líneas generales, la metodología y recomendaciones propuestas por Sahuquillo y Sánchez (1983) para la ejecución de estudios de uso conjunto. Los pasos seguidos han sido los siguientes:

- Estimación de los recursos hídricos totales en régimen natural en el punto donde se va a situar el principal elemento de regulación superficial, esto es, el embalse de Gor, así como las aportaciones provenientes de los principales manantiales del subsistema de la Sierra de Baza como Siete Fuentes, San Juan, Fuente Zalema, Fuente Grande, La Alcanacia, Tres Fuentes, Castellón, Tornazo y Hernán-Valle.
- Estimación de las demandas de agua para abastecimiento y riego a escala municipal o por núcleos de población en función de las necesidades.
- Esquemización a nivel básico de los elementos que componen el subsistema de gestión de la Sierra de Baza (aportaciones, embalses, conducciones, etc.) y de las relaciones existentes entre ellos.
- Modelación del subsistema de la Sierra de Baza mediante un modelo de simulación de la gestión, en condiciones lo más parecidas posibles a la realidad actual, dentro de las limitaciones impuestas por el conocimiento del subsistema, el funcionamiento del programa utilizado y los datos disponibles.
- Simulación de distintas alternativas mediante modificación de los diferentes elementos del subsistema o adición de otros nuevos, para obtener un conjunto de opciones que sirvan de ayuda a la toma de decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos.

El modelo SIMGES de simulación de la gestión hídrica

La simulación matemática de sistemas de recursos hídricos ha llegado a convertirse en un instrumento muy útil para los gestores de agua, pues ayuda a resolver problemas como la ampliación de los sistemas de recursos hidráulicos o la toma de decisiones sobre el modo más conveniente de operar los distintos elementos del sistema (López García, 1993).

El modelo utilizado para la simulación de la gestión de los recursos hídricos de la Sierra de Baza se denomina SIMGES, y se trata de un modelo general,

desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (Andreu *et al.*, 1993), para la Simulación de la Gestión de cuencas o sistemas de recursos hídricos complejos en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial (Andreu *et al.*, 1992, y Andreu y Capilla, 1993). En este programa la simulación se efectúa a nivel mensual, unidad temporal básica en el ámbito de la planificación hidrológica. El modelo obtiene como resultado la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías de satisfacción de las demandas. Presenta una gran versatilidad para construir esquemas de gestión complejos, y permite simular los distintos acuíferos en función del conocimiento que se tenga de los mismos.

El modelo SIMGES se ha aplicado con éxito en otros ámbitos de planificación o sistemas de explotación del Estado español. A este respecto cabe citar la Cuenca del Segura (Andreu *et al.*, 1994), Marina Baja de Alicante (Castaño y Murillo, 2001) y Costa del Sol Occidental (Gómez Gómez *et al.*, 2001).

Componentes del subsistema de gestión de los recursos hídricos de la Sierra de Baza

En la figura 1 se presenta un esquema topológico del subsistema de recursos hídricos de la Sierra de Baza, con los componentes esenciales del mismo y sus relaciones mutuas. Este esquema muestra la situación actual del subsistema, a la que se ha añadido el principal elemento regulador de aguas superficiales contemplado en el Plan Hidrológico Nacional, el embalse de Gor, así como las demandas a las que servirá.

El esquema está constituido por los siguientes elementos:

Almacenamiento subterráneo: Sistemas acuiferos

En el subsistema de gestión estudiado interviene un acuífero principal que es el acuífero Sierra de Baza. Dentro de este acuífero se pueden diferenciar dos grandes sectores entre los que existe una divisoria de flujo, que coincide con el cauce del río Gor y su prolongación hacia el sur por el cauce del arroyo Casas

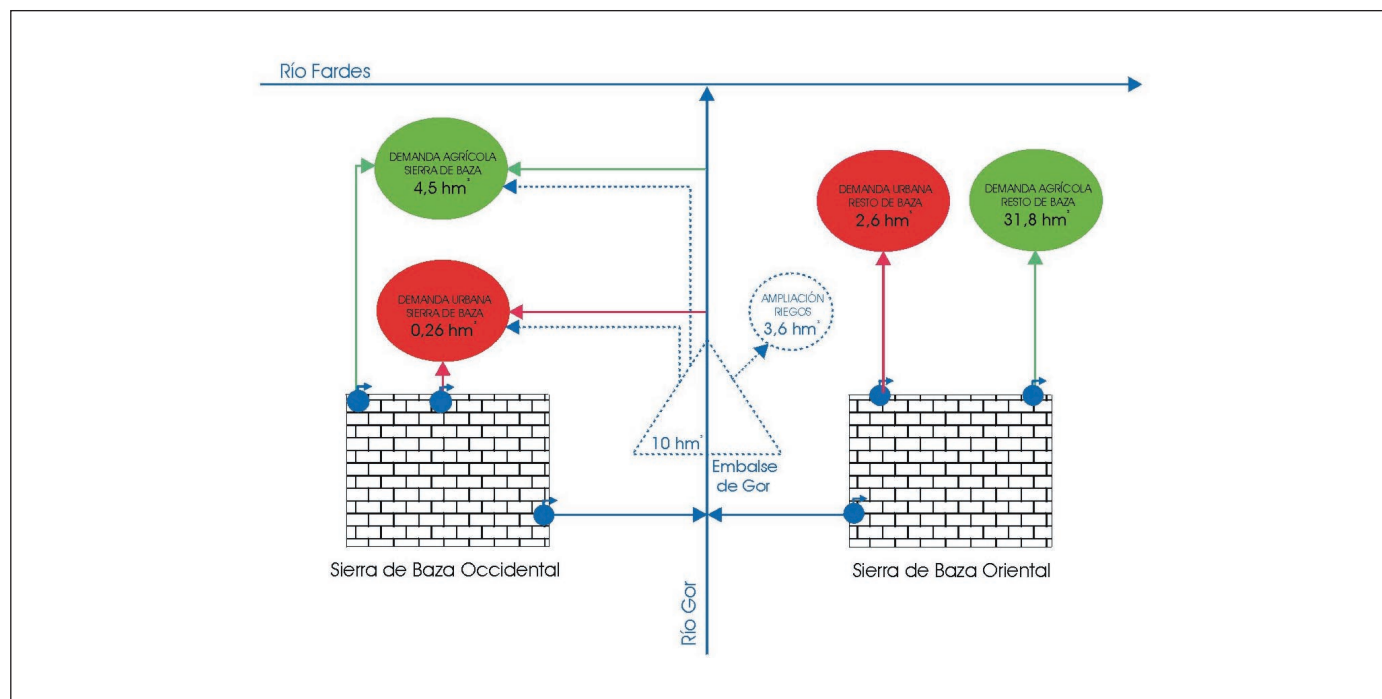


Fig. 1. Esquema simplificado del subsistema de gestión de recursos hídricos de la zona de la Sierra de Baza y de la relación entre sus componentes. Se incorpora el futuro embalse de Gor así como las demandas a las que servirá

Fig. 1. Simplified scheme of the Sierra de Baza water resources management subsystem and the relationships between its components. Gor reservoir and water demands that it will supply are included

de Don Diego. Estos dos sectores son el Sector Oriental y el Sector Occidental (ITGE, 1997).

Los materiales permeables que conforman el acuífero están constituidos por los tramos dolomíticos y calcáreos del Trías medio-superior de cuatro mantos de cabalgamiento alpujárrides que, de más profundo a más somero, se denominan: Santa Bárbara, Quintana, Blanquizares y Hernán-Valle. El acuífero también engloba los mármoles del manto nevado-filábride infrayacente, que afloran en el cauce del río Gor y en el extremo meridional del área de estudio.

El sustrato impermeable lo forman esquistos nevado filábrides, aunque existen diferentes niveles impermeables (fundamentalmente filitas) que independizan a los diferentes mantos alpujárrides. No obstante en algunas zonas, por efectos tectónicos, se ponen en contacto tramos permeables de diferentes mantos (ITGE, 1997).

El Sector Occidental no tiene apenas explotación. El único sondeo significativo es el que sirve de abastecimiento a la población de Hernán-Valle. El Sector Oriental se encuentra más explotado, con abundantes extracciones por bombeo, del orden de 1045 l/s, destinadas a riego y abastecimiento urbano (IGME, 2001b). Ambos sectores se encuentran fuertemente compartimentados con estructuras bastante complejas, por lo que en el ámbito del modelo, tras analizar las características hidrológicas en cada sector, los elementos de consumo de agua y las particularidades geográficas de la región, se ha considerado que existen cuatro subsectores, asimilables al elemento "acuífero", tras una serie de simplificaciones necesarias para elaborar un modelo sencillo y flexible del subsistema de gestión (figura 2). Las consideraciones apuntadas anteriormente no responden estrictamente a puntualizaciones de tipo hidrogeológico, sino a simplificaciones conceptuales que es necesario realizar para poder afrontar con una cierta garantía la ejecución del modelo.

Dentro del Sector Occidental (figura 2), y en el ámbito del modelo, se han establecido dos acuíferos diferenciados. El primero se ha denominado Sector Occidental 1 y a grandes rasgos, coincide con la cuenca de aportación al embalse de Gor dentro del Sector Occidental. Drena hacia el arroyo Casas de Don Diego a través de pequeños manantiales. El segundo acuífero, al que se ha denominado Sector Occidental 2, descarga a través del manantial de Hernán-Valle.

En el Sector Oriental (figura 2) se han considerado a su vez dos zonas denominadas Sector Oriental 1 y Sector Oriental 2. En el Sector Oriental 1, donde se encuentra el nacimiento del río Gor, las principales surgencias drenan hacia el cauce del río Gor, y así se ha considerado en el modelo. Con respecto al Sector

Oriental 2, tiene una serie de surgencias importantes que constituyen el flujo base de sus descargas, entre ellas cabe destacar Siete Fuentes, San Juan, Fuente Grande, La Alcanacia y Tres Fuentes.

En el esquema inicial planteado, los valores de los volúmenes máximos de bombeo que se han utilizado para la modelación se han determinado a partir de los valores máximos de agua subterránea extraída de los sondeos y de datos verbales proporcionados por el personal de los ayuntamientos. En concreto, los valores de bombeo considerados han sido 5 l/s para el Sector Occidental 1, 1,25 l/s para el Sector Occidental 2 y 1045 l/s para el Sector Oriental 2 (IGME, 2001b).

Entrada de agua al subsistema: aportaciones

Dentro del subsistema de explotación de la Sierra de Baza se pueden distinguir dos grupos de aportaciones: un primer grupo formado por aquellas aportaciones que se incorporan al cauce del río Gor, y un segundo grupo constituido por aquellos recursos procedentes de los principales manantiales de la unidad que no vierten al río Gor.

A lo largo del cauce del río Gor se integran aportaciones de origen subterráneo, procedentes del acuífero de Sierra de Baza, y aportaciones procedentes de la escorrentía superficial que se pierden en su mayoría para el subsistema. Esto es así porque actualmente la escorrentía superficial en la cuenca no tiene ningún tipo de regulación, confluyendo al cauce del Gor a través de una serie de pequeñas ramblas. En lo referente a la aportación subterránea hay muchos pequeños manantiales en la cabecera de la cuenca que están captados para diversos usos, aunque no se aprovecha la totalidad de los recursos. Un ejemplo de esto es el Nacimiento del río Gor, parte de cuyos recursos se captan y almacenan en el depósito del pueblo de Gor, desviándose, de nuevo, el sobrante al cauce del Gor tras pasar por la fuente pública de la población, conocida como Fuente de los Siete Caños.

En la restitución de las aportaciones que drenan al cauce del río Gor se han diferenciado la escorrentía superficial y las aportaciones subterráneas provenientes del Sector Oriental y del Sector Occidental. Para la realización de este estudio se ha partido de los datos aportados en el proyecto de construcción de la presa de Gor (DGOH, 1991). La aportación media subterránea de estos sectores es de 2,93 hm³/a en el caso del Sector Oriental y 1,60 hm³/a en el Sector Occidental, aunque dichos aportes son irregulares, oscilando entre 0,38 hm³/a y 7,75 hm³/a en el caso del primero y entre 0,21 hm³/a y 4,25 hm³/a en el caso del

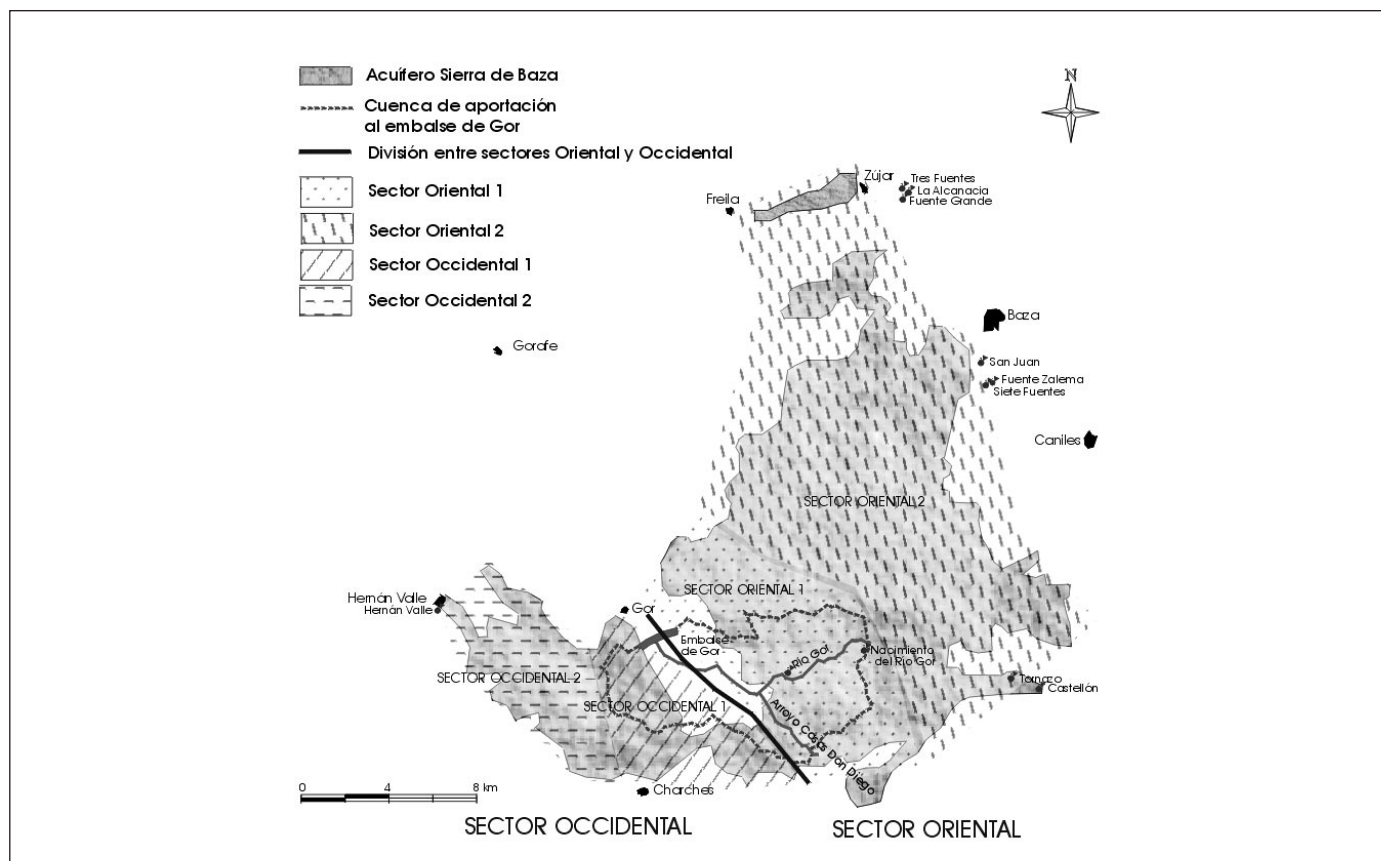


Fig. 2. Sectores acuíferos diferenciados en la modelización de la gestión del subsistema de explotación Sierra de Baza
 Fig. 2. *Aquifer sectors considered in the modelization of the Sierra de Baza water resources management subsystem*

segundo. Con respecto a la escorrentía superficial, la aportación media es del orden de 1,65 hm³/a oscilando entre 0,03 hm³/a y 6,86 hm³/a (IGME, 2001b).

Con respecto a las aportaciones provenientes de los principales manantiales de la unidad que no drenan al cauce del río Gor, cabe indicar que poseen una importancia capital en la satisfacción de las demandas, principalmente agrícolas, de varios pueblos próximos a la unidad acuífera como Baza o Freila. Algunos de los principales manantiales, cuyos recursos proceden del Sector Oriental de la Sierra de Baza, son Siete Fuentes (6-7 hm³/a), San Juan (2-3 hm³/a), Fuente Zalema (1-1,5 hm³/a), Fuente Grande (1-2 hm³/a), Tres Fuentes (0,5-1 hm³/a), Alcanacia (0,5-1 hm³/a), Castellón (1,5-2 hm³/a) y Tornazo (1 hm³/a). En el Sector Occidental únicamente es destacable el manantial de Hernán Valle (IGME, 2001b; ITGE, 2000). Las aportaciones de estos manantiales, que se encuentran situados en los límites de los afloramientos permeables del acuífero de la Sierra de Baza, se han calculado a partir de los únicos datos disponibles (ITGE-DPG, 1990) correspondientes a medidas pun-

tuales de afloramientos, que abarcan un período de tiempo no continuo que se extiende desde 1968 hasta la actualidad.

Con respecto a los manantiales de Siete Fuentes y San Juan, situados a cierta distancia de los límites que cartografiaban los afloramientos calizos de la Sierra de Baza (figura 2) cabe indicar que son importantes surgencias que se consideran pertenecientes indistintamente a la Unidad Hidrológica de la Sierra de Baza y a la Unidad Hidrológica de Baza-Caniles (ITGE-DPG, 1990; ITGE-CHG, 1993; ITGE 2000; IGME 2001a). De hecho, dado que gran parte de los recursos de la unidad de Baza-Caniles los aporta subterráneamente la unidad de la Sierra de Baza, se propone (ITGE, 2000) una nueva interpretación hidrogeológica en la que se considera conjuntamente el Sector Oriental de la Sierra de Baza y la subunidad pliocena de la unidad de Baza-Caniles. En el estudio de gestión expuesto en el presente artículo se ha considerado que los recursos de estos manantiales provienen íntegramente de la Sierra de Baza.

En la figura 3 se han representado todas las apor-

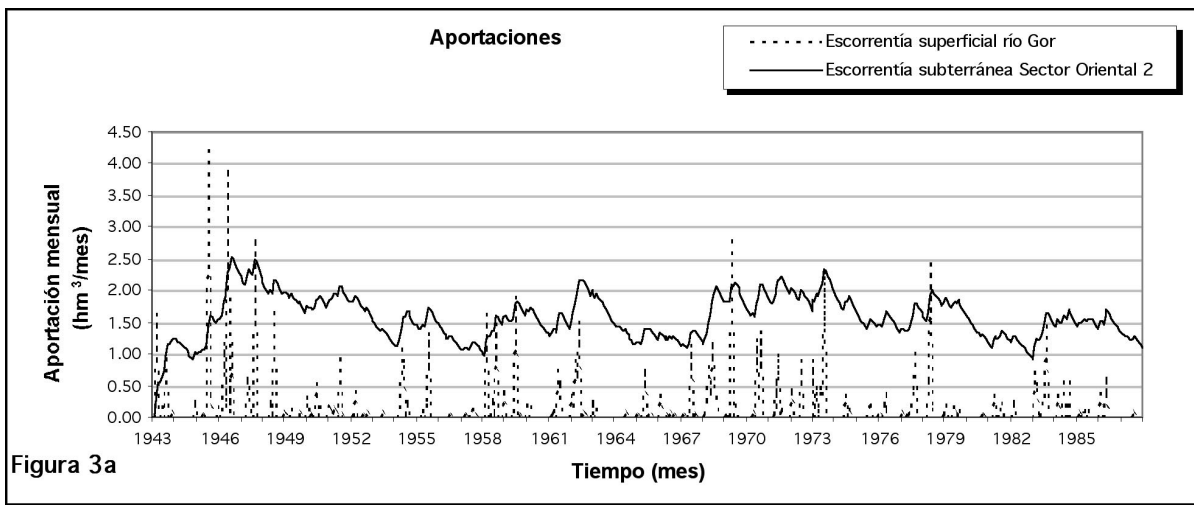


Figura 3a

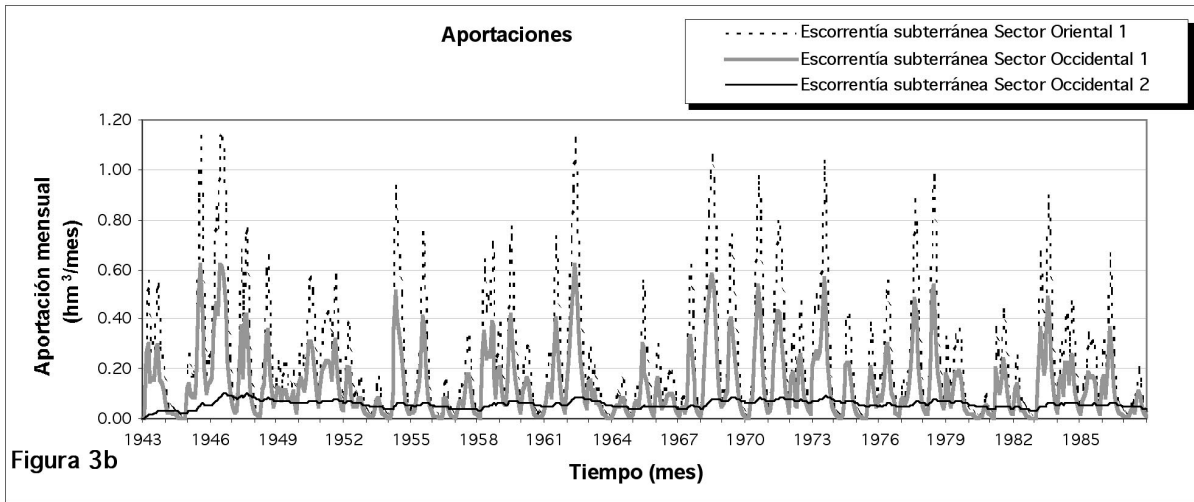


Figura 3b

Figs. 3a y 3b. Escorrentía superficial calculada para la cuenca vertiente al futuro embalse de Gor, y escorrentía subterránea de los distintos sectores en que se ha dividido el acuífero de la Sierra de Baza
 Figs. 3a and 3b. Calculated surface run-off for the flowing river basin to the future Gor reservoir and base flow of the different sectors in which the Sierra de Baza has been divided

taciones calculadas. La figura 3a muestra la escorrentía superficial calculada en la cuenca vertiente al futuro embalse del río Gor, así como la escorrentía subterránea calculada proveniente de los manantiales del Sector Oriental 2 (figura 2). La figura 3b muestra la escorrentía subterránea procedente del Sector Occidental 2 (manantial de Hernán-Valle, figura 2), así como la escorrentía subterránea procedente de los sectores Oriental 1 y Occidental 1, que vierten al cauce del río Gor. La aportación media procedente de los manantiales del Sector Oriental 2 es del orden de 19,5 hm³/a, oscilando entre 8,5 hm³/a y 27 hm³/a. Por otro lado, la aportación media calculada para el Sector Occidental 2 es de 0,7 hm³/a (IGME, 2001b).

Destino del agua: Demandas

En el esquema de la Sierra de Baza se han agrupado las demandas agrícolas a escala municipal, incluyéndose en las mismas únicamente aquella parte de la demanda satisfecha con recursos hídricos procedentes del subsistema de explotación Sierra de Baza, ya que hay una parte muy importante de la misma que se satisface con recursos de la unidad hidrogeológica Baza-Caniles que se sitúa inmediatamente al este de la Sierra de Baza. A efectos del modelo se han considerado siete elementos de demanda agrícola.

Las demandas urbanas se han agrupado en municipios (en el caso de que todo el municipio se abas-

tezca con recursos hídricos de la Sierra de Baza, circunstancia que se da en el municipio de Gor) o en núcleos de población (en el caso contrario). Se han considerado cinco elementos de demanda urbana en el esquema de simulación.

La demanda urbana total se ha estimado en 2,850 hm³/a, correspondiendo 0,266 hm³/a al área de Gor y Hernán-Valle, y 2,584 hm³/a al área de la Hoya de Baza. En cuanto a la demanda agrícola se ha estimado en 36,270 hm³/a, de los que 4,448 hm³/a corresponden al área de Gor y 31,822 hm³/a al área de la Hoya de Baza. En la tabla 1 se desglosan los elementos de demanda considerados en el modelo. Es de destacar que el mayor volumen de demanda procede de campos de labor y poblaciones no situados sobre los afloramientos de la unidad de la Sierra de Baza, siendo la más cuantiosa la correspondiente al municipio de Baza, tanto en lo referente a demanda urbana como agrícola (IGME, 2001b).

Es de destacar que en toda la región la agricultura constituye una actividad económica esencial, siendo la única fuente de ingresos o la actividad principal para una parte importante de la población.

Conexión de elementos. Conducciones

Los diversos elementos del subsistema se encuentran conectados entre sí mediante conducciones, entendiéndose como tales aquellos tramos lineales, tanto naturales como artificiales, en los que se transporta el agua y que, en determinadas circunstancias, pueden ceder o recibir agua de los acuíferos.

En las condiciones actuales no hay dentro del subsistema ninguna conducción principal que una entre sí distintos elementos del mismo y que resulte esencial para la modelación. A este respecto únicamente podría mencionarse la captación efectuada en el Nacimiento del río Gor para abastecimiento de la

población del mismo nombre, que no ha sido necesario modelizar individualmente, ya que su actuación queda reflejada dentro del subsistema de gestión estableciendo prioridad de abastecimiento para la demanda urbana de Gor.

Por otro lado, el considerar toda la red de distribución de los recursos hídricos, en ocasiones no bien conocida hasta los puntos de demanda agrícola, obligaría a disgregar ésta en Comunidades de Regantes, lo que llevaría a un nivel de detalle excesivo para los objetivos de gestión a escala municipal que se han considerado.

Esquema inicial de la simulación de la gestión de los recursos hídricos de la Sierra de Baza

En la figura 4 se muestra el esquema de gestión básico definido con el programa SIMGES que se ha denominado esquema 0. En el mismo se han establecido unas condiciones que intentan reflejar la situación actual. Se ha intentado simplificar al máximo la relación entre los distintos componentes, especialmente en lo relativo a las demandas, obviando de este modo la casi siempre elevada dispersión que presentan los núcleos de demanda, principalmente en lo referente a las demandas agrícolas (distribución de cultivos, Comunidades de Regantes, fuentes de suministro). El esquema de partida planteado consta de 14 nudos, de los cuales uno es el nodo final por donde se pierden recursos hídricos para el subsistema, de 13 conexiones entre nudos, de 5 entradas de recursos naturales de agua, de 12 demandas consuntivas, de las que 5 corresponden a demandas urbanas y 7 a demandas de riego, de 3 acuíferos o sistemas acuíferos a los que se ha denominado Sector Occidental 1, Sector Occidental 2 y Sector Oriental 2 y de un retorno de agua correspondiente al agua residual de Baza.

La simulación del subsistema de gestión de la

Elemento de demanda	Demanda (hm ³ /año)	Elemento de demanda	Demanda (hm ³ /año)
Urbana Baza y Baúl	2,279	Riegos Baza	25,610
Urbana Charches	0,051	Riegos Caniles	3,290
Urbana Gor	0,154	Riegos Freilla	0,479
Urbana Hernán-Valle	0,061	Riegos Gor	2,257
Urbana Zújar	0,305	Riegos Gorafe	1,578
		Riegos Hernán-Valle	0,613
		Riegos Zújar	2,443
TOTALES	2,850	TOTALES	36,270

Tabla 1. Demandas anuales consideradas para la simulación de la gestión de la Sierra de Baza
 Table 1. Annual demands considered for the simulation of the management of the Sierra de Baza

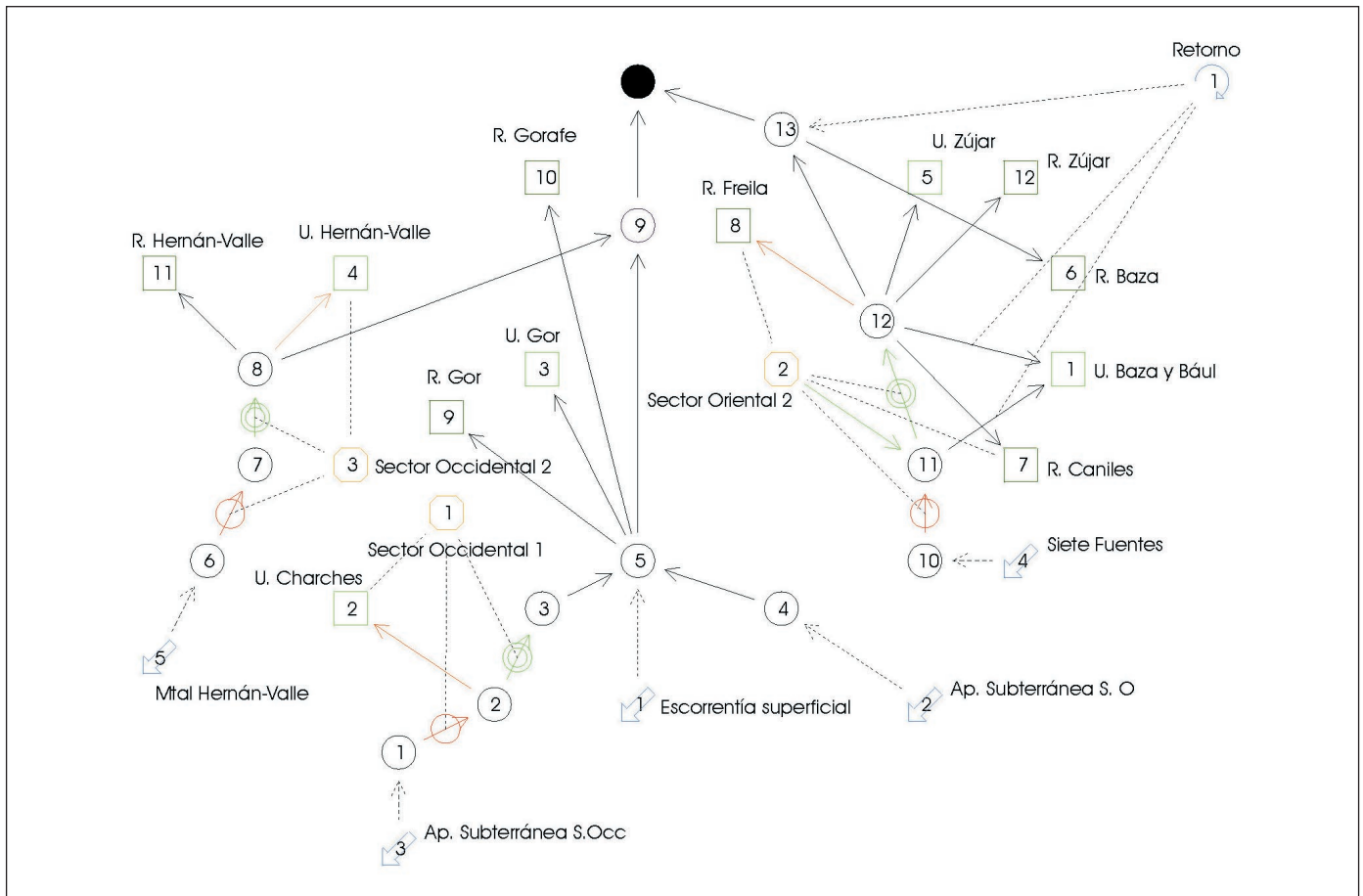


Fig. 4. Esquema inicial (esquema 0) utilizado para la simulación de la gestión de los recursos hídricos de la Sierra de Baza
 Fig. 4. Initial scheme (scheme 0) used for the simulation of the water resources management of the Sierra de Baza

Sierra de Baza se ha realizado para un período de 43 años, comprendidos entre los años hidrológicos 1945-46 y 1987-88, en el que se dan todas las situaciones hidrológicas y climatológicas posibles: años de aportaciones extraordinarias (aislados y consecutivos), períodos de sequía extrema (cortos y largos), años medios, etc. La elección de este período ha venido condicionada fundamentalmente por los datos meteorológicos existentes para calcular las distintas aportaciones (IGME, 2001b).

Bajo las condiciones anteriormente descritas se considera que una vez se ha ejecutado el programa de simulación de la gestión SIMGES el resultado más importante se relaciona con la satisfacción de las demandas, ya que en algunas demandas agrícolas, concretamente Gor y Gorafe, se pueden originar fallos en más del 40 % de los meses considerados. Esto está en concordancia con los datos aportados en CAPJA (1999), donde se considera que los regadíos en Gor y Gorafe carecen de garantía de suministro,

entendiéndose como tal el grado de satisfacción de la demanda de riego a través de la regulación y disponibilidad de agua, independientemente de las condiciones climatológicas anuales (CAPJA, 1999). Por otro lado, la garantía volumétrica, es decir, el volumen de agua servida con relación al volumen de agua demandada, es aun menor, especialmente en aquellos elementos con mayor demanda.

Merecen una atención especial los riegos de Baza, que presenta una garantía mensual del orden del 60 % y una garantía volumétrica en torno al 20 %. Estas garantías tan bajas se explican por el grave problema de suministro que presenta la zona (CAPJA, 1999), y porque el valor de demanda empleado engloba a todas las hectáreas declaradas de regadío por las Comunidades de Regantes implicadas, esto es, las potencialmente regables, en lugar de incorporar únicamente las realmente regadas.

En general, las demandas urbanas presentan unas garantías más altas, cercanas al 100 % en la mayoría

de los casos, con la excepción de Hernán-Valle, con garantías del orden del 60 % debido a la limitada capacidad de extracción (45 l/s durante 6 h/d) de su pozo de abastecimiento, pero que es fácilmente subsanable.

En conjunto, la media anual de agua subterránea bombeada en los diferentes sectores acuíferos considerados es de 3,493 hm³/a, correspondiendo 3,406 hm³/a al Sector Oriental 2.

Con las condiciones impuestas, y debido a las características climáticas que intervienen en la generación de los recursos hídricos de la zona, se producen unas pérdidas (salidas) de agua en el subsistema del orden de 5,141 hm³/a de media por el cauce del río Gor y desde Hernán-Valle, y un volumen de 7,678 hm³/a en el sector de la Hoya de Baza.

En la figura 5 se presentan, resumidos, algunos de los resultados correspondientes al esquema inicial de gestión que afectan a las demandas, tanto agrícolas como urbanas, y a las pérdidas (salidas) de agua del subsistema. Así mismo, también contempla los resultados obtenidos para otros esquemas planteados dentro del presente trabajo que se analizan en un apartado posterior.

Esquemas planteados y comparación de resultados

Partiendo del esquema inicial anteriormente descrito se ha realizado una serie de modificaciones que permiten simular diversas alternativas de gestión. Se ha realizado un total de 5 esquemas distintos cuyos resultados ofrecen un conjunto de orientaciones sobre diferentes posibilidades de gestión de los recursos que se pueden plantear en la Sierra de Baza. A continuación se describen estos esquemas.

Esquema 1

Considera el ajuste entre la demanda real y teórica de riego en Baza y Caniles y la mejora de la infraestructura de abastecimiento de Hernán-Valle.

En el esquema inicial, las demandas de riego de Baza y Caniles corresponden a aquellas hectáreas que se han de regar exclusivamente con recursos de la Sierra de Baza, englobando todas las hectáreas declaradas de regadío por las Comunidades de Regantes. En la modificación efectuada a este esquema se ha empleado la demanda generada por aquellas hectáreas realmente regadas. También se ha simulado la mejora de la infraestructura de abastecimiento urbano de Hernán-Valle, permitiendo que el núcleo urbano capte recursos del manantial de

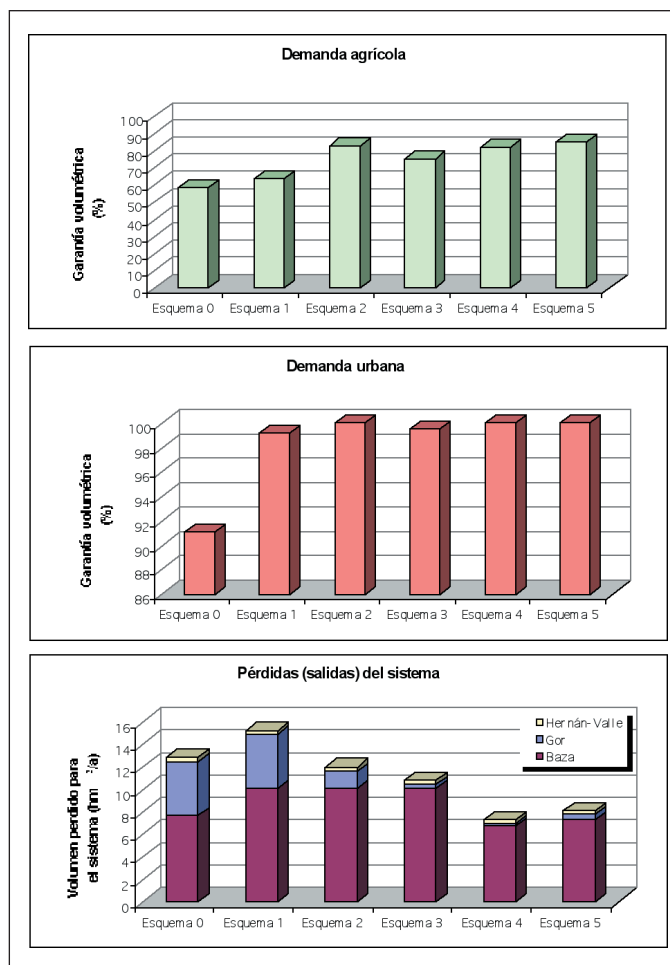


Fig. 5. Resumen de los resultados obtenidos en lo referente a garantías volumétricas y pérdidas (salidas) de agua del subsistema para los distintos esquemas planteados

Fig. 5. Summary of the results obtained for volumetric guarantees and losses (outputs) of water of the subsystem for the different proposed schemes

Hernán-Valle como complemento al bombeo que actualmente realiza.

Los resultados muestran, como era de esperar, un aumento en las garantías, tanto volumétricas como mensuales, de los elementos de riego de la Hoya de Baza. Por otra parte, la demanda urbana de Hernán-Valle consigue garantías del 100 % sin que se afecte apenas a las garantías de la demanda agrícola del municipio.

En conjunto, el agua subterránea bombeada es de 2,849 hm³/a, correspondiendo 2,773 hm³/a al Sector Oriental 2, que se reduce respecto al esquema 0. Como era de esperar, aumentan las pérdidas (salidas) de agua en el subsistema en la comarca de la Hoya de Baza, que pasan a ser del orden de 10,095 hm³/a.

Esquema 2

Considera la incorporación del embalse de Gor al sistema de recursos hídricos actual.

En la Sierra de Baza está prevista la construcción de un embalse en el río Gor, con una capacidad de 10,32 hm³ (figura 1), que se utilizará como elemento regulador para aprovechar las frecuentes avenidas de agua que tienen lugar en la zona, almacenando los excedentes de modo que se puedan ir aprovechando progresivamente de acuerdo con la demanda. Los recursos regulados por este embalse se utilizarán principalmente para la mejora de las actuales hectáreas de regadío en Gor y Gorafe y ampliación de otras 600 ha previstas en la Propuesta del Plan Hidrológico del Guadalquivir. El embalse de Gor, proyectado 2 km aguas arriba de la población de Gor recoge las aportaciones naturales de una cuenca hidrográfica de 59,2 km² (BOE, 1999; DGOH, 1991).

Para efectuar esta simulación se ha partido del esquema 1, modificándose únicamente la parte del modelo correspondiente al cauce del río Gor donde actúa el embalse.

Los resultados obtenidos muestran unas mejoras muy significativas en todas las demandas del área de Gor y Gorafe, consiguiéndose garantías del 100 %. En la mayor parte del período considerado, el embalse muestra un estado de almacenamiento satisfactorio, con un máximo del orden de los 9,5 hm³/a y un mínimo de 2,7 hm³/a, que permite considerar que se podría satisfacer una demanda mayor sin afectar a las garantías de las demandas actualmente presentes en la zona. Para todo el subsistema se refleja una mejora en la garantía de suministro derivada de una mayor regulación de los recursos hídricos que proporciona el embalse. Asimismo se reduce el volumen de recursos perdidos por el subsistema, gracias al mejor aprovechamiento que se produce en el área de Gor, pasando a ser del orden de 2 hm³/a, lo que supone un volumen regulado en torno a 3 hm³/a con respecto al esquema de partida.

Esquema 3

Considera la ampliación de riegos en Gor y Gorafe.

Parte del esquema 2, incorporando al subsistema la nueva demanda que supone la ampliación del regadío en Gor y Gorafe, para las 600 ha previstas en el Plan Hidrológico del Guadalquivir. Sobre este esquema se han efectuado diversas simulaciones con hipótesis de ampliación de riego correspondientes a un rango de variación que fluctúa entre 100 y 600 ha, para intervalos de 100 ha.

Con la incorporación de la nueva demanda de 3,6 hm³/a, correspondiente a una ampliación de regadío de 600 ha, se observa una disminución notable de las garantías respecto al esquema 2. No obstante, en relación al esquema 1, el subsistema continúa experimentando una notable mejora en las garantías gracias a la regulación del embalse. Éste presenta, durante el período de tiempo simulado, una disminución en su volumen medio embalsado. Al haber una mayor demanda, el embalse queda durante mayor tiempo vacío, existiendo un mayor volumen del mismo disponible para almacenar agua si viene una avenida, lo que permite un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos al reducir las salidas del subsistema (pérdidas) por el cauce del Gor, que pasan a ser del orden de 0,35 hm³/a.

Las simulaciones complementarias, realizadas a partir de diversas hipótesis de ampliación de regadío, muestran que para conseguir garantías cercanas al 100 % en el área de Gor, la ampliación debe situarse en torno a las 100 ha.

Esquema 4

Considera el apoyo con bombeos adicionales

Parte del esquema 3 y plantea la posibilidad de aumentar la regulación en el Sector Occidental 1 de la Sierra de Baza introduciendo una serie de bombeos adicionales que actúen de forma complementaria al embalse. Se ha considerado un caudal máximo de bombeo para todo el conjunto del orden de 90 l/s, acorde con las posibilidades que en principio presenta el sector.

Así mismo, también plantea la posibilidad de realizar una serie de bombeos adicionales de apoyo a los regadíos del Sector Oriental 2 y al embalse de Gor en el Sector Oriental 1. En el primer caso se considera un caudal máximo de extracción de 850 l/s, y en el segundo de 170 l/s. En ningún caso se han establecido límites para el funcionamiento de los bombeos, entrando en funcionamiento estos cuando el subsistema superficial no es capaz de satisfacer la demanda. En la figura 6 se presenta el estado de almacenamiento de los Sectores Oriental 1 y 2 y la afección a sus manantiales al incorporar bombeos adicionales al subsistema.

Se observa en el Sector Oriental 1 que en ocasiones se secan sus manantiales, no obstante, en períodos plurianuales vuelven a producirse descargas, con lo que en principio parece tener capacidad de recuperación suficiente para sustentar esta alternativa de gestión. Este comportamiento es extensivo al Sector Occidental 1.

Con respecto al Sector Oriental 2 se observa un comportamiento diferente al de los sectores acuíferos situados en la cabecera del embalse de Gor. Al iniciarse las extracciones se provoca una respuesta inmediata en las salidas de manantial, que decrecen notablemente y llegan a secarse, no obstante, el caudal se recupera prácticamente en el mismo año hidrológico al cesar las extracciones en los meses de invierno.

Los resultados obtenidos muestran un ligero aumento de la garantía volumétrica con respecto al esquema 3, pasando del 73 % en las demandas del área de Gor al 77 %.

Al igual que se hizo para el esquema 3 se ha efectuado una serie de simulaciones complementarias en las que se ha variado el número de hectáreas de que consta la ampliación de regadío en Gor. Con las nuevas condiciones impuestas se consigue, con una ampliación de 300 ha, una garantía volumétrica conjunta del orden del 92 %, lo que constituye una mejora del 5 % con respecto a la hipótesis planteada en el esquema 3.

Ahora bien, si en el área de Gor se establecen unos bombeos bien, si en el área de Gor se establecen unos bombeos con un volumen de extracción tal que se consigan garantías del 100 % en todas las demandas del área incluyendo la ampliación de regadío de 600 ha, se obtienen unos resultados que muestran una

disminución continua del volumen almacenado en los acuíferos de cabecera, sin que se lleguen a recuperar en ningún momento. Esto sugiere que, en principio, los recursos hídricos disponibles en el área de Gor, no parecen suficientes para sostener una ampliación de regadío de 600 ha.

Esquema 5

Contempla la disminución de la demanda mediante mejoras técnicas y de consumo.

En la Hoya de Baza y en la región del Gor se utiliza el riego por gravedad en la mayor parte de los campos, siendo minoría aquellos que utilizan sistemas localizados de riego, que presentan un menor consumo de agua (CAPJA, 1999). Por otro lado, en el 90 % de los casos, la red de distribución presenta un estado entre malo y regular, lo que genera grandes pérdidas.

Partiendo del esquema 4 se ha realizado una simulación suponiendo una disminución del 10 % de las demandas, que tendría efecto a partir de la implantación de políticas de ahorro, mejoras en las infraestructuras y cambios en los sistemas de utilización del agua hacia técnicas menos consumistas que las actuales.

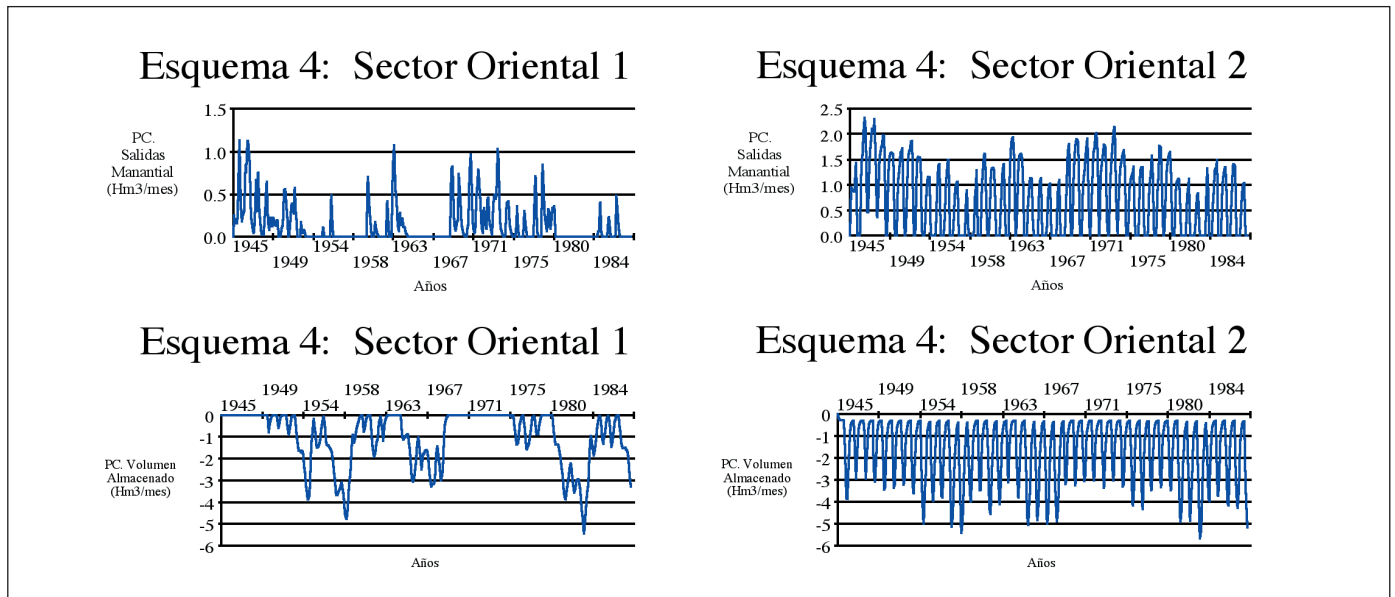


Fig. 6. Salida original del programa SIMGES representando el estado de almacenamiento del acuífero Sector Oriental 1, situado en la cabecera del embalse de Gor, y el correspondiente al Sector Oriental 2 así como la afección a los mananciales al incorporar bombeos adicionales

Fig. 6. Original graphics of computer program SIMGES representing the storage of the Eastern Sector 1 aquifer, located in the catchment basin of the Gor reservoir, and corresponding to Eastern Sector 2 as well as the effects to the springs when incorporating additional pumping

Como era de esperar, estos cambios mejoran notablemente las garantías, consiguiéndose en el área del río Gor una garantía volumétrica conjunta del orden del 85 % y garantías mensuales del orden del 90 %. La demanda que tiene un mayor peso dentro del subsistema, que corresponde a los riegos de Baza, también mejora notablemente sus garantías, obteniéndose una garantía mensual del 83 % y una garantía volumétrica del orden del 76 %. El incremento que tiene lugar en la relación recursos-demandas, provoca que las pérdidas (salidas de agua del subsistema) se incrementen ligeramente en todas las áreas.

Conclusiones y recomendaciones

La formulación de las diversas hipótesis que se han llevado a cabo han aproximado los siguientes resultados:

- La introducción en el esquema del embalse de Gor (esquema 2) permite obtener garantías del 100 % en las demandas del área implicada, obteniéndose un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos que permite hacer frente a una posible ampliación del regadío.
- La ampliación del regadío a 600 ha en el área de Gor (esquema 3), da lugar a una disminución en la garantía de las demandas implicadas, pasando a tener la demanda urbana de Gor una garantía mensual del orden del 96 % y las demandas agrícolas una garantía mensual del orden del 80 % y volumétrica del orden del 73 %. Las simulaciones complementarias realizadas sobre el esquema 3, en las que se ha variado el número teórico de hectáreas de regadío que contempla el Plan Hidrológico del Guadalquivir, muestra que para conseguir garantías en torno al 100 % en las demandas implicadas se precisa que la ampliación de regadío se sitúe en tan sólo 100 ha.
- Los resultados mostrados por el esquema 4, en el que se incorporan al subsistema bombeos adicionales en los acuíferos de cabecera del embalse de Gor, indican que:
 - Se consigue un aumento de la garantía volumétrica de las demandas implicadas del orden del 4 % con respecto al esquema 3, situándose en una garantía volumétrica conjunta del 77 %.
 - Los bombeos en los acuíferos de cabecera serían relativamente intensos; del orden de 90 l/s en el Sector Occidental 1 y 170 l/s en el Sector Oriental 1.
 - Como resultado de una serie de simulaciones complementarias orientadas a la consecución del 100 % de garantía en el área, se puede con-

cluir que los recursos hídricos disponibles en la zona del Gor, tanto superficiales como subterráneos, no parecen suficientes para sostener una ampliación de hectáreas de regadío en la cuantía prevista en el Plan Hidrológico del Guadalquivir (600 ha).

- Como dato orientativo, se comienzan a obtener unas garantías volumétricas más o menos razonables, situadas en torno al 92 %, con unas 300 ha de ampliación, si se explotan tanto los recursos superficiales como los subterráneos.
- Como apoyo a los riegos de la Hoya de Baza se ha establecido en el esquema 4 una serie de bombeos adicionales, que se sitúan en el Sector Oriental 2. Los resultados más significativos son:
 - Los bombeos que sería preciso establecer alcanzarían una cuantía máxima del orden de 850 l/s.
 - Los bombeos adicionales que sería preciso implantar proporcionan una disminución de las salidas naturales del subsistema del orden de 3 hm³ con respecto a esquemas anteriores, pero que no afectaría a los acuíferos ya que estos se recuperan periódicamente.
 - Los bombeos adicionales proporcionan un aumento notable de las garantías de las demandas, cercanas al 100 % en muchos casos.
 - En la demanda de riego de Baza, la mayor del subsistema, se consigue una garantía volumétrica del orden del 70 % y una garantía mensual superior al 80 %. Esto supone una gran mejora con respecto a los valores de partida.
- Como conclusión general al esquema 4 cabe decir que la explotación de las aguas subterráneas mediante bombeos para integrarlas en el subsistema, proporciona una mejora en las garantías de suministro y que el uso de los acuíferos únicamente debería ser restringido por motivos de protección frente a la sobreexplotación.
- El esquema 5, en el que se incluyen todas las actuaciones previstas en el esquema 4, contempla, además, una disminución de las demandas del 10 %. Como medidas de ahorro se podría considerar la reparación y mantenimiento de las conducciones de transporte y distribución de los recursos hídricos del subsistema y la transformación progresiva de los sistemas de riego en la zona (en su inmensa mayoría por gravedad) hacia otros sistemas con una mayor eficiencia de riego como puede ser el localizado. Con este ahorro de agua se reduce la demanda y aumentan las disponibilidades de agua en el tiempo, por almacenamiento en el embalse de Gor y reducción del vaciado de acuíferos, con lo que aumenta la garantía. Algunos

de los resultados más significativos en comparación con el esquema 4 son:

- Se obtiene una garantía volumétrica conjunta en el área de Gor del orden del 85 %.
- La demanda de más peso del subsistema, riego de Baza, alcanza una garantía mensual del orden del 83 % y volumétrica en torno al 76 %.

• Como conclusión final cabe indicar, a la vista de los resultados obtenidos, que la solución a arbitrar en la gestión del subsistema, debe contemplar varios de los aspectos considerados en las diversas simulaciones, como son la construcción del embalse de Gor, fomentar políticas y medidas de ahorro del agua en los usos agrícolas y urbanos, así como incrementar de manera sostenible el bombeo de aguas subterráneas. Otro aspecto importante a considerar es no incrementar de modo abusivo la demanda agrícola en el área de Gor, por lo que la ampliación de regadío considerada en el Plan Hidrológico del Guadalquivir debe situarse en un rango asumible por el subsistema.

Por último, comentar que aunque este estudio se ha realizado con el mayor rigor posible de acuerdo con la información, los datos y las herramientas de las que se disponían, existen numerosas incertidumbres derivadas fundamentalmente de las estimaciones realizadas a partir de los datos, especialmente los relacionados con las descargas de los principales manantiales, y de la siempre necesaria simplificación a la hora de abordar la elaboración de un modelo. Por ello, es importante recalcar que es precisa una actualización permanente del trabajo realizado y sí resulta necesario una reorientación de acuerdo con el conocimiento que se vaya adquiriendo y de los distintos cambios que se produzcan en el subsistema que puedan afectar a la gestión de sus recursos hídricos.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la oficina del IGME en Granada, en las personas de Juan Carlos Rubio Campos, Antonio González Ramón, Rafael Ortega Vargas y Tomás Peinado Parra, el apoyo y la información proporcionada para la elaboración de los diversos estudios que han dado lugar a este artículo.

También quieren mostrar su gratitud a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, por la valiosa información proporcionada, y a los diferentes Ayuntamientos de la región de la Sierra de Baza la colaboración y las facilidades prestadas para la realización de los diversos estudios que se llevaron a cabo.

Igualmente, al Dr. J. Elorza y a un revisor anónimo por sus acertados comentarios y recomendaciones.

Referencias

- Andreu, J. y Capilla, J. 1993. El modelo de gestión de cuencas SIMGES. En: Andreu, J. (ed.), *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*. CIMNE, Barcelona, 298-331.
- Andreu, J., Capilla, J. y Cabezas E. 1994. Los Sistemas Soportes de Decisión en la planificación y gestión racionales de los recursos hídricos. *Congreso Nacional del Agua y Medio Ambiente*, Zaragoza, 95-106.
- Andreu, J., Capilla, J. y Ferrer, J. 1992. *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Manual del Usuario. Versión 2.0*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 81 pp.
- Andreu, J., Capilla, J. y Sanchis, E. 1993. Sistema Soporte de Decisión basado en ordenador para planificación de sistemas complejos de recursos hídricos. En: Andreu, J. (ed.), *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*. CIMNE, Barcelona, 372-391.
- Boletín Oficial del Estado (BOE) 1985. *Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas*. BOE núm. 189 de 8 de agosto.
- Boletín Oficial del Estado (BOE) 1999. *Orden de 13 de agosto sobre Normativa del Plan Hidrológico de Cuenca del Guadalquivir*. BOE núm. 205 de 27 de agosto.
- Boletín Oficial del Estado (BOE) 2001. *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. BOE núm. 176 de 24 de julio.
- CAPJA 1999. *Inventario y caracterización de los regadíos de Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Formato CD-ROM.
- Castaño, S. y Murillo, J.M. 2001. Papel de los recursos hídricos subterráneos en el esquema general del suministro conjunto de agua a la comarca de la Marina Baja (Alicante). *Boletín Geológico y Minero*, 112, 77-93.
- DGOH 1991. *Proyecto de la presa de Gor*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Documento interno.
- DGOHCA-ITGE 1996. *Integración de los acuíferos en los sistemas de explotación de recursos hídricos. Proposición del programa estatal de estudios y proyectos para el aprovechamiento coordinado de los recursos superficiales y subterráneos. Cuencas hidrográficas del Norte, Tajo, Guadiana, Guadalquivir y Júcar*. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas e Instituto Tecnológico Geominero de España. Documento interno.
- Gómez Gómez J.D., López Geta, J.A. y Navarro lañez, J.A. 2001. Modelo de uso conjunto de recursos hídricos en la Costa del Sol Occidental. *Congreso las Caras del Agua Subterránea*, Barcelona, 2, 745-752.
- IGME 2001a. *Normas de explotación de la unidad hidrológica 05.09 (Baza-Caniles)*. Instituto Geológico y Minero de España. Documento interno.
- IGME 2001b. *Modelo de simulación conjunta de aguas superficiales y subterráneas del sistema Gor-Sierra de*

- Baza (Alto Guadiana Menor)*. Instituto Geológico y Minero de España. Documento interno.
- ITGE 1997. *Informe sobre las investigaciones hidrogeológicas puntuales en la cabecera del río Gor y adyacentes (U. de Sierra de Baza) para la integración de sus recursos en los abastecimientos urbanos (sectores occidental y oriental)*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Documento interno.
- ITGE 2000. *Actualización del conocimiento de las unidades hidrogeológicas de Baza (05.11), Guadix-Marquesado (05.12) y Baza-Caniles (05.09). Comarca de Guadix-Baza*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Documento interno.
- ITGE-CHG 1993. Propuesta de normas de explotación de la unidad hidrológica 05.11 (Sierra de Baza). En: *Propuesta de normas de explotación de las unidades hidrogeológicas con afección a embalses de regulación y fuentes de abastecimiento a poblaciones de la cuenca del Guadalquivir*. Instituto Tecnológico Geominero de España y Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Documento interno.
- ITGE-DPG 1990. *Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada*. Instituto Tecnológico Geominero de España y Diputación Provincial de Granada, 107 pp.
- López García, J. 1993. Simulación de sistemas de recursos hidráulicos. En: Andreu, J. (ed.), *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*. CIMNE, Barcelona, 125-135.
- MINER-MOPTMA 1994. *Libro blanco de las aguas subterráneas*. Ministerio de Industria y Energía y Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente. Centro de Publicaciones MOPTMA, Madrid, 135 pp.
- Sahuquillo, A. y Sánchez, A. 1983. Metodología para la realización de estudios de utilización conjunta de aguas superficiales y aguas subterráneas. *Boletín de Informaciones y Estudios*, 43, 1-95.
- Sánchez, A. y Murillo, J.M. 1997. *Integración de los acuíferos en los sistemas de explotación*. Servicio de publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 41 pp.

Recibido: Diciembre 2001

Aceptado: Junio 2002