

## SIMULACION DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE GESTION DE LOS RECURSOS HIDRICOS DEL ACUIFERO COSTERO DEL RIO VERDE (ALMUÑECAR, ESPAÑA)

F. Padilla \*, J. Benavente \*, y J. Cruz-Sanjulián \*

### RESUMEN

Mediante una aproximación por elementos finitos se analizan los efectos de diferentes alternativas de gestión del agua de un acuífero costero con problemas de intrusión marina (acuífero aluvial del río Verde, Almuñécar, Granada). La ecuación diferencial que describe el flujo horizontal del agua subterránea y el movimiento de una interfase neta entre el agua dulce y salada se resuelve en régimen permanente para límites con condiciones de flujo y para límites abiertos. Esta solución estacionaria ha mostrado una gran precisión para el cálculo de los potenciales de agua dulce, los espesores de agua dulce y salada, la descarga de agua dulce al mar y la entrada de agua salada a lo largo de la costa. Se han simulado distintas alternativas de actuación sobre el acuífero, que incluyen: la entrada en funcionamiento del proyectado embalse de Otívar en la cabecera de la cuenca, la modificación en la ubicación de las extracciones en el acuífero y la recarga artificial con aguas residuales urbanas en la proximidad de la línea de costa. Las simulaciones muestran que cabe esperar un avance considerable de la interfase si continúan los actuales bombeos de explotación y una parte significativa de la escorrentía superficial del río Verde es canalizada desde el proyectado embalse de Otívar para el regadío en la vega de Almuñécar. Por otra parte, la inyección de aguas residuales urbanas en la proximidad de la línea de costa contribuiría a limitar el avance de la interfase en el acuífero; sin embargo, la sustitución de la actual explotación, mediante bombeo en pozos dispersos en toda la superficie del acuífero, por extracciones en captaciones poco penetrantes próximas a la costa parece constituir la opción más efectiva para contener el avance de la interfase, incluso para caudales muy pequeños de descarga al mar como consecuencia de una explotación intensiva.

**Palabras clave:** *Simulación numérica, elementos finitos, acuífero costero, gestión del agua, interfase.*

### ABSTRACT

The effects of various alternatives in managing the water from a coastal aquifer with seawater intrusion problems (the river Verde alluvial aquifer, Almuñécar, Granada, Spain) have been analysed by means of a finite element approximation. The differential equation which describes the horizontal flow of groundwater and the movement of a sharp interface between the fresh and salt water is solved in a steady state regimen for boundaries with flow and open boundary conditions. This stationary solution has shown very accurate results in calculating freshwater potentials, thicknesses of fresh and salt water, discharges of fresh water and the intrusion of salt water along the coast. Various alternatives were simulated in the aquifer which included: the operation of the planned Otivar reservoir at the head of the catchment basin, changes in the location of extractions from the aquifer, and artificial recharge by urban waste water in the proximity of the coast. These simulations revealed that a considerable advance in the interface is to be expected if the current pumping exploitation continues and a significant part of the surface flow of the river Verde is channeled from the planned Otivar reservoir to irrigate the Almuñécar plain. On the other hand, the injection of urban waste water in the proximity of the coast would contribute to limiting the advance of the interface in the aquifer. However, the replacement of exploitation by pumping wells, currently spread all over

---

\* Instituto del Agua. Universidad de Granada. Rector López Argüeta s/n. 18071 Granada (España).

the aquifer's surface area, by a comparatively shallower extraction close to the coast, would seem to constitute the most effective way of containing the advance of the interface, even for small flows discharging into the sea as a consequence of intensive exploitation.

**Key words:** *Numerical simulation, finite element, coastal aquifer, water management, interface.*

## Introducción

La cuenca del río Verde (vertiente mediterránea, Granada, España) tiene una extensión de 104 km<sup>2</sup> aproximadamente, la mitad de la cual corresponde al sector de cabecera, ocupado por materiales carbonáticos acuíferos (mármoles calizos y dolomíticos triásicos) cuyo drenaje por una serie de manantiales aporta el caudal permanente del río (aproximadamente 300 l/s en estiaje y 900 l/s en invierno, como valores medios). El resto de la cuenca es de naturaleza predominantemente metapelítica (esquistos cuarcícticos y micasquistos, en su mayoría paleozoicos); estos últimos materiales constituyen el sustrato del acuífero aluvial del río Verde.

Aunque de reducida extensión (menos de 4 km<sup>2</sup>), el interés económico de este acuífero deriva de su localización en un área donde las características climáticas aseguran una elevada rentabilidad de los productos agrícolas de regadío. El turismo es otra actividad económica importante en el área, concentrada sobre todo en el núcleo costero de Almuñécar y en la temporada estival, en la que la población estable (unos 20.000 habitantes) llega a cuadruplicarse. Ambas actividades requieren la disponibilidad de agua de buena calidad.

Hasta aproximadamente la década de los sesenta, el agua necesaria para el riego de los cerca de 4 km<sup>2</sup> de cultivos de tipo subtropical localizados en la llanura aluvial del río Verde se obtenía por derivación de caudales de dicho curso mediante acequias. Desde entonces, la transformación agrícola del área se ha basado en la ocupación de nuevos terrenos situados en las laderas de los valles. Los caudales derivados del río Verde son claramente insuficientes para el riego de estos nuevos cultivos, que ocupan en la actualidad una superficie del orden de 20 km<sup>2</sup>, por lo que la gran mayoría del agua destinada a este fin —al igual que la destinada al abastecimiento humano— se obtiene de numerosos sondeos que bombean agua del acuífero aluvial. El acuífero de cabecera, por el momento, permanece prácticamente sin explotación.

El área tiene un clima de tipo mediterráneo en el que las precipitaciones en el período entre los meses de junio a septiembre son generalmente muy escasas. Es precisamente en ese período donde se concentran las necesidades de agua para riego y abastecimiento y, por tanto, cuando los bombeos en el acuífero aluvial son más intensos.

Los primeros estudios hidrogeológicos detallados (Esquitino, 1974; López López, 1974) fueron llevados a cabo bajo la dirección del Prof. R. Fernández-Rubio (Universidad de Granada). En el trabajo de Esquitino y Fernández-Rubio (1975) se hace hincapié en un aspecto fundamental del funcionamiento hidrogeológico del acuífero aluvial, como es la recarga que recibe procedente del río Verde, circunstancia que se pone de manifiesto cuantitativamente por primera vez. Con antelación a estos trabajos, existían estudios hidrogeológicos dispersos, inéditos, que atendían a aspectos más concretos: Fernández-Rubio (1972), SGOP (1972).

Estudios posteriores, que dispusieron ya de series de registros piezométricos (Benavente, 1982), pusieron de manifiesto el riesgo de intrusión marina, habida cuenta del régimen de fuerte sobreexplotación estacional. Dicho proceso se advirtió en el verano de 1982 y, con más intensidad, en el de 1983. Afectó sobre todo a las captaciones para abastecimiento a Almuñécar, situadas a más de 1 km del borde costero (Benavente *et al.*, 1984). La principal particularidad del proceso era la inusual rapidez con que se producía la desalinización del acuífero una vez acabado el período estival, es decir, al disminuir notablemente la relación bombeos/recarga (Fernández-Rubio *et al.*, 1986; Fernández-Rubio y Jalón, 1988). Estudios más recientes han puesto de manifiesto el incremento progresivo e irreversible del espesor de la zona de mezcla, así como una progresión de los domos de ascenso salino bajo los puntos de mayor régimen de bombeo (Calvache y Pulido, 1991).

Los métodos propuestos para solucionar el problema de la intrusión han sido muy diversos: el trasvase de recursos de cuencas cercanas, la realización de una pantalla impermeable en el borde costero, la reinyección de aguas residuales en la franja costera y la construcción de una presa en el sector de cabecera del río Verde. El objetivo de esta presa, actualmente en fase de proyecto (embalse de Otívar), es suministrar el agua para consumo y riego mediante gravedad y, consecuentemente, reducir de manera sensible los bombeos en el acuífero.

La necesidad de disponer de una estimación preliminar de los efectos sobre el acuífero y sobre la interfase del funcionamiento del embalse proyectado ha promovido la realización de una nueva fase de investigación; en esta fase se ha desarrollado la modelización numérica del comportamiento del

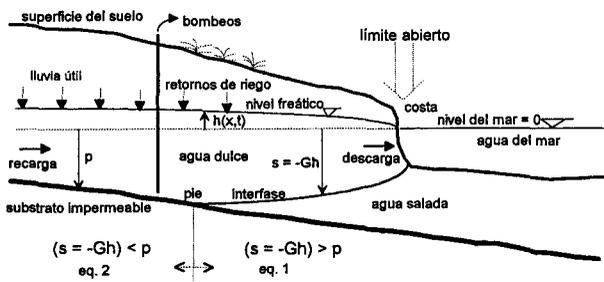


Fig. 1.—Perfil esquemático de un acuífero costero no confinado.

acuífero aluvial del río Verde bajo la influencia de los caudales superficiales procedentes de la gestión del agua del embalse de Otívar (Padilla y Cruz-Sanjulián, en prensa; Padilla *et al.*, en prensa, b). Los resultados han reflejado el avance de la interfase y de la intrusión marina para las descargas de agua dulce y las recargas de agua salada en la costa como consecuencia de los excedentes o los déficit de agua dulce en el acuífero.

El objetivo del presente trabajo es evaluar, con la ayuda de la simulación numérica, la influencia en el avance de la intrusión de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos: la reubicación de las extracciones de agua dulce y la inyección de las aguas residuales de la localidad de Almuñécar en la proximidad de la línea de costa. Esta última posibilidad de actuación, junto con el análisis de otras alternativas, se comentan en el trabajo de Fernández-Rubio (1988).

**Breve descripción de la modelización numérica**

En el caso de un acuífero costero libre, de gran extensión horizontal en relación con su espesor, se puede admitir que son muy pequeñas las variaciones de la carga hidráulica en la vertical. Esta hipótesis conduce a la ecuación bidimensional del flujo subterráneo horizontal. Si se considera, además, el agua salada en equilibrio con el nivel del mar y la presencia de una interfase neta entre el agua dulce menos densa y el agua salada infrayacente, las ecuaciones bidimensionales que rigen el movimiento del agua dulce en un acuífero costero se pueden escribir como sigue (Shamir y Dagan, 1971):

$$\begin{aligned}
 (n_f + n_s G) \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx}(h-s) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_{xy}(h-s) \frac{\partial h}{\partial y}) \\
 &+ \frac{\partial}{\partial y} (K_{yx}(h-s) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy}(h-s) \frac{\partial h}{\partial y}) + Q \text{ if } (s = -Gh) > p \quad [1] \\
 n_f \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx}(h-p) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_{xy}(h-p) \frac{\partial h}{\partial y}) \\
 &+ \frac{\partial}{\partial y} (K_{yx}(h-p) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy}(h-p) \frac{\partial h}{\partial y}) + Q \text{ if } (s = -Gh) < p \quad [2]
 \end{aligned}$$

donde, si tomamos como referencia el nivel del mar (fig. 1), *h* es la carga hidráulica del agua dulce (positiva sobre el nivel del mar), *s* es la posición de la interfase (negativa bajo el nivel del mar), *n<sub>f</sub>* y *n<sub>s</sub>* son, respectivamente, las porosidades efectivas correspondientes al movimiento de la superficie freática y de la interfase, *Q* son las inyecciones (positivas) o las extracciones (negativas) de agua dulce en la superficie del acuífero, consideradas como flujo volumétrico de agua por unidad de superficie, y *K<sub>ij</sub>* es el tensor de la permeabilidad hidráulica en la zona del agua dulce. Para acuíferos costeros libres, el principio de Ghyben-Herzberg determina aproximadamente la posición de la interfase en equilibrio con el nivel del mar mediante la expresión:

$$s = - \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \quad \text{si} \quad (s = -Gh) > p$$

$$s = p \quad \text{si} \quad (s = -Gh) \leq p$$

donde,

$$G = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f},$$

*ρ<sub>f</sub>* y *ρ<sub>s</sub>* son respectivamente las densidades de agua dulce y salada, y *p* es la cota o altitud del sustrato impermeable del acuífero (negativa por debajo y positiva por encima del nivel del mar).

De este modo, el modelo numérico queda representado por la ecuación [1] cuando la intrusión marina interacciona verticalmente con el agua dulce, y por la ecuación [2] en los otros casos, es decir, cuando sólo existe agua dulce en la vertical.

Es oportuno resaltar que las ecuaciones precedentes corresponden al modelo clásico regional de intrusión marina en equilibrio con el nivel regional del mar (Bear y Verruijt, 1987). Sin embargo, el modelo numérico de Padilla y Cruz-Sanjulián (en prensa) desarrolla unas nuevas condiciones en los límites para resolver dichas ecuaciones (Padilla *et al.*, 1990 y Padilla *et al.*, en prensa, a).

Para costas con pendiente pronunciada, es necesario utilizar condiciones de límites abiertos con el fin de encontrar las soluciones adecuadas en las proximidades de la línea de costa. Esta clase de límites puede ser modelizada con precisión por el procedimiento numérico de resolución normalmente utilizado en el método de los elementos finitos.

En el caso de costas con pendiente poco pronunciada es más adecuado utilizar condiciones de límites para flujo de salida (Huyakorn *et al.*, 1996), basadas en la solución analítica de Bear y Dagan (1964).

Las cargas hidráulicas de agua dulce calculadas en la línea de costa y en su proximidad no son necesariamente las correspondientes al nivel del mar.

Así, por ejemplo, en el caso de existir un balance positivo de agua dulce (descarga de agua dulce del acuífero al mar), puede aparecer en la costa una interfase más profunda que el nivel del mar, de acuerdo con el principio de Ghyben-Herzberg, como consecuencia de las cargas hidráulicas positivas que resultan de la aplicación del modelo numérico.

Inversamente, si existe un balance negativo o deficitario de agua dulce, debido por ejemplo a la sobreexplotación del acuífero costero, se necesita una hipótesis de mezcla entre las aguas dulce y salada, con el fin de permitir la evaluación numérica de las cargas hidráulicas bajo el nivel del mar.

En consecuencia, la intrusión marina y la recarga desde el mar, correspondientes a una mezcla de aguas dulce y salada, podrán ser calculadas correctamente en las costas que son tratadas con el tipo de límites abiertos.

Igualmente, la modelización considera las relaciones entre aguas subterráneas y aguas de superficie. A este respecto, un excedente de aguas subterráneas, cuando el nivel freático se sitúa a una cota superior a la topográfica, determina la presencia de aguas de superficie mediante un aumento de la permeabilidad en el sector afectado. Se pueden obtener sin dificultad

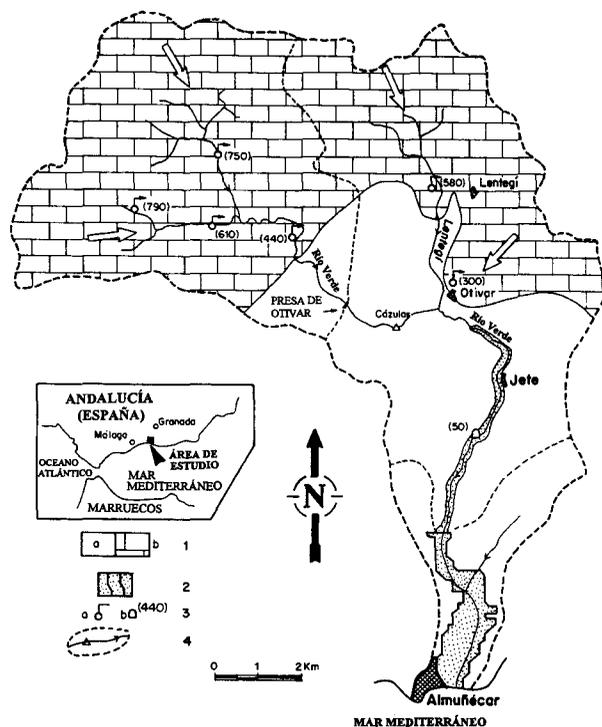


Fig. 2.—Localización y croquis hidrogeológico del área de estudio. 1) Esquistos paleozoicos (a) y carbonatos triásicos (b) (las flechas indican las direcciones principales de flujo del agua subterránea). 2) Acuífero aluvial del río Verde mostrando el sector meridional modelizado. 3) Manantial (a) y galería (b) (se indica la altitud entre paréntesis). 4) Arroyos principales y estación de aforo; límites de cuencas y subcuencas.

soluciones a estas hipótesis en régimen permanente con la ayuda de una simulación previa, en la cual se imponen los niveles freáticos del acuífero al nivel del mar en la línea de costa.

Este procedimiento numérico puede dar resultados muy satisfactorios, como se describe en los trabajos relativos al desarrollo de esta metodología y a su aplicación al acuífero costero del río Verde (Padilla y Cruz-Sanjulián, en prensa; Padilla *et al.*, en prensa, b).

### Hidrogeología de la cuenca del río Verde

Los aluviones del río Verde ocupan una extensión de unos 3,5 km<sup>2</sup>. Están bien representados aguas abajo de la confluencia de los ríos Verde y Lentegí, junto al pueblo de Otívar (altitud ligeramente superior a los 120 m). La mayor parte del acuífero corresponde a la denominada vega de Almuñécar, que comprende desde aproximadamente la cota 40 m hasta el mar y coincide con un ensanchamiento apreciable del valle fluvial respecto al sector situado aguas arriba. Este es el dominio que ha sido objeto de modelización (fig. 2).

A partir de la información procedente de las numerosas captaciones existentes y de campañas específicas de sondeos piezométricos, se comprueba

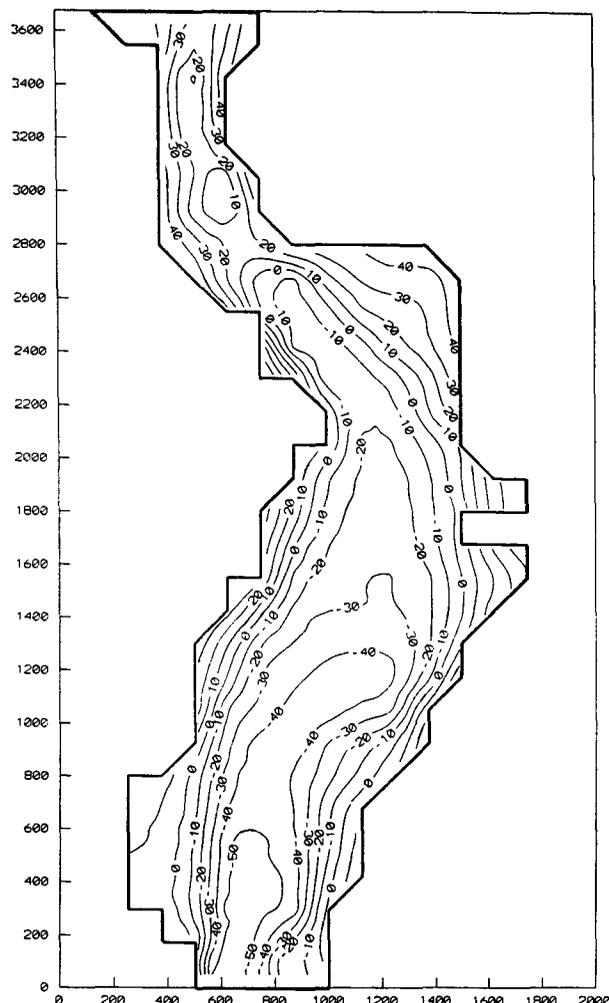


Fig. 3.—Mapa de las altitudes (en metros) del sustrato impermeable del sector modelizado del acuífero aluvial del río Verde. (La escala en ambos ejes está expresada en metros.)

que a) en la mayor parte del sector de la vega de Almuñécar el sustrato metapelítico se localiza a profundidades entre 30 y 70 m, y b) que el límite norte de dicho sector coincide bastante aproximadamente con la intersección entre el sustrato y la cota cero, correspondiente al nivel del mar (fig. 3).

Los datos experimentales de permeabilidad y porosidad son escasos. Ensayos de bombeo en la vega de Almuñécar (Benavente, 1982; Calvache y Pulido, 1990) proporcionaron valores de transmisividad superiores a 30.000 m<sup>2</sup>/día. Teniendo en cuenta el espesor saturado en dicho sector, el coeficiente de permeabilidad del acuífero debe estar comprendido entre 200 y 1.000 m/día. Del mismo orden de magnitud son los valores obtenidos por Benavente y Calvache (1988), a partir del análisis de las características granulométricas de los materiales atravesados en una serie de sondeos de reco-

nocimiento. Estos mismos autores han estimado valores de porosidad eficaz comprendidos en su mayor parte dentro del rango 15 %-20 %.

Existe una red de control de la piezometría en el acuífero, con medidas mensuales, continuas en algunos casos, desde 1984 (1977 en algunos puntos), realizadas por la Comisaría de Aguas del Sur de España. En general, se registra en todos los puntos una periodicidad de carácter estacional, con niveles altos en los meses de primavera, mientras que en la época correspondiente a finales del estiaje se alcanzan las mayores profundidades de la superficie piezométrica.

En el sector de la vega de Almuñécar, durante las épocas de estiaje, los niveles descienden por debajo de la cota cero (de hecho, se han registrado valores hasta del orden de -6 m, a distancias de 2,5 km del litoral). Ya no es posible mayor progresión hacia el norte, pues el acuífero se encuentra totalmente desaturado: la cota cero coincide con la del sustrato impermeable en ese sector.

En cuanto al funcionamiento del acuífero, la recarga procedente de la infiltración directa de las precipitaciones sobre los afloramientos permeables resulta ser poco importante, pues se estima que la evapotranspiración real supone del orden del 90 % de la precipitación, que no llega a alcanzar los 500 mm como media anual.

La recarga a partir de la escorrentía eventual o esporádica que se genera en las cuencas impermeables que vierten al acuífero es más difícil de evaluar. Generalmente dicha escorrentía se infiltra en su totalidad en los materiales permeables, salvo en circunstancias de avenidas extraordinarias.

Otra fuente de recarga también difícil de evaluar debe proceder del retorno de regadíos sobre los materiales aluviales, que se efectúan mayoritariamente con aguas derivadas del río Verde mediante acequias.

La infiltración directa a partir de los caudales del río Verde se debe producir mayoritariamente en el sector situado aguas arriba de Jete, que es donde el río suele discurrir con agua en buena parte del año.

Respecto a las salidas del acuífero, las extracciones por bombeo son de magnitud variable en función de las características hidrometeorológicas de cada año en concreto. Pueden estimarse comprendidas entre 7 y 11 hm<sup>3</sup>/año. Las salidas subterráneas al mar pueden acotarse a partir de la aplicación de la fórmula de Darcy al borde costero: unos 3-6 hm<sup>3</sup>/año para condiciones hidrológicas medias. Lógicamente, la mayor parte de esta descarga se concentra en el período de invierno-primavera.

En resumen, los recursos medios del acuífero aluvial del río Verde pueden cifrarse en alrededor de 14 hm<sup>3</sup>/año. A su vez, las cifras correspondientes a

Tabla 1.—Volúmenes anuales medios utilizados en las condiciones de simulación del acuífero costero del río Verde

Volúmenes anuales medios (hm <sup>3</sup> /año)	Aplicación	Aplicación	Aplicación
	1	2	3
Balances de agua dulce A+B+C+D+E+F	+1	+1	+5
A) Recargas de cuencas pequeñas	0,1	0,1	0,1
B) Retornos de riego y lluvia útil	2,1	2,1	2,1
C) Explotación actual por bombeo	-10	0	-10
D) Captaciones someras	0	-10	0
E) Recarga artificial	0	0	4
F) Recargas del río Verde (a+b+c+d)	8,8	8,8	8,8
a) Embalse de Otívar	6,3	6,3	6,3
b) Compañía eléctrica	5,5	5,5	5,5
c) Subcuenca del río Lentegí	2	2	2
d) Canales de riego	-5	-5	-5

la mayoría de las partidas que integran el balance hídrico pueden modificarse sensiblemente en años de anormal pluviosidad respecto a los de drástica sequía.

### Simulación del acuífero aluvial del río Verde

El acuífero ha sido discretizado con una malla regular de triángulos isósceles, aunque en el sector sur, en las inmediaciones de la línea de costa, la malla triangular se diseñó más densa, con el fin de conseguir una mayor precisión en la simulación de la posición de la interfase en la zona de descarga del agua dulce al mar (fig. 4a). Esta zona está regida por no linealidades importantes, así como por el tratamiento particular de un límite con descarga de agua subterránea hacia el mar. No ha habido ninguna imposición de nivel freático como condición en los límites del modelo, ni siquiera en el borde costero. Las simulaciones se han llevado a cabo, inicialmente, en régimen permanente. Todas las condiciones de simulación de los ejemplos presentados han sido elaboradas a partir de los valores de recarga y de explotación descritos a continuación.

Los valores de porosidad y permeabilidad del acuífero utilizados en la modelización han sido obtenidos de estudios anteriores (Benavente y Calvache, 1988; Calvache, 1989), y, como se ha mencionado anteriormente, proceden de la interpretación de ensayos de bombeo y de análisis granulométricos.

Para la evaluación de la recarga y de la explotación del acuífero, se han utilizado datos de muy diverso tipo y procedencia. En particular, los datos pluviométricos y de aforo de corrientes superficiales se han obtenido del propio Proyecto de la Presa de Otívar (Velasco *et al.*, 1984).

Los aforos realizados han permitido evaluar las aportaciones medias del río Verde al embalse pro-

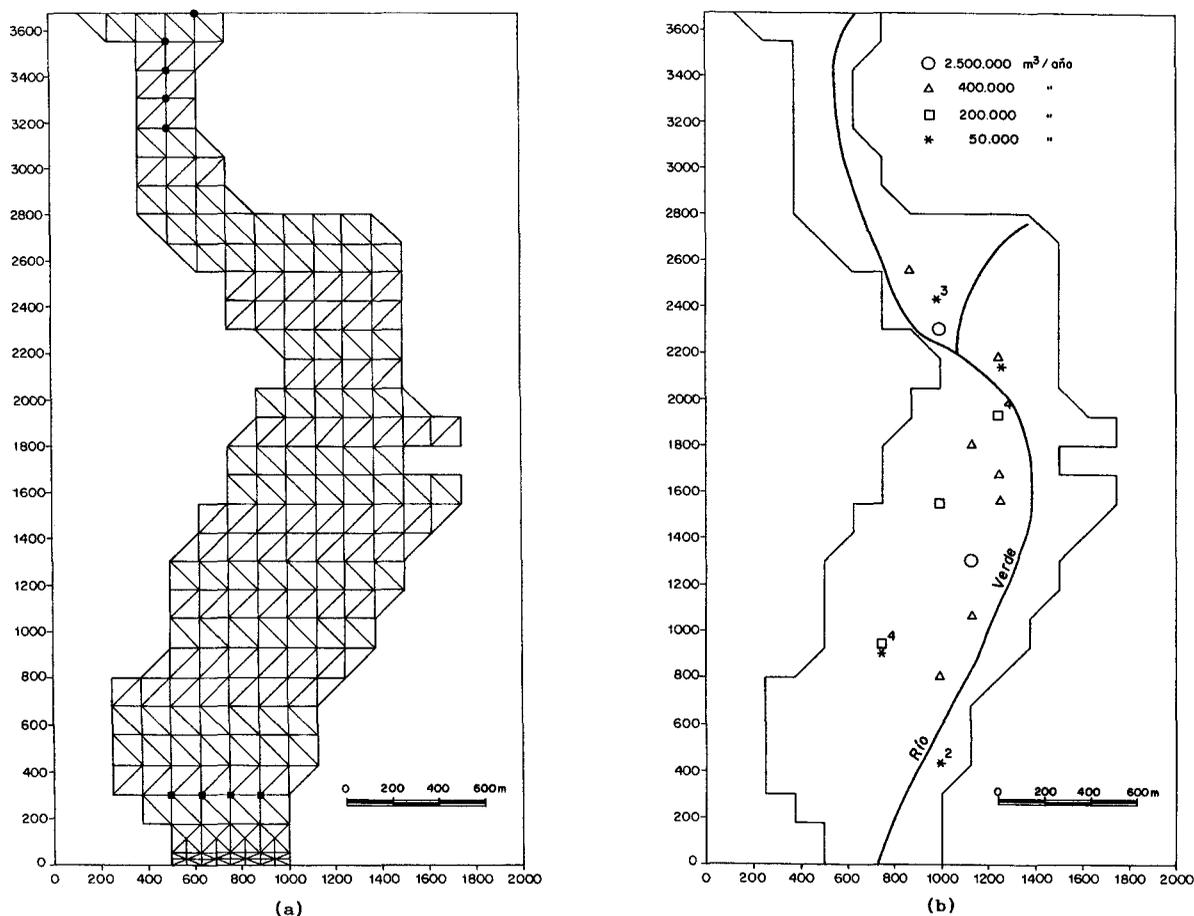


Fig. 4.—a) Discretización en elementos finitos del acuífero costero del río Verde. Se indica igualmente la localización de las extracciones y de las inyecciones superficiales (puntos cuadrados) así como el sector afectado por la escorrentía superficial (puntos redondos), según las simulaciones realizadas; b) Extracciones medias anuales por bombeo de agua dulce en pozos (valores utilizados en las simulaciones del acuífero del río Verde).

yectado en unos  $15,8 \text{ hm}^3/\text{año}$ . De esa cifra, es necesario detraer  $5,5 \text{ hm}^3/\text{año}$  que una Compañía eléctrica obtiene del cauce y devuelve a éste aguas abajo de la presa que se pretende construir. En consecuencia, el caudal medio que el embalse podría regular es del orden de  $10,3 \text{ hm}^3/\text{año}$  (tabla 1).

Entre el previsto embalse de Otívar y el acuífero aluvial, el río Verde cuenta con algunos pequeños afluentes, de los que el más importante es el río Lentegí. La aportación conjunta en este sector se ha evaluado en aproximadamente  $2 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

Las aportaciones de la galería de Las Angosturas (fig. 2), junto con los caudales de agua del río derivados para el riego mediante acequias, suponen una media del orden de  $5 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

El acuífero es sometido actualmente a una intensa explotación mediante bombeos. Aunque el caudal extraído en las diferentes captaciones es variable de unas épocas a otras del año, se han considerado caudales medios anuales. A este respecto, se han agru-

pado las captaciones por emplazamientos y por categorías, con el fin de adicionar sus caudales y hacer coincidir sus emplazamientos lo más posible de los nudos correspondientes a la discretización espacial del acuífero (fig. 4b). Esta información procede de datos del IGME (1987, in Calvache, 1989). El total de la explotación se puede evaluar en una media anual de casi  $10 \text{ hm}^3$ .

Por su parte, el retorno de los riegos efectuados directamente sobre el acuífero y de los realizados sobre las laderas abancaladas de la cuenca, mediante gravedad y bombeo, respectivamente, se ha estimado en ambos casos con un valor muy similar, del orden de  $1 \text{ hm}^3/\text{año}$  (admitiendo un 30 % de retorno para los riegos por gravedad y un 5 % para los cultivos en bancales). En cuanto a la lluvia útil sobre el acuífero del río Verde, evaluada en una media anual de 10 mm, equivale a una recarga pluviométrica de  $0,1 \text{ hm}^3/\text{año}$ . La recarga conjunta de la lluvia útil y del retorno de riegos puede estimarse, por tanto, en

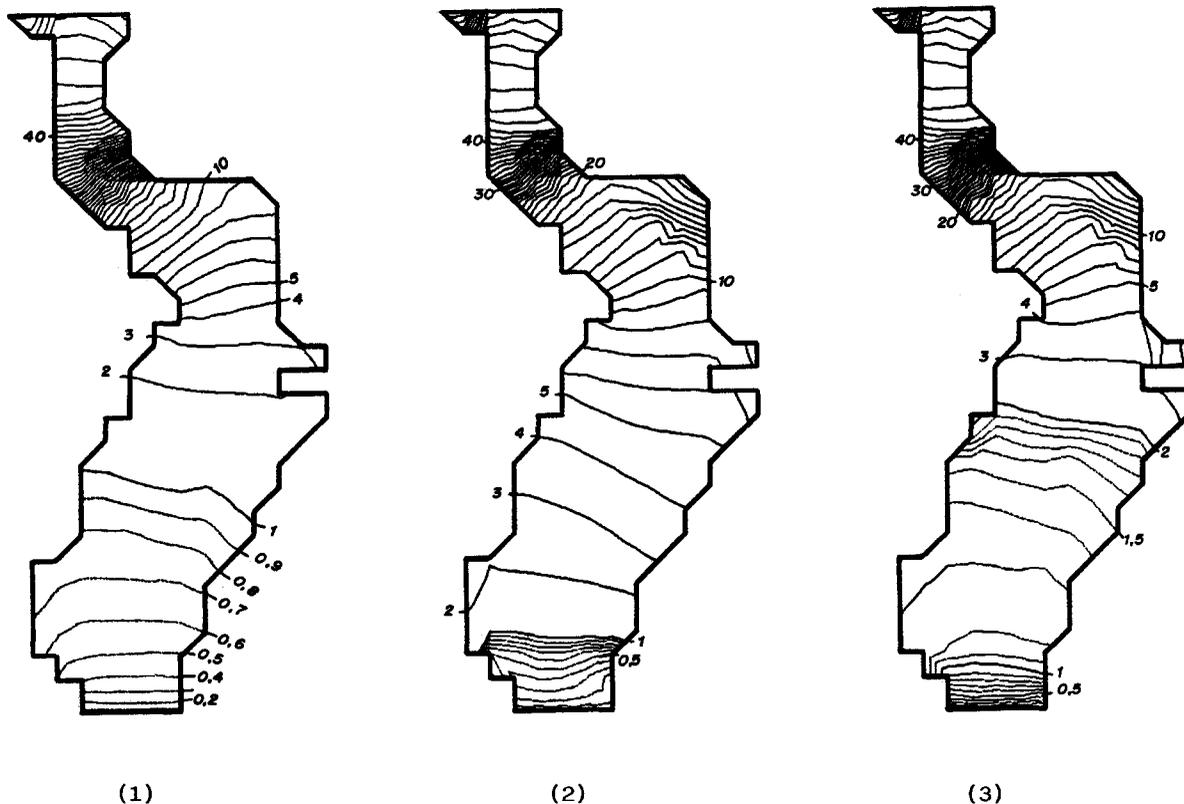


Fig. 5.—Mapa de altitudes (en metros) de los niveles freáticos para las simulaciones estacionarias de los ejemplos de aplicación 1, 2 y 3.

un total de  $2,1 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Esta cifra se ha distribuido homogéneamente sobre todos los nudos correspondientes a la discretización espacial del acuífero.

También contribuyen a la recarga del sistema las aportaciones de cuencas de pequeño tamaño situadas en el curso bajo del río Verde y que vierten directamente al aluvial. Estas cuencas son de dimensiones reducidas y se estima que aportan lateralmente al acuífero, en conjunto, menos de  $0,1 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

Si se tienen en cuenta los valores medios de la demanda actual de agua dulce para abastecimiento de Almuñécar (DGOH-JA, 1992), se estima que en un futuro próximo se podría llegar a generar más de  $4 \text{ hm}^3/\text{año}$  de aguas residuales urbanas. En la actualidad, las aguas residuales procedentes de la localidad de Almuñécar son vertidas al mar mediante emisarios submarinos.

En conclusión, las aportaciones superficiales en el tramo alto del acuífero del río Verde pueden ser estimadas en un valor medio de  $12,8 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Una vez sea construida la presa de Otívar, ese caudal se verá disminuido por las pérdidas de evaporación del embalse y por los volúmenes canalizados por la presa para el riego y el consumo humano, de modo que el caudal circulante dependerá de la gestión del

embalse. En los ejemplos de simulación que se presentan en la tabla 1, se ha utilizado un valor aproximado de  $6,3 \text{ hm}^3/\text{año}$  como caudal regulado por el embalse, lo que representa  $4 \text{ hm}^3/\text{año}$  menos del total embalsado anualmente ( $10,3 \text{ hm}^3/\text{año}$ ); ello sitúa las aportaciones superficiales del río Verde al acuífero en  $8,8 \text{ hm}^3/\text{año}$ , cifra que se utiliza en el análisis de las alternativas de gestión que se plantean a continuación.

En el primer ejemplo se ha reflejado la influencia de los caudales procedentes de la Presa de Otívar en el estado del acuífero sometido a explotación. Para ello se considera la cifra indicada más arriba de caudales regulados por el embalse con el fin de obtener un balance hídrico positivo, aunque con excedentes reducidos (aplicación 1, balance hídrico  $+1 \text{ hm}^3/\text{año}$ ).

En el segundo ejemplo se ha querido reflejar la importancia de la sustitución de la explotación actual mediante bombeo en pozos por una serie de drenes o captaciones poco profundas, próximas a la línea de costa. Para ello se han elegido 4 emplazamientos (fig. 4a), correspondientes a otros tantos pozos poco profundos, situados a 300 m de la costa. El total del agua extraída se ha supuesto igual a la media anual obtenida actualmente por bombeo, es

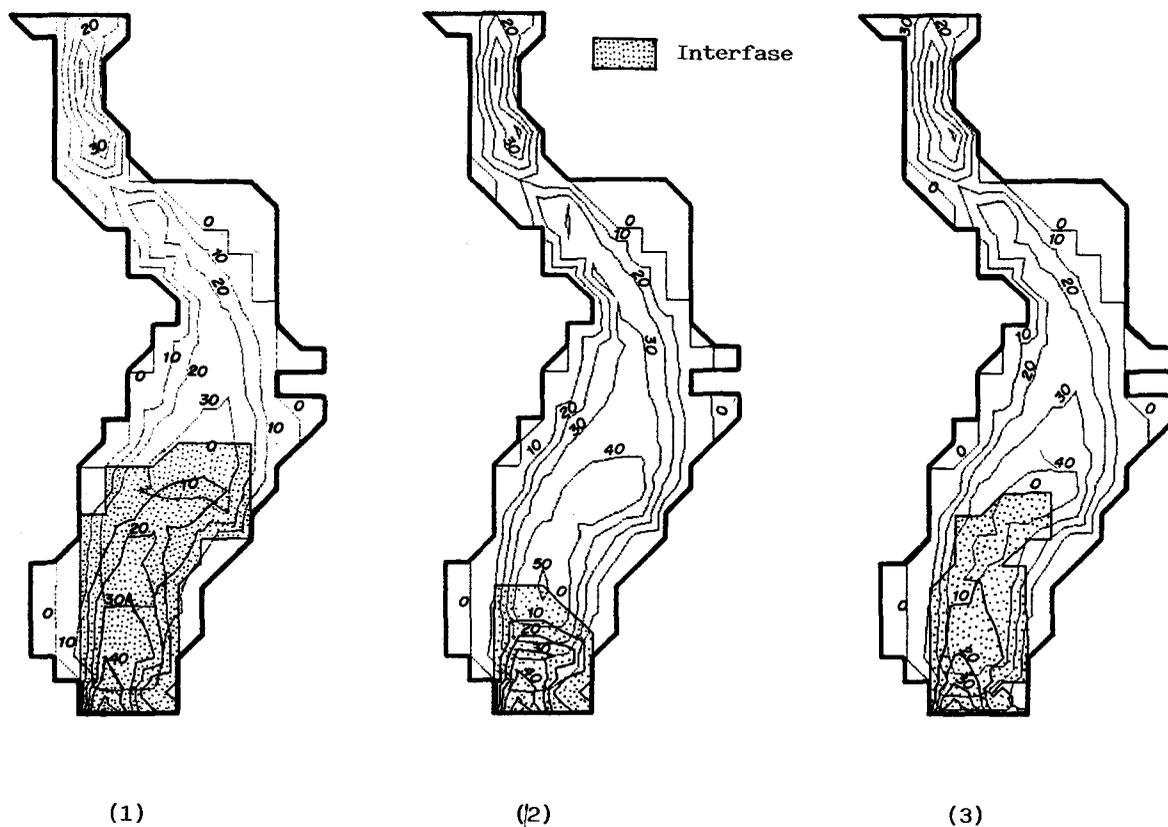


Fig. 6.—Mapa de espesores (en metros) de agua dulce (----) y agua salada (—) para simulaciones estacionarias de los ejemplos de aplicación 1, 2 y 3.

decir  $10 \text{ hm}^3/\text{año}$  (aplicación 2, balance hídrico  $+1 \text{ hm}^3/\text{año}$ ).

En la tercera aplicación se pretende predecir los efectos de la recarga artificial en las cercanías de la costa como medio para reducir el avance de la intrusión marina en el acuífero. A este respecto, se ha supuesto un caudal de recarga artificial equivalente al caudal de aguas residuales potencialmente generadas por el municipio de Almuñécar ( $4 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), de modo que se ha simulado la inyección de estas aguas residuales en pozos poco profundos, a 300 m de la costa, para lo que se han utilizado los mismos emplazamientos que en el ejemplo anterior (aplicación 3, balance hídrico  $+5 \text{ hm}^3/\text{año}$ , recarga artificial con aguas residuales  $+4 \text{ hm}^3/\text{año}$ ).

### Discusión de resultados

En los mapas de las figuras 5 y 6 se recogen los resultados más relevantes de las simulaciones realizadas. Estas simulaciones representan, a su vez, las distintas alternativas de gestión de los recursos hídricos de la cuenca. De este modo, los mapas ilus-

tran la respuesta del acuífero, en cada caso, en régimen permanente.

En primer lugar, en la figura 4a se señalan los nudos situados en la cabecera del acuífero, en los que la red de drenaje superficial resulta activa para las simulaciones efectuadas. Este resultado es, en líneas generales, coherente con los datos disponibles acerca de los caudales medios del río Verde en el sector estudiado.

Por otra parte, las figuras 5 y 6 ilustran los resultados de los ejemplos 1, 2 y 3 (tabla 1). Los dos primeros corresponden a un balance hídrico de  $+1 \text{ hm}^3/\text{año}$ , como consecuencia de las operaciones del embalse de Otívar (aplicación 1) y de la reubicación de la explotación actual mediante bombeo por drenes o pozos someros, situados en la proximidad de la línea de costa (aplicación 2). El ejemplo n.º 3 simula un balance hídrico de  $+5 \text{ hm}^3/\text{año}$ , que resulta de considerar la recarga artificial del acuífero utilizando la inyección de las aguas residuales de Almuñécar ( $4 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), también en la proximidad de la costa.

Los resultados de las simulaciones se presentan en forma de isóneas (en metros), para las dos

dimensiones horizontales del acuífero, en lo que se refiere a niveles freáticos, posición de la interfase y espesores de agua dulce y agua salada en el acuífero. En los mapas correspondientes a la interfase se indica la extensión ocupada por la misma; el límite continental del área asignada a la interfase representa un espesor nulo del agua salada; más allá de dicho límite, las isolíneas representan solamente los espesores de agua dulce.

De todo ello se concluye, en primer lugar, que la sustitución de la explotación actual por extracciones en captaciones someras en la proximidad de la costa reduciría de manera muy importante el avance de la interfase, incluso para la misma descarga hacia el mar (+1 hm<sup>3</sup>/año, aplicaciones 1 y 2). Nótese, sin embargo, la forma convexa que adquiere la interfase en este último caso (ejemplo 2).

Por otra parte, la alternativa de la inyección de aguas residuales, conservando la actual explotación mediante bombeo (descarga hacia el mar de +5 hm<sup>3</sup>/año, aplicación 3), reduce en cierta medida el avance de la interfase salada. Sin embargo, esta reducción se manifiesta menos efectiva que la conseguida por la alternativa de la reubicación de la explotación (aplicación 2), a pesar de que en el ejemplo 3 la descarga de agua hacia el mar es francamente superior. Nótese que en este último caso se obtiene una interfase de forma cóncava, con una mayor progresión del pie, como consecuencia de la menor pendiente de la interfase.

Obviamente, la recarga artificial con aguas residuales (convenientemente tratadas, en su caso) podría efectuarse simultáneamente a la alternativa de reubicación de la explotación actual, sólo que debería realizarse a partir de otros sondeos o drenes más cercanos a la costa que las propias captaciones.

Ello implica que, como era de suponer, de persistir las actuales tasas de explotación de aguas subterráneas, la detracción de una parte importante de las aportaciones del río Verde, como consecuencia del almacenamiento en el embalse (o su eventual canalización), produciría un incremento de la intrusión marina. Por tanto, es necesario tener en cuenta esta circunstancia en la gestión racional del embalse, de modo que, para evitar un avance severo de la interfase, es obligado mantener un «balance de agua dulce», en el sentido expuesto en párrafos anteriores, claramente positivo o excedentario, es decir, es necesario permitir la circulación de un caudal suficiente en el río Verde, aguas abajo de la presa. De no ser así, como consecuencia del avance de la interfase salada, cabe esperar la consiguiente salinización de algunos de los sondeos de explotación de agua dulce actualmente en funcionamiento.

Estos resultados pueden servir para estudiar el posible impacto del funcionamiento del embalse, de

la ubicación de las extracciones y de la recarga artificial en la disponibilidad del agua dulce en el acuífero y en el avance de la intrusión marina. También son susceptibles de simulación otras posibles alternativas, en las que, por ejemplo, estén implicados la recarga, la explotación, la regulación, así como diferentes volúmenes de agua de los considerados en esta investigación. De este modo se podrá estimar la influencia de las condiciones impuestas en el régimen hidrogeológico del acuífero, con el fin de mejorar la planificación futura de la gestión de los recursos hídricos, con un mínimo riesgo de intrusión marina y de agotamiento de las reservas.

### Conclusiones

Esta investigación ha facilitado la simulación numérica de la influencia de la escorrentía superficial procedente de la gestión del agua del embalse de Otívar, de la reubicación de las extracciones actuales por bombeo y de la recarga artificial, mediante inyección de aguas residuales urbanas, en el comportamiento del acuífero costero del río Verde (Almuñécar, Granada).

Se ha utilizado un modelo bidimensional monofásico en elementos finitos, que considera diferentes tipos de condiciones para límites abiertos en la costa, así como una interfase neta entre el agua dulce y el agua salada, aplicado en condiciones estacionarias al acuífero costero.

Los resultados aportan una evaluación razonable de los niveles freáticos y de los espesores de agua dulce y salada, así como de la posición de la interfase en el acuífero para distintos valores de descarga subterránea a lo largo de la línea de costa.

Se concluye, en primer lugar, que cabe esperar un avance considerable de la intrusión marina en el acuífero aluvial del río Verde si se mantienen las actuales extracciones de agua dulce por bombeo en pozos y si una parte importante de las aportaciones superficiales del río Verde son canalizadas desde el embalse de Otívar para el regadío.

Por otra parte, el avance de la interfase se puede reducir de manera muy importante, sin modificar los balances totales de agua dulce del acuífero, con la simple sustitución de las explotaciones actuales mediante sondeos diseminados por toda la superficie del acuífero aluvial, y que generalmente lo atraviesan en buena parte de su espesor saturado, por unas captaciones someras a partir de pozos y/o drenes situados en la proximidad de la costa.

La reutilización de los caudales de aguas residuales, potencialmente generados por la población de Almuñécar, para la recarga artificial del acuífero, mediante inyección en sondeos situados en la proxi-

midad de la costa, contribuiría en menor medida a reducir el avance de la interfase salada.

Las alternativas planteadas pueden ser útiles para planificar en el futuro de manera más adecuada la gestión de los recursos hídricos disponibles, disminuyendo el riesgo de avance de la intrusión marina en el acuífero aluvial del río Verde.

#### AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido en parte realizado con financiación de la CICYT: Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto AMB94-0611).

#### Referencias

- Bear, J., y Dagan, G. (1964). Moving interface in coastal aquifers. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 99(HY4), 193-215.
- Bear, J., y Verruijt, A. (1987). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*, Reidel, Dordrecht, 414 págs.
- Benavente, J. (1982). *Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos costeros de la provincia de Granada*, tesis doctoral (inérita), Univ. de Granada, 435 págs.
- Benavente, J., Fernández-Rubio, R., y Jalón, M. (1984). Intrusión marina en el acuífero costero del río Verde (Granada). *I Congreso Español de Geología*, 4, 75-86.
- Benavente, J., y Calvache, M. L. (1988). Estimación de la permeabilidad en el acuífero costero de Almuñécar. *La intrusión en España (TIAC'88)*, IGME, 385-394.
- Calvache, M. L. (1989). *Simulación del contacto agua dulce-agua salada en el acuífero del río Verde (Almuñécar, Granada)*, tesis de licenciatura (inérita), Univ. de Granada, 120 págs.
- Calvache, M. L., y Pulido, A. (1990). Simulación matemática del flujo subterráneo en el acuífero del río Verde (Almuñécar, Granada). *Estudios Geol.*, 46, 301-306.
- Calvache, M. L., y Pulido, A. (1991). Saltwater intrusion into a small coastal aquifer (río Verde, Almuñécar, S Spain). *J. Hydrol.*, 129, 195-213.
- DGOH-JA (1992). *Asistencia técnica para el estudio de las posibilidades de aprovechamiento de recursos hídricos para suministro al área de Almuñécar, Granada*, informe técnico (inérito), 116 págs.
- Esquitino, F. (1974). *Estudio hidrogeológico del sector norte del acuífero aluvial del río Verde de Almuñécar*, trabajo monográfico (inérito), Cátedra de Hidrogeología (Univ. de Granada), 89 págs.
- Esquitino, F., y Fernández-Rubio, R. (1975). Contribución al estudio hidrogeológico de los ríos Verde y Seco (Almuñécar). *V Jorn. Min. Met.*, Bilbao, 3, 145-161.
- Fernández-Rubio, R. (1972). *Estudio hidrogeológico de la captación existente en el cortijo Fuente de Piedra (Almuñécar, Granada)*, informe inédito, Cátedra de Hidrogeología (Univ. de Granada), 27 págs.
- Fernández-Rubio, R. (1988). Almuñécar-intrusión salina. Soluciones a un problema, *La intrusión en España (TIAC'88)*, IGME, 427-438.
- Fernández-Rubio, R., Jalón, M., Benavente, J., y Fernández-Lorca, S. (1986). Proceso de salinización-desalinización en el acuífero costero del río Verde (Almuñécar, Granada). *II Simp. Agua en Andalucía*, 2, 303-314.
- Fernández-Rubio, R., y Jalón, M. (1988). Nuevos datos sobre el proceso: salinización-desalinización del acuífero aluvial del río Verde (Almuñécar). *La intrusión en España (TIAC'88)*, IGME, 413-426.
- Huyakorn, P. S., Wu, Y. S., y Park, N. S. (1996). Multi-phase approach to the numerical solution of a sharp interface saltwater intrusion problem. *Water Resour. Res.*, 32, 93-102.
- IGME (1987). *Cálculo de las explotaciones en el acuífero de Almuñécar (1985-86)*, informe técnico (inérito), Instituto Geológico y Minero de España, 293 págs.
- López López, J. F. (1974). *Estudio hidrogeológico de los ríos Seco y Verde de Almuñécar (Granada)*, trabajo monográfico (inérito), Cátedra de Hidrogeología (Univ. de Granada), 112 págs.
- Padilla, F., Leclerc, M., y Villeneuve, J. P. (1990). A formal finite element approach for open boundaries in transport and diffusion groundwater problems. *Int. J. Numerical Methods Fluids*, 11, 287-301.
- Padilla, F., y Cruz-Sanjulián, J. (en prensa). Modeling seawater intrusion with open boundary conditions. *Ground Water*.
- Padilla, F., Secretan, Y., y Leclerc, M. (en prensa, a). On open boundaries in the finite element approximation of two-dimensional advection-diffusion flows. *Int. J. Numerical Methods Engineering*.
- Padilla, F., Benavente, J., y Cruz-Sanjulián, J. (en prensa, b). Numerical simulation of the influence of management alternatives of a projected reservoir on a small alluvial aquifer affected by seawater intrusion (Almuñécar, Spain). *Environ. Geol.*
- SGOP (1972). *Informe sobre los ensayos de bombeo y pruebas efectuadas en los sondeos para abastecimiento a Almuñécar (Granada)*, informe técnico (inérito).
- Shamir, U., y Dagan, G. (1971). Motion of the seawater interface in coastal aquifers: A numerical solution. *Water Resour. Res.*, 7, 644-657.
- Velasco, D., Vizcaíno, M., y Alvarez, A. (1984). *Proyecto de la presa de Otívar*, informe técnico (inérito), Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Confederación Hidrográfica del Sur de España.

Recibido el 20 de diciembre de 1996.

Aceptado el 31 de marzo de 1997.