

# Simulación tridimensional del flujo de agua subterránea con densidad variable. Aplicación al problema de la intrusión marina en el acuífero de Cabo Roig (Alicante-España)

P. Romero<sup>(1)</sup>, F.J. Elorza<sup>(2)</sup>, J.M. Murillo<sup>(1)</sup> y L. Rodríguez<sup>(3)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid, España.  
p.romero@igme.es, jm.murillo@igme.es

(2) Dept. de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos. ETSI Minas.  
Universidad Politécnica de Madrid. c/ Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid, España.  
jelorza@dmami.upm.es

(3) Diputación Provincial de Alicante.  
Avda. Orihuela, 128. 03006 Alicante, España.

## RESUMEN

El control de la intrusión marina en el acuífero costero de Cabo Roig juega un papel importante en la gestión del agua subterránea en esta zona, para lo cual se ha desarrollado un modelo tridimensional de flujo subterráneo con densidad variable (régimen estacionario). El desarrollo de este modelo ha permitido reproducir las condiciones de piezometría y salinidad en el año 2001 y analizar los efectos de posibles escenarios de recarga, bombeo y gestión. Este modelo de intrusión marina ha sido construido mediante el código FEFLOW v 5.0, desarrollado por Diersch (2002). Este código permite resolver problemas de flujo subterráneo con densidad variable, como lo es el problema de la intrusión marina, en el cual el movimiento del agua subterránea está en función de los gradientes hidráulico y de concentraciones. En este trabajo se presentan los principales resultados de la calibración para las condiciones del año 2001 y de dos de los escenarios analizados, además de la valoración de la intrusión marina y la descarga submarina de agua subterránea, componentes fundamentales en el cálculo del balance hídrico en este acuífero costero.

Palabras clave: Cabo Roig, densidad variable, descarga submarina, intrusión marina, simulación numérica

## ***Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. Application to seawater intrusion problem in the Cabo Roig aquifer (Alicante-Spain)***

### ABSTRACT

*The seawater intrusion control on the Cabo Roig coastal aquifer is an important issue in the groundwater management of this zone. Therefore a three-dimensional variable density groundwater flow model (steady state) has been developed, which has made possible to reproduce the piezometry and salinity conditions in the year 2001 and to analyze the effects of possible scenarios of recharge, pumping and management. To develop the seawater intrusion model the FEFLOW v 5.0 code, developed by Diersch (2002), has been used. This code allows to simulate variable density groundwater flow problems, i.e. the seawater intrusion where the groundwater movement is function of hydraulic and concentration gradient. This paper presents the model results for the hydrological conditions 2001 and the analysis of two management scenarios. The seawater intrusion and the submarine groundwater discharge are two fundamental components in the calculation of the water budget of this coastal aquifer.*

*Key words: Cabo Roig, numerical model, seawater intrusion, submarine groundwater discharge, variable density*

### Introducción

El acuífero costero de Cabo Roig está ubicado al sur de la provincia de Alicante y ocupa una superficie terrestre sobre el nivel del mar de 61 km<sup>2</sup> (figura 1). Los límites oficialmente considerados en el Plan Hidrológico de la Cuenca son los siguientes:

- Al norte, la falla de San Miguel, que desconecta las areniscas del Plioceno de Cabo Roig de las de Torre Vieja.
- Al sur, la falla de río Seco, cuya traza discurre casi paralela al cauce de dicho río, en dirección oeste-este aproximadamente.
- Límite occidental: desde San Miguel de Salinas

hasta Los Gracias de Abajo, está formado por el contacto impermeable de las margas del Andaluciense y desde Los Gracias de Abajo hasta Las Casas de Río Seco, este límite está definido por el eje de un anticlinal en dirección casi Norte-Sur, que actúa como un umbral hidrogeológico (IGME, 1990).

- El límite oriental corresponde al borde costero.

Sin embargo, en este estudio, además del dominio terrestre del acuífero anteriormente indicado, se considera un dominio marino de aproximadamente 35 km<sup>2</sup>, debido a la continuidad de la capa acuífera por debajo del mar lo que provoca que, en la zona sur, el afloramiento del acuífero se produzca varios kilómetros mar adentro.

Desde el punto de vista litológico, está constituido por areniscas y calcarenitas del Plioceno inferior, con una potencia media de 50 m y una potencia máxima de 134 m en el borde costero de río Nacimiento, el cual presenta un grado de confinamiento variable, desde libre a confinado. En el borde occidental se encuentran los afloramientos del acuífero (18 km<sup>2</sup>),

correspondientes a la principal área de recarga; otra área importante de recarga corresponde a los depósitos Cuaternarios de río Nacimiento (3 km<sup>2</sup>).

El acuífero se encuentra sometido a un proceso natural de intrusión marina debido a que presenta conexión hidráulica directa con el mar. En las últimas décadas, dicho proceso se vio acelerado por la intensa explotación de agua subterránea en algunas zonas y una reducida recarga natural del acuífero. La poca recarga natural se origina por la combinación de la escasa precipitación registrada (279 mm/a) y la elevada evapotranspiración potencial (1014 mm/a). Según los datos de salinidad disponibles, la zona que presenta mayores problemas de intrusión marina está localizada en el sector central del acuífero, mientras que al norte y sur del acuífero se presentan concentraciones más bajas de salinidad.

En la actualidad, la explotación media de agua subterránea se estima en unos 3 hm<sup>3</sup>/a y los mayores caudales de bombeo se encuentran en la zona sureste del acuífero (IGME, 2002; CHS, 2004), mientras que quince años atrás el mayor núcleo de explotación

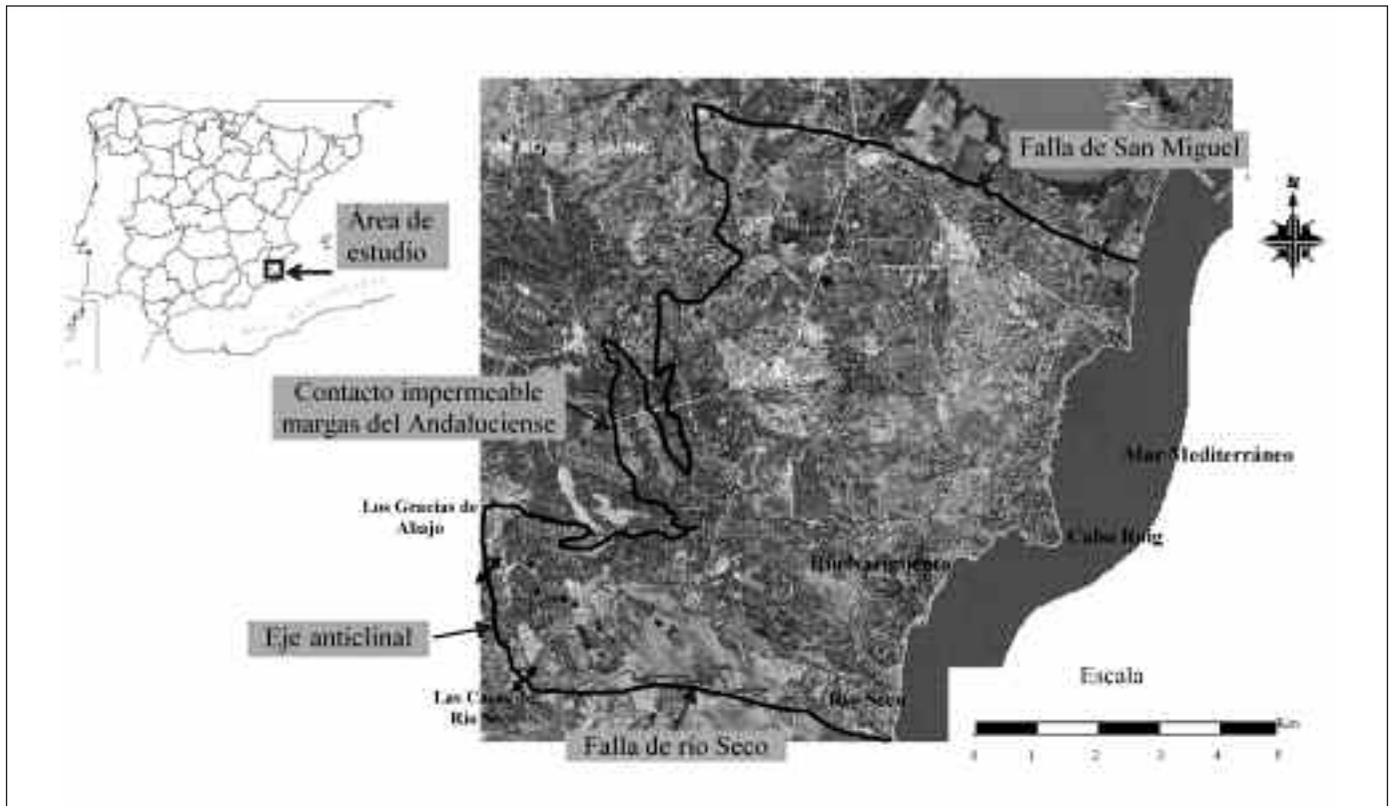


Figura 1. Ubicación y límites geográficos del acuífero costero de Cabo Roig  
Figure 1. Situation and geographical limits of Cabo Roig coastal aquifer

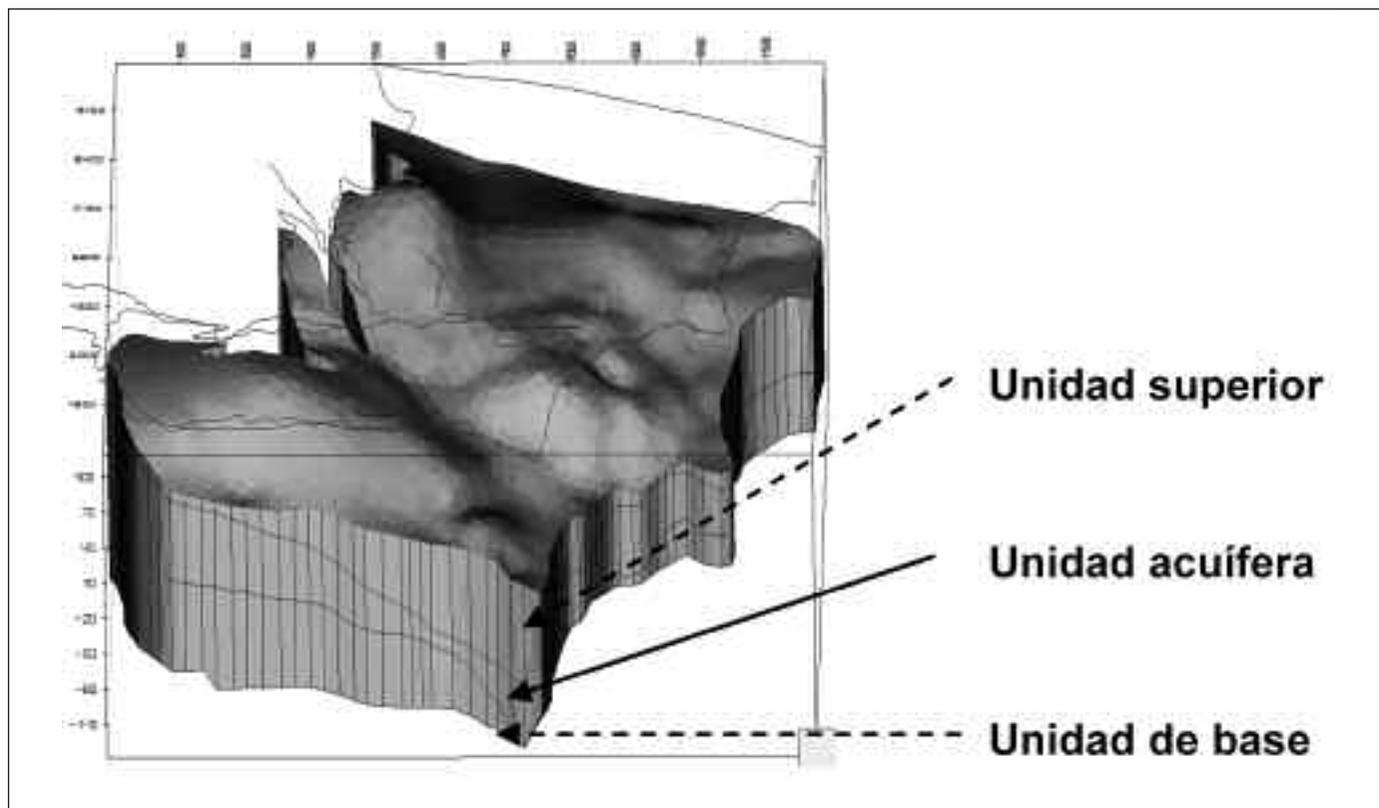


Figura 2. Unidades hidrogeológicas del acuífero de Cabo Roig  
*Figure 2. Hydrogeologic units of Cabo Roig aquifer*

se encontraba localizado en la zona central, con una extracción promedio de alrededor de 6 hm<sup>3</sup>/a (IGME, 1990).

El objetivo general del proyecto que se sintetiza en el presente trabajo titulado: "Análisis y contraste de metodologías para la valoración del impacto de la extracción de agua en acuíferos costeros salobres. Aplicación al acuífero de Cabo Roig (Alicante)", es desarrollar una herramienta de gestión para valorar el impacto, en calidad y cantidad, de la extracción de agua subterránea en el acuífero costero de Cabo Roig, mediante la simulación de la intrusión marina con un modelo de flujo subterráneo con densidad variable en 3 dimensiones. Para el desarrollo de este modelo de flujo subterráneo con densidad variable (estado estacionario), fue necesario realizar varios estudios previos:

- Actualización hidrogeológica del acuífero de Cabo Roig (IGME, 2003).
- Estimación de la recarga natural en el acuífero de Cabo Roig (IGME, 2004).

### Modelo conceptual

En el modelo conceptual de este acuífero se definieron 3 unidades hidrogeológicas, en función de su geología, características hidráulicas y de su ubicación en el sistema. La primera unidad del modelo, la unidad superior, contiene 3 términos litoestratigráficos: los depósitos Cuaternarios, Pliocuatnarios y Plioceno Superior. La segunda unidad corresponde al acuífero en estudio y está formada por las areniscas y calcarenitas del Plioceno. Por último, la tercera unidad, la de base, se considera de muy baja permeabilidad al estar formada por margas del Andaluciense. En la figura 2 y la tabla 1 se resume la litología y la caracterización hidrogeológica de las tres unidades identificadas en el modelo hidrogeológico conceptual.

En general, los valores de transmisividad medidos se encuentran entre 20 y 50 m<sup>2</sup>/d, a excepción de los valores encontrados en la zona costera de río Nacimiento y Seco, donde se presentan transmisivi-

Unidades hidrogeológicas	Términos litostratigráficos	Características
Unidad superior	Limos, gravas, margas, costra calcárea, areniscas y calcarenitas. Cusumano, Plioceniano y Plioceno superior e inferior.	Acuífero, acuífero. Distintos valores de permeabilidad. Libre, semiconfinado, confinado.
Unidad acuífera	Areniscas y calcarenitas Plioceno inferior.	Acuífero. Permeable. Libre y confinada.
Unidad de base	Margas, Antisluiciense.	Acuífero. Muy baja Permeabilidad.

Tabla 1. Características de las unidades hidrogeológicas definidas en el acuífero de Cabo Roig  
 Table 1. Characteristics of the hydrogeologic units defined in the Cabo Roig aquifer

dades de hasta 750 m<sup>2</sup>/d, que se explican por la presencia de karstificaciones en el techo del acuífero. Los valores de porosidad están comprendidos entre 0.12 % y 4 %.

Hay que resaltar que, para poder simular de manera realista la interacción entre el acuífero y el mar, el modelo conceptual ha incluido el dominio terrestre y marino del acuífero, dada la continuidad bajo el mar de la capa acuífera. En la zona sur el contacto agua dulce/agua salada se produce a través del fondo marino a más de 5 km<sup>2</sup> mar adentro (figura 3).

Para completar la definición del modelo conceptual resulta imprescindible definir las componentes y procesos más importantes del balance hidrológico (figura 4). Entre las principales entradas de agua al

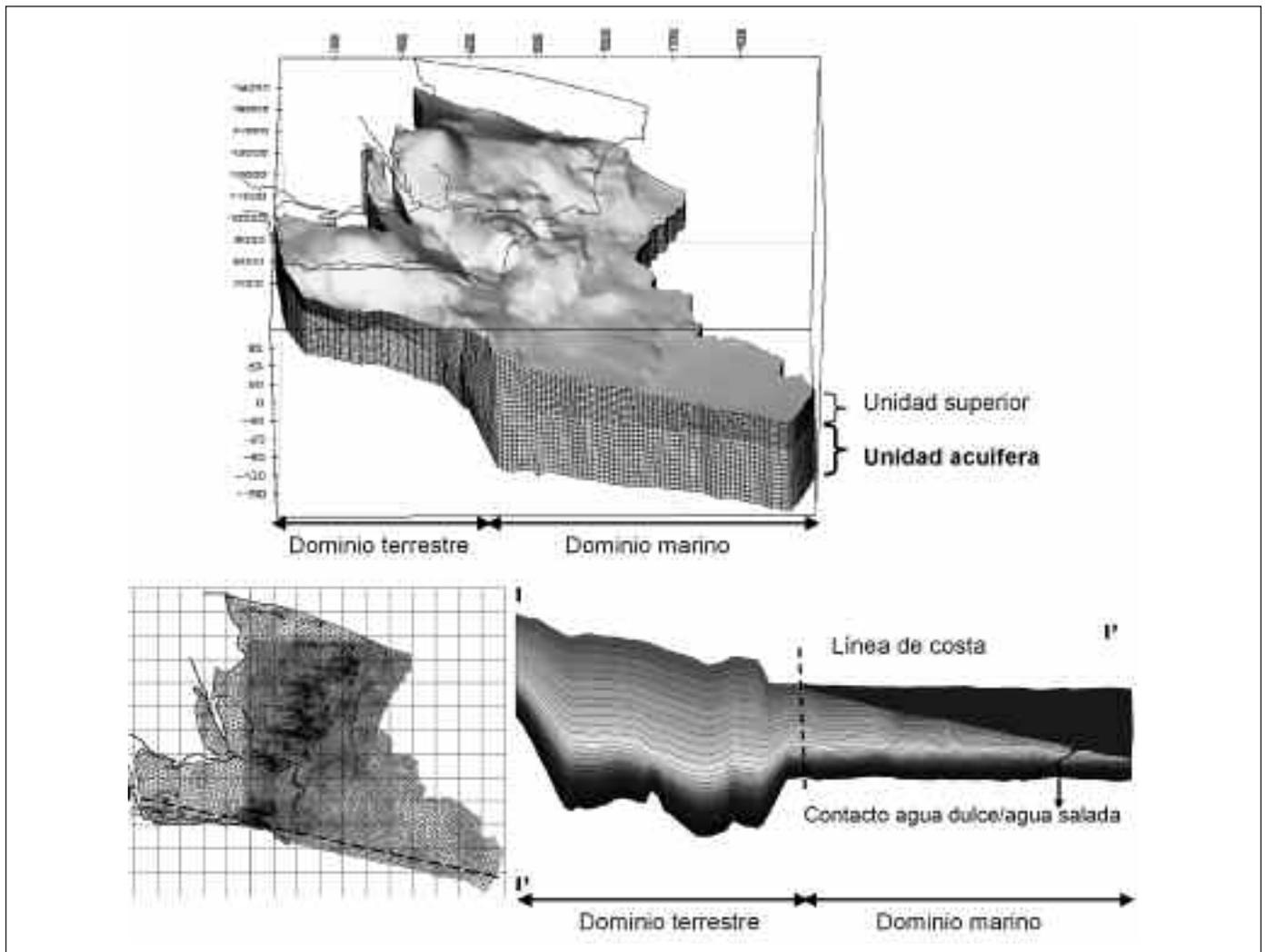


Figura 3. Dominio del modelo numérico: dominio terrestre y marino del acuífero  
 Figure 3. Domain numerical model: terrestrial and marine domain of aquifer

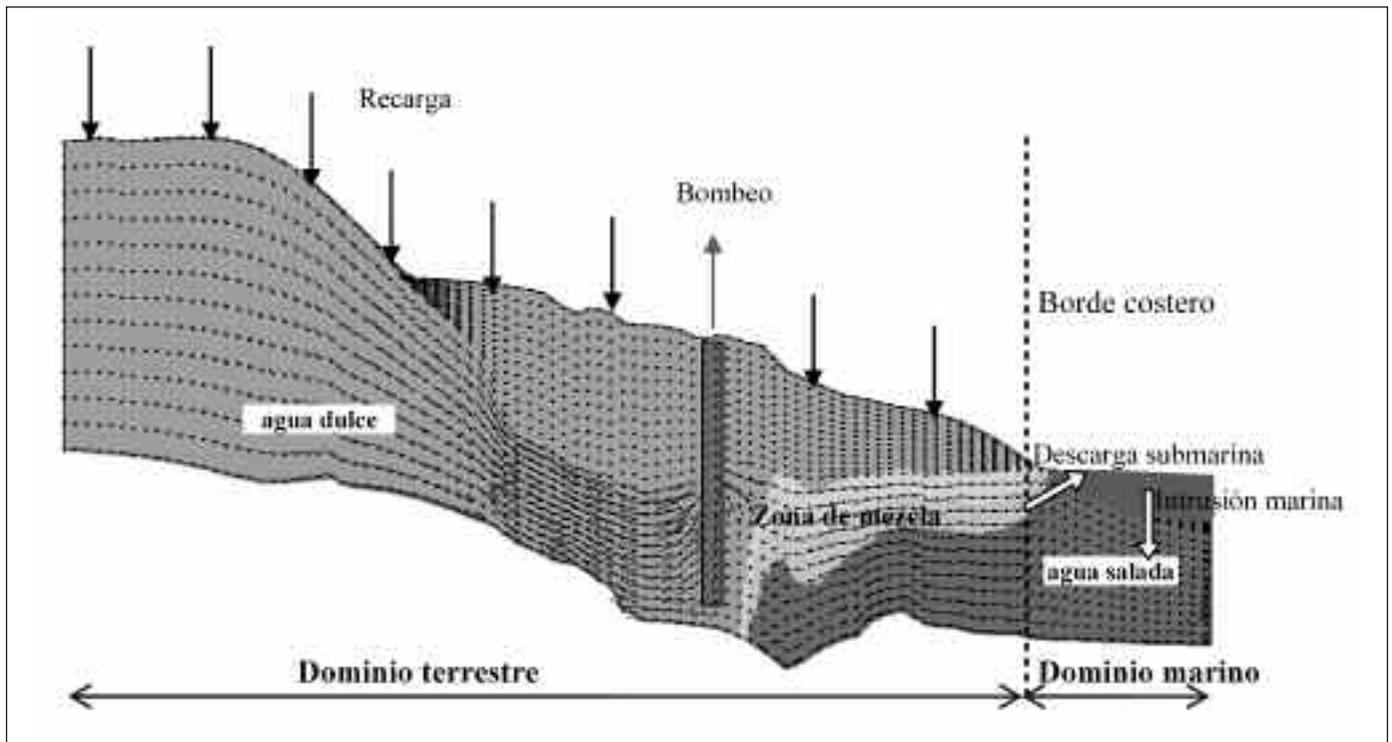


Figura 4. Componentes del balance hídrico y líneas de flujo en una sección vertical del acuífero de Cabo Roig  
 Figure 4. Water budget components and flow lines of the cross-section for the Cabo Roig aquifer

sistema se tienen: a) entrada de agua de mar, b) recarga natural por precipitaciones y c) retornos de riego. Las principales salidas de agua son: d) descargas submarinas de agua subterránea y e) las extracciones por bombeos.

Normalmente, la descarga submarina de agua subterránea y la intrusión marina, son componentes pobremente descritas y cuantificadas en los balances hídricos, pero de gran importancia en los balances de agua para zonas costeras (Kohout, 1960; Lee and Cheng, 1974; Langevin, 2001). Las entradas de agua de mar en el acuífero de Cabo Roig se producen en el borde costero en algunas zonas y, en cambio en otras, varios kilómetros mar adentro a través del fondo marino. Este flujo de agua salada entrante se mezcla con el flujo de agua dulce saliente, formándose una zona de mezcla o transición de carácter dinámico (figura 4), en donde coexisten una recirculación del flujo de agua salada y un flujo de agua dulce, que sale como descarga submarina de agua subterránea; por todo lo cual es importante cuantificar la contribución de agua dulce y salada en dicha descarga submarina, para conocer si se producen emisiones importantes de agua dulce al mar (Smith, 2004; Wilson, 2005; Prieto, 2001).

### Modelo numérico

En este trabajo se describe la simulación del flujo subterráneo con densidad variable (estado estacionario), en la cual se considera a la mezcla de agua dulce y agua salada como un único fluido con propiedades dependientes de la densidad (fluidos miscibles), donde se acoplan dos procesos físico-químicos: el movimiento de agua subterránea y el transporte de la salinidad en el acuífero; por ello, las ecuaciones de flujo y transporte deben ser resueltas conjuntamente. Además, a la hora de la definición del problema a resolver, se han realizado algunas consideraciones adicionales:

- Medio saturado y anisotrópico.
- Densidad variable del fluido.
- No se consideran los efectos de la variabilidad de la viscosidad y temperatura del fluido.
- La salinidad del acuífero considerada es de origen marino, sin considerar la posible salinidad del agua de la recarga asociada al aerosol marino, por su cercanía a la costa.
- Nivel del mar constante ( $h_s=0$ ), sin considerar las variaciones debido a las olas, mareas, efectos meteorológicos, volumen de los océanos, etc.

### **Código de simulación**

El código de simulación empleado para estudiar el comportamiento de la intrusión marina en el acuífero de Cabo Roig ha sido FEFLOW v. 5.0, desarrollado por Diersch (2002), que resuelve problemas de flujo y transporte con densidad variable en 2D y 3 D. Los procesos de transporte de solutos miscibles que considera son advección y dispersión hidrodinámica, y permite condiciones de contorno y restricciones muy variadas.

### **Discretización espacial**

El área del acuífero de Cabo Roig modelizada fue de 96 km<sup>2</sup>, discretizada tridimensionalmente (figura 5) mediante 77475 nudos y 143040 elementos finitos (5960 elementos/capa x 24 capas), con un mayor refinamiento alrededor de la zona costera y de los bombeos. Mientras que la discretización vertical se realizó

mediante 24 capas; las primeras doce corresponden a la unidad superior y las siguientes corresponden al acuífero del Plioceno; la tercera unidad formada por las margas del Andaluciense, no fue incluida en este modelo, por el gran contraste de permeabilidades existente con la capa acuífera; por lo cual se empleó en su lugar una condición de contorno inferior de flujo nulo.

### **Asignación de parámetros del acuífero**

Los parámetros hidráulicos del modelo fueron obtenidos de mediciones de campo, estudios previos y referencias bibliográficas (CHS, 2004; IGME, 1990, 2002, 2004 y 2006; Rodríguez Estrella, 2003; UPCT, 2002 y 2004). A partir de toda esta información se definió un rango de variación de los valores para cada parámetro, y durante el proceso de calibración algunos valores han sido reajustados y otros han permanecido inalterados.

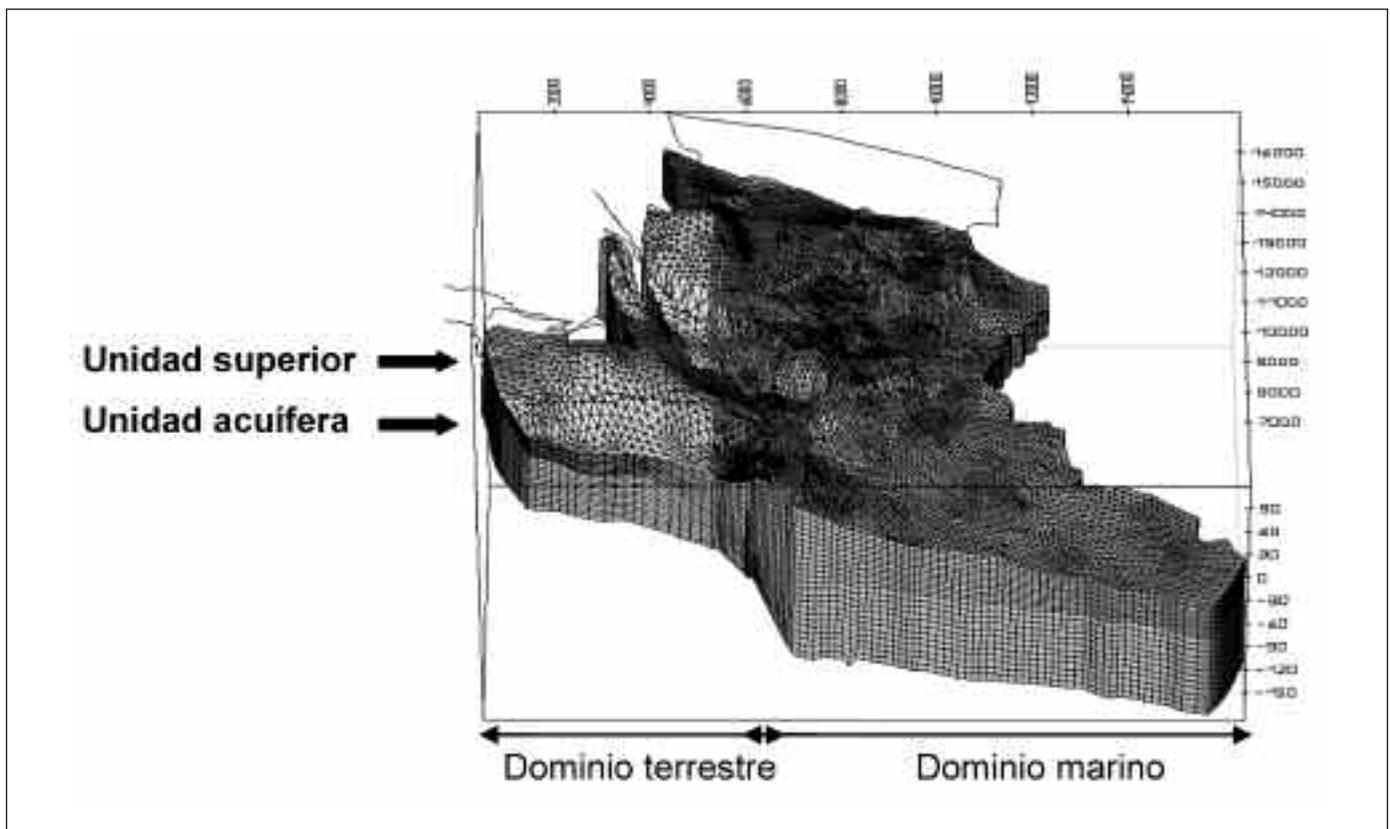


Figura 5. Discretización espacial del modelo del acuífero de Cabo Roig  
*Figure 5. Spatial discretization of the Cabo Roig aquifer model*

Parámetros	Capa confinante	Acuífero
Conductividad hidráulica (m/d) $K_x = K_y = K_z$ ( $K_z = K_x/50$ )	0.01-1.2	0.9-2.1
Dispersividad longitudinal (m)	50	50
Dispersividad transversal (m)	0.1	0.1
Difusión molecular (m <sup>2</sup> /s)	1 e-08	1 e-08

Tabla 2. Valores de los parámetros obtenidos tras la etapa de calibración del modelo

Table 2. Estimated parameter values during model calibration stage

Se ha identificado y estimado la necesidad de emplear ciertos parámetros como valores globales o locales, en función de mejorar los resultados del modelo. Particularmente, se realizó una zonación de algunos parámetros como la conductividad hidráulica, la recarga natural y el coeficiente de almacena-

miento específico. Mientras otros parámetros como la porosidad, difusión molecular, dispersividad longitudinal y transversal han sido empleados como valores únicos para todo el dominio.

Otro factor que se consideró importante fue la anisotropía de la conductividad hidráulica, esta anisotropía fue estimada por calibración:  $K_x = K_y > K_z$  ( $K_z = K_x/50$ ). En la tabla 2 se presentan los parámetros obtenidos tras la última etapa de calibración.

### Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno coinciden con los límites físicos reales del acuífero (figura 6). Los límites norte, sur y occidental, se han definido como condiciones de contorno de flujo y transporte nulo (borde impermeable); estas condiciones fueron impuestas para definir el dominio del acuífero.

La condición de contorno en la superficie topográfica bajo el mar es de concentración constante de

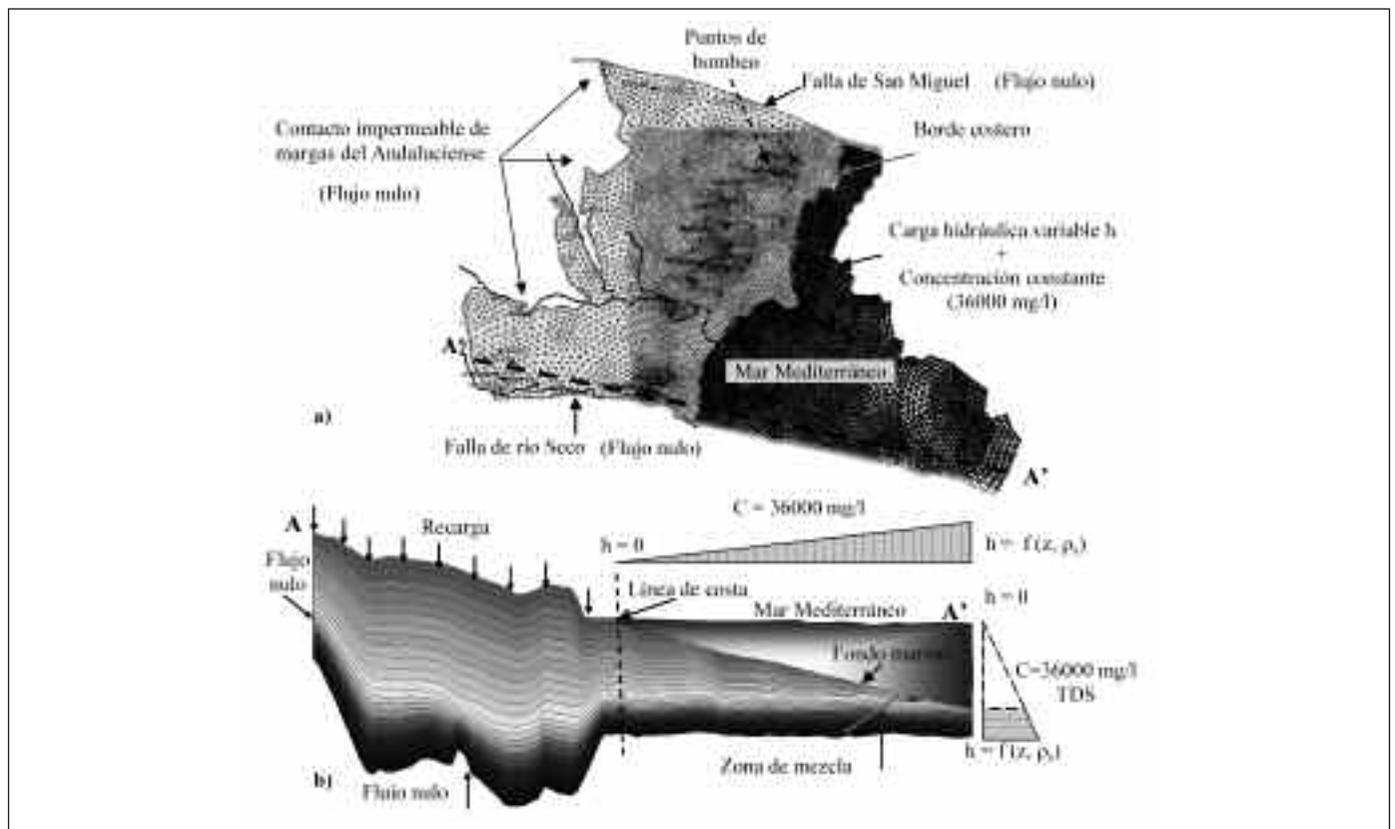


Figura 6. Dominio y condiciones de contorno empleadas en el modelo de flujo con densidad variable: a) en planta y b) sección A-A'

Figure 6. Domain and boundary conditions used in variable density groundwater model: a) surface view and b) cross-section A-A'

36000 mg/l (TSD) y de carga hidráulica  $h$  variable con la profundidad del fondo marino, definida por la siguiente expresión (Diersch, 2005):

$$h = \frac{\rho_s}{\rho_0} h_s - \left( \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \right) z$$

asumiéndose, además, que el nivel del mar no varía,  $h_s = 0$ , y que  $h$  tiene una distribución vertical lineal. Donde,  $h$  es el nivel piezométrico,  $\rho_s$  es la densidad del agua de mar,  $\rho_0$  es la densidad del agua subterránea y  $z$  es la profundidad del fondo marino bajo el nivel del mar. En la figura 6 b se puede observar el aumento en profundidad de la carga hidráulica en la superficie del dominio marino, por efecto de la densidad del agua de mar.

En la zona terrestre, la condición de contorno de la superficie superior corresponde a la recarga por lluvia y retornos de riegos (IGME, 2004), calculada previamente mediante el programa Visual Balan V.1.0 (Samper *et al.*, 1999); además se realizó una zonación del acuífero con respecto a los valores estimados de recarga natural, en función del tipo y uso del suelo y de la geología. La superficie inferior se define en todo el acuífero como una condición de flujo nulo, debido a la formación cuasi-impermeable de las margas del Andaluciense. Por último, se imponen puntualmente los caudales de bombeo extraídos de la unidad acuífera en el 2001; debido a que no se cuenta con datos de la extracción de agua subterránea para el año 2001, este valor fue ajustado a partir de los inventarios realizados por el IGME en el 2002 (3 hm<sup>3</sup>/a) y por CHS en 2003 (3.8 hm<sup>3</sup>/a)

### Análisis de los resultados de la calibración

La etapa de calibración del modelo se realizó con los valores medios de los niveles piezométricos y de salinidad medidos durante el año 2001. Esta calibración del modelo con densidad variable ha presentado un alto grado de dificultad, debido a la alta sensibilidad que tiene a 1) la geometría y heterogeneidad del medio geológico, 2) la variabilidad de la forma y posición de la cuña salina y 3) la distribución espacial de los valores de algunos parámetros.

En la figura 7 se presentan los resultados del ajuste logrado entre la piezometría calculada y la observada para el 2001, donde se puede observar un buen ajuste en casi todas las zonas del acuífero. La zona norte y algunos registros de la zona central presentan niveles piezométricos por encima del nivel del mar, debido a la cercanía de la principal zona de recarga.

Aunque la mayoría de registros de la zona central y los de la zona sur presentan niveles piezométricos por debajo del nivel del mar, lo cual favorece la intrusión marina en dichas zonas; los valores más negativos se encuentran en la zona sur-este cerca de río Seco, por la intensa explotación durante los últimos años.

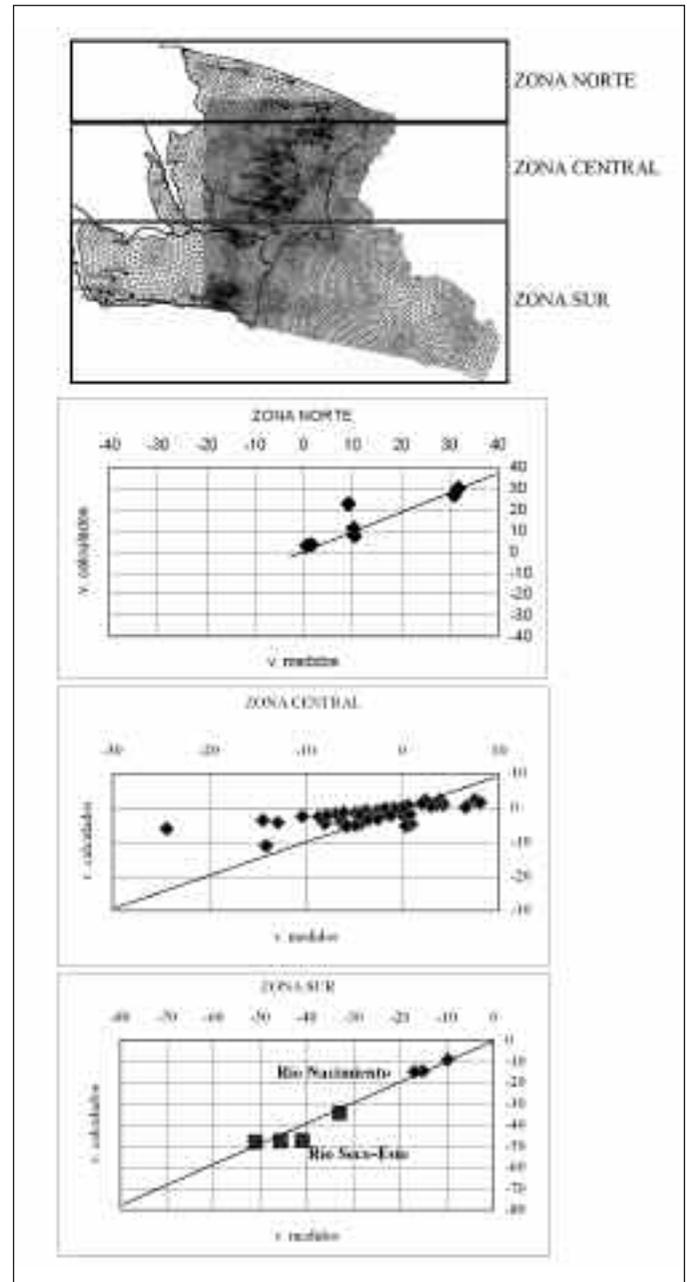


Figura 7. Calibración de los niveles piezométricos medios del año 2001

Figure 7. Calibration of mean piezometric levels for 2001

En la figura 8 se presentan los resultados de la simulación de los niveles de agua para el 2001, donde puede observarse que los principales conos de descenso, por orden de importancia, se sitúan en la zona sur (sector este de río Seco) y la zona central (entre Punta Prima y Urbanización La Zenia), producto de la intensa explotación del acuífero en esas zonas. Actualmente la zona sur es el mayor núcleo de explotación, mientras que algunos sondeos de la zona central han sido abandonados por el incremento de la salinidad de sus aguas. Los mayores niveles de agua se encuentran localizados en los afloramientos de las areniscas y calcarenitas del Plioceno, en el sector occidental del acuífero.

En la figura 9 se observa el grado de ajuste logrado, en general aceptable, para algunos sondeos situados en las distintas zonas del acuífero, entre los valores de salinidad (TSD) medidos y simulados, para las condiciones medias del 2001. A continuación se describirá el comportamiento de la zona de mezcla y de la cuña salina, para lo cual es necesario previamente definir el tipo de agua según los valores de salinidad

(TSD): se considerará como agua dulce a las concentraciones menores de 1000 mg/l TSD; agua salobre, con valores entre 1000-10000 mg/l TSD; agua salada, concentraciones entre 10000 y 36000 mg/l TSD y agua de mar con 36000 mg/l TSD.

En las curvas de salinidad de la figura 9, se observa un incremento de norte a sur de los valores de la salinidad. La zona norte no registra, en profundidad, valores mayores a 10000 mg/l TSD (agua salada). Mientras que los sondeos en la zona central y sur, registran agua salada aproximadamente en la cota -20 m snm en la primera zona y entre las cotas -40 (río Nacimiento) y -150 m snm (río Seco) en la zona sur, encontrando valores de salinidad de hasta 26000 mg/l TSD.

En la zona norte, el contacto agua dulce/agua salada se produce justo en el borde costero, sin embargo debido a la cercanía a la principal área de recarga (areniscas y calcarenitas del Plioceno), esta zona presenta escasa penetración de la intrusión marina (figura 10), encontrándose en ella los valores más bajos de salinidad, entre 896 y 7180 mg/l. En esta zona, el

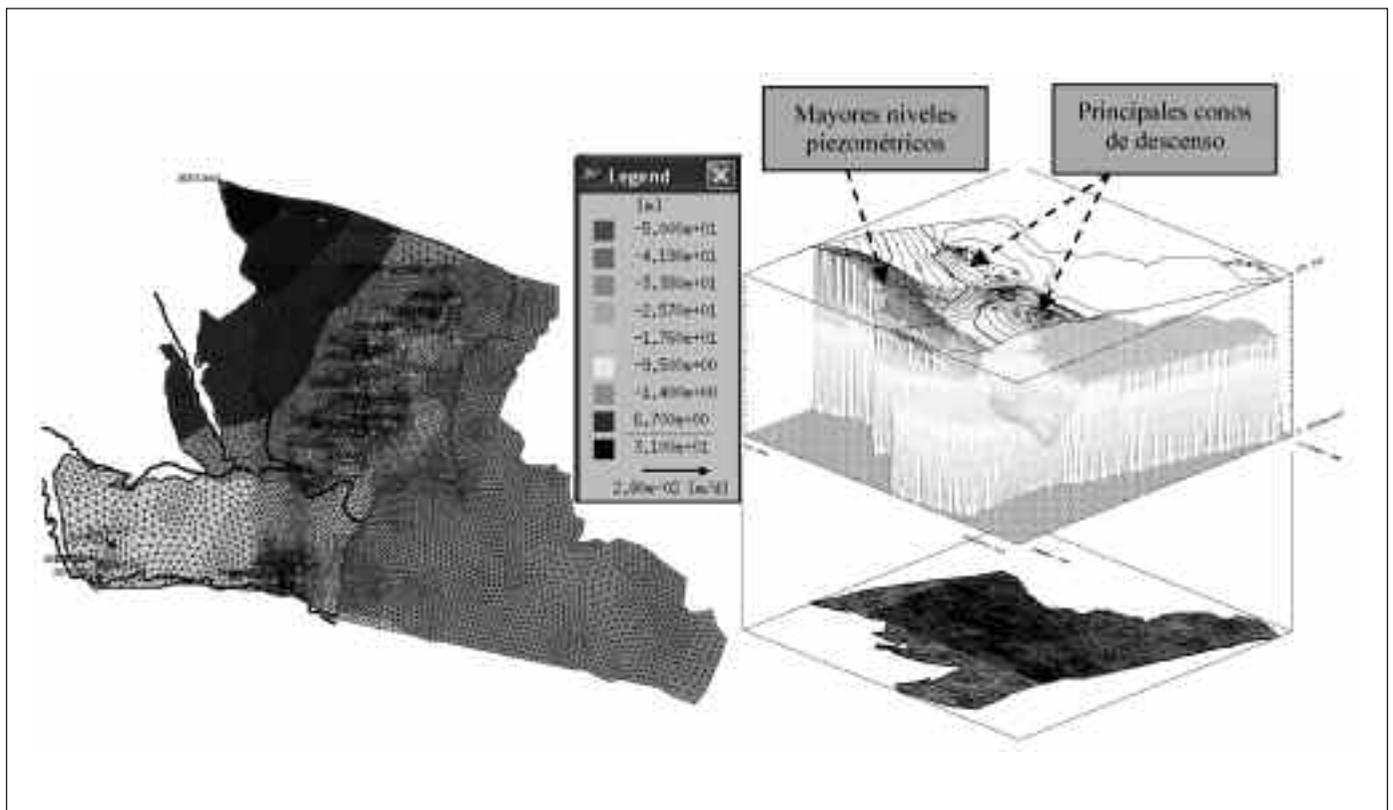


Figura 8. Simulación de los niveles piezométricos en el acuífero para las condiciones medias del 2001  
 Figure 8. Simulation of piezometric levels in the aquifer for the mean conditions of 2001

pie de la cuña salina está aproximadamente a 1500 m tierra adentro y el espesor de la zona de mezcla es de aproximadamente unos 10 m (Corte I-I', figura 11).

La zona central presenta los valores más altos de salinidad (1280 a 32000 mg/l TSD) de toda el área de estudio (figura 10), además de la presencia de conos de agua salada, debido a la intensa explotación de antiguos núcleos de bombeo y a la mayor penetra-

ción de los pozos (Corte II-II', figura 11). Esta zona central presenta niveles piezométricos negativos, lo cual favorece la mayor penetración de la cuña salina, aproximadamente hasta 2500 m, y el espesor de la zona de mezcla es de unos 25 m.

En cambio, la interfaz agua dulce/agua salada en la zona sur (entre los ríos Nacimiento y Seco) se produce a más de 5 km mar adentro (Rodríguez Estrella,

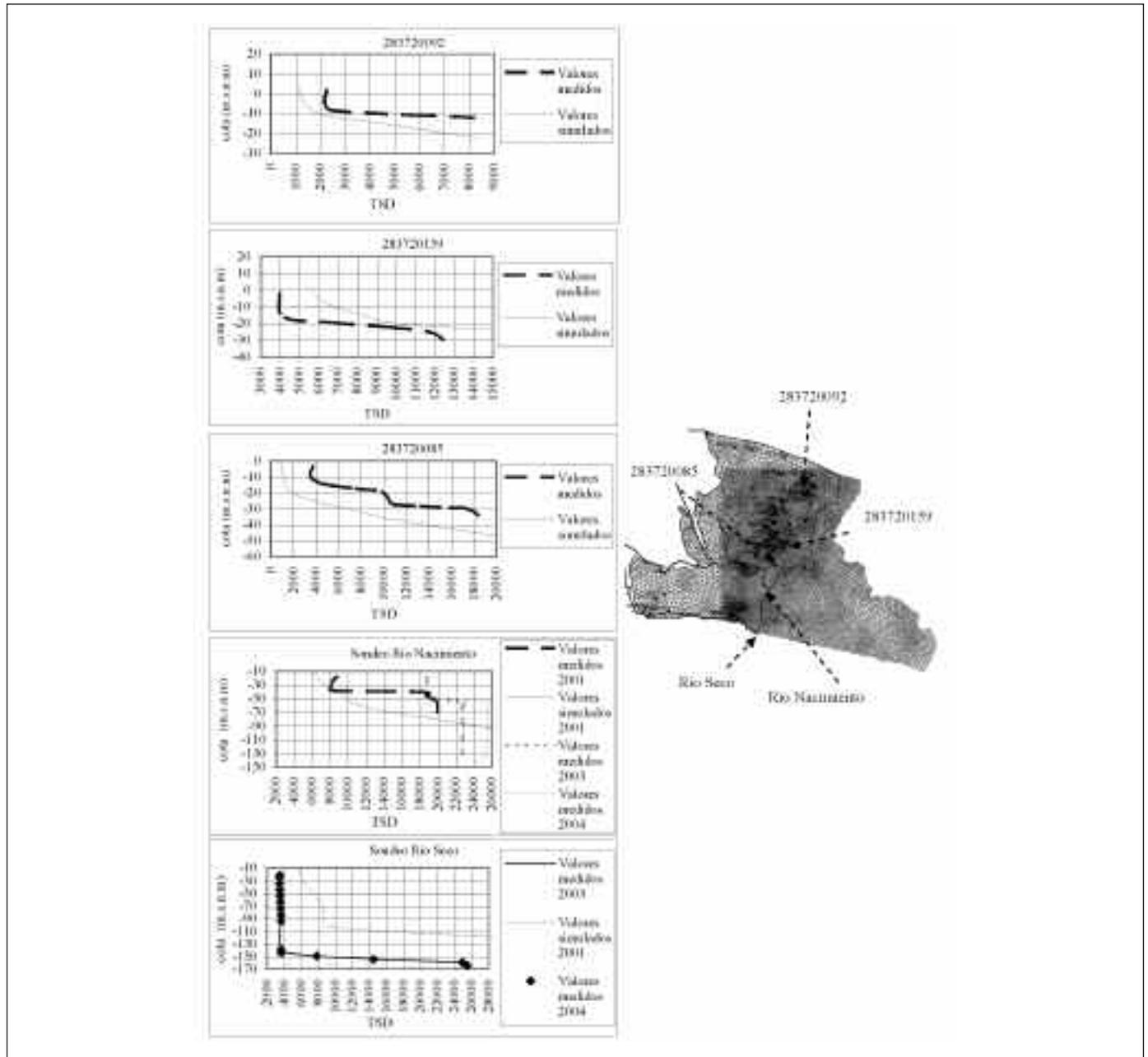


Figura 9. Resultados de la calibración de las concentraciones de sal  
 Figure 9. Salinity calibration results

2003), por lo cual en esta zona los valores de la salinidad en la parte más superficial del acuífero son relativamente bajos, debido a la presencia de una potente zona de mezcla (figuras 9 y 10). Además, en esta zona el agua salada (concentraciones de hasta 26000 mg/l TSD) se encuentra a mayor profundidad, entre 40 y 155 m, y el ancho de la zona de mezcla es aproximadamente de 25 a 135 m, siendo este último valor el mayor espesor registrado en toda el área de estudio. En esta zona sur, el pie de la cuña salina se encuentra tierra adentro, a 1600 m de la línea de costa, con valores de salinidad comprendidos entre 500 y 26000 mg/l TSD (corte III-III', figura 11).

En la figura 9, además de la calibración de los sondeos de los ríos Nacimiento y Seco, se han incluido los registros de salinidad medidos en 2003 y 2004 (UPCT, 2004); en ellos se puede ver que, en río Nacimiento, la salinidad se incrementa con el tiempo, debido a la alta permeabilidad del material confinante en esta zona y a que la interfaz agua dulce/agua salada está más próxima a la costa, mientras que en río Seco los datos de salinidad no han presentado, hasta el momento, variación temporal significativa, debido a que el contacto agua dulce/agua salada está más alejado de la costa y a que el material confinante presenta una transmisividad más baja.

### Simulación de los escenarios de explotación propuestos

Tras la calibración del modelo para las condiciones del 2001, se ha proseguido con el análisis de dos escenarios de explotación, con distintas condiciones de recarga y bombeo, a partir de los cuales se realizará una comparación de los efectos producidos en el sistema acuífero.

El escenario I consiste en simular unas condiciones hidrológicas muy deficitarias, para lo cual se han empleado valores bajos de recarga (1 hm<sup>3</sup>/a) y el máximo bombeo registrado hasta la fecha, 6 hm<sup>3</sup>/a, como lo sucedido en 1989. La finalidad de desarrollar este escenario es determinar la disminución de los niveles de agua y el incremento de la salinidad en las extracciones, ante condiciones extremas de recarga y bombeo.

El escenario II analiza una propuesta de gestión recomendada en el estudio de UPCT (2002), que consiste en la construcción de 12 pozos de explotación que captan agua salobre de las areniscas del Plioceno inferior en las zonas costeras de Glea, Río Nacimiento y Río Seco (4 sondeos en cada zona). Los sondeos estarían muy cerca del borde costero, a una distancia inferior a 100 m del mar y se extraería un caudal total

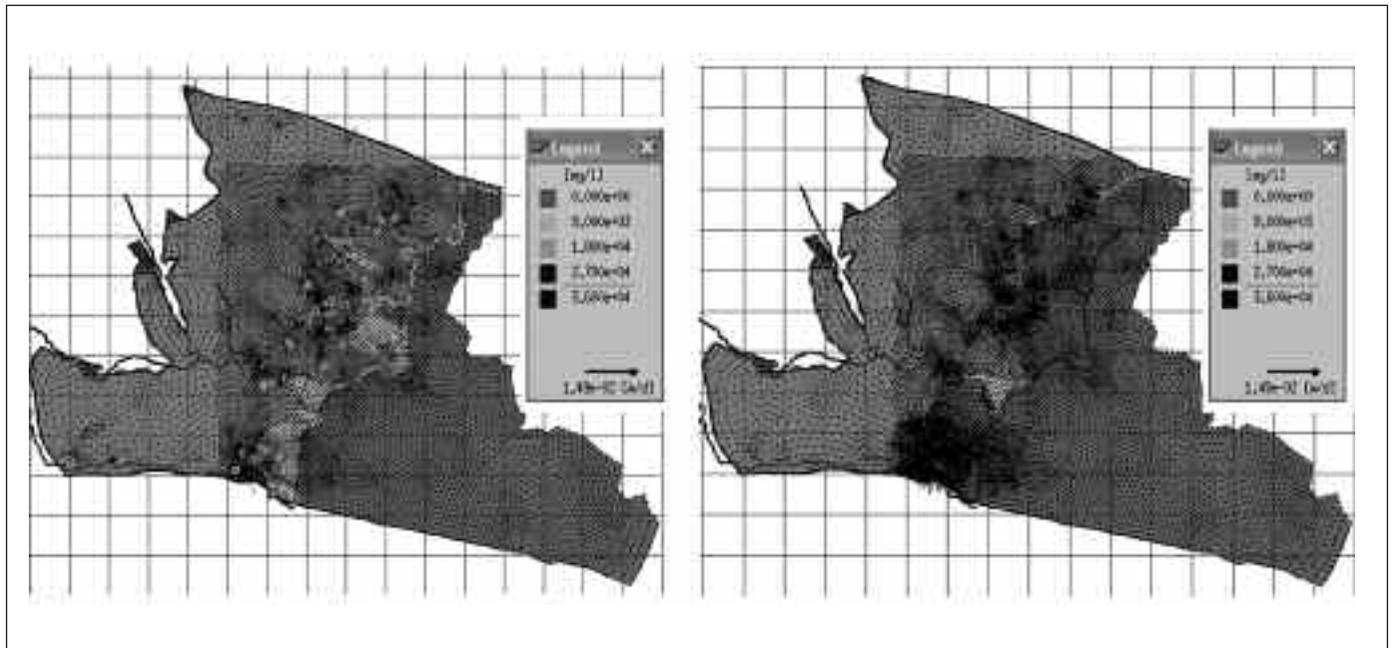


Figura 10. Simulación de la distribución de la salinidad en el muro de la capa confinante a) y en el muro del acuífero b), para las condiciones medias del 2001

Figure 10. Simulation of salinity distribution in the confining unit bottom a) and the aquifer bottom b), for the mean conditions of 2001

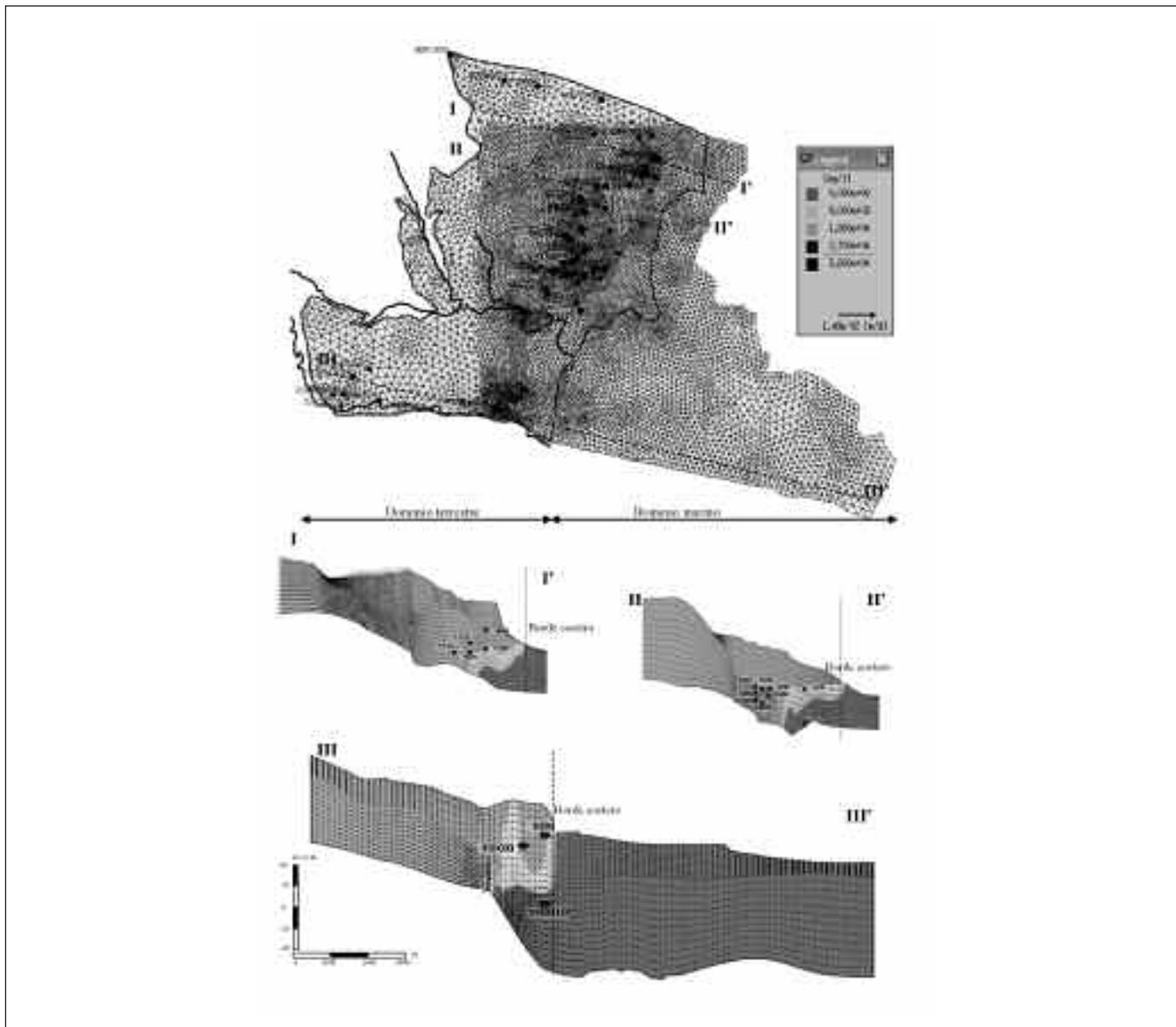


Figura 11. Simulación de la forma y posición de la cuña salina y de la zona de mezcla para las condiciones medias del 2001 (TSD, mg/l)  
 Figure 11. Simulation of the shape and position of salt wedge and transition zone for the mean conditions of 2001 (SDT, mg/l)

de agua salobre de 1000 l/s (31,5 hm<sup>3</sup>/a), (figura 12).

La finalidad de la propuesta de UPCT (2002) es: 1) incrementar el recurso agua en la zona, mediante la desalación por osmosis inversa de los 31,5 hm<sup>3</sup>/a extraídos de la cuña salina y 2) controlar el avance de la cuña salina, mediante la depresión por bombeo, como medida de prevención y control contra la intrusión marina. Este método consiste en limitar la penetración de la intrusión marina estableciendo una línea de bombeo en la cuña salina a lo largo de la costa,

interceptando el flujo subterráneo entrante de agua salada.

Como parte de la simulación del escenario II, además de considerar la extracción de 31,5 hm<sup>3</sup>/a para abastecer a la desaladora, se consideró la extracción ya existente, 3 hm<sup>3</sup>/a, y una recarga media estimada de 2.4 hm<sup>3</sup>/a.

En las figuras 13 a) y b) se presentan los resultados de la simulación de la intrusión marina mediante secciones de la zona norte, central y sur, para los esce-

narios I y II. Para ambos escenarios se observa que en las tres zonas se produce un similar avance de la cuña salina, esto indica un deterioro análogo en la calidad del agua por el incremento de la salinidad de la misma. En dichas figuras se observa un mayor avance de la cuña salina en la zona norte y central, mientras que en la zona sur no existe avance significativo, y al mismo tiempo el agua salada se encuentra a menos profundidad en todas las zonas del acuífero. Además, se observa que: la zona de mezcla aumenta en la zona norte, en la zona central no se produce un cambio significativo y en la zona sur en el escenario I (figura 13 b) aumenta el espesor de la zona de mez-

cla, mientras que en el escenario II disminuye significativamente (figura 13 b).

Mediante la comparación de ambos escenarios, se llega a la conclusión de que la puesta en marcha de los bombeos para la desaladora no presentaría un mayor riesgo del que puede estar expuesto el acuífero bajo condiciones extremas, con la diferencia de que en el escenario II se incrementaría sustancialmente el recurso agua en la zona. Por lo cual se considera válida esta alternativa de gestión, siempre que se consideren los posibles efectos y riesgos en el acuífero.

A continuación se plantean algunas consideracio-

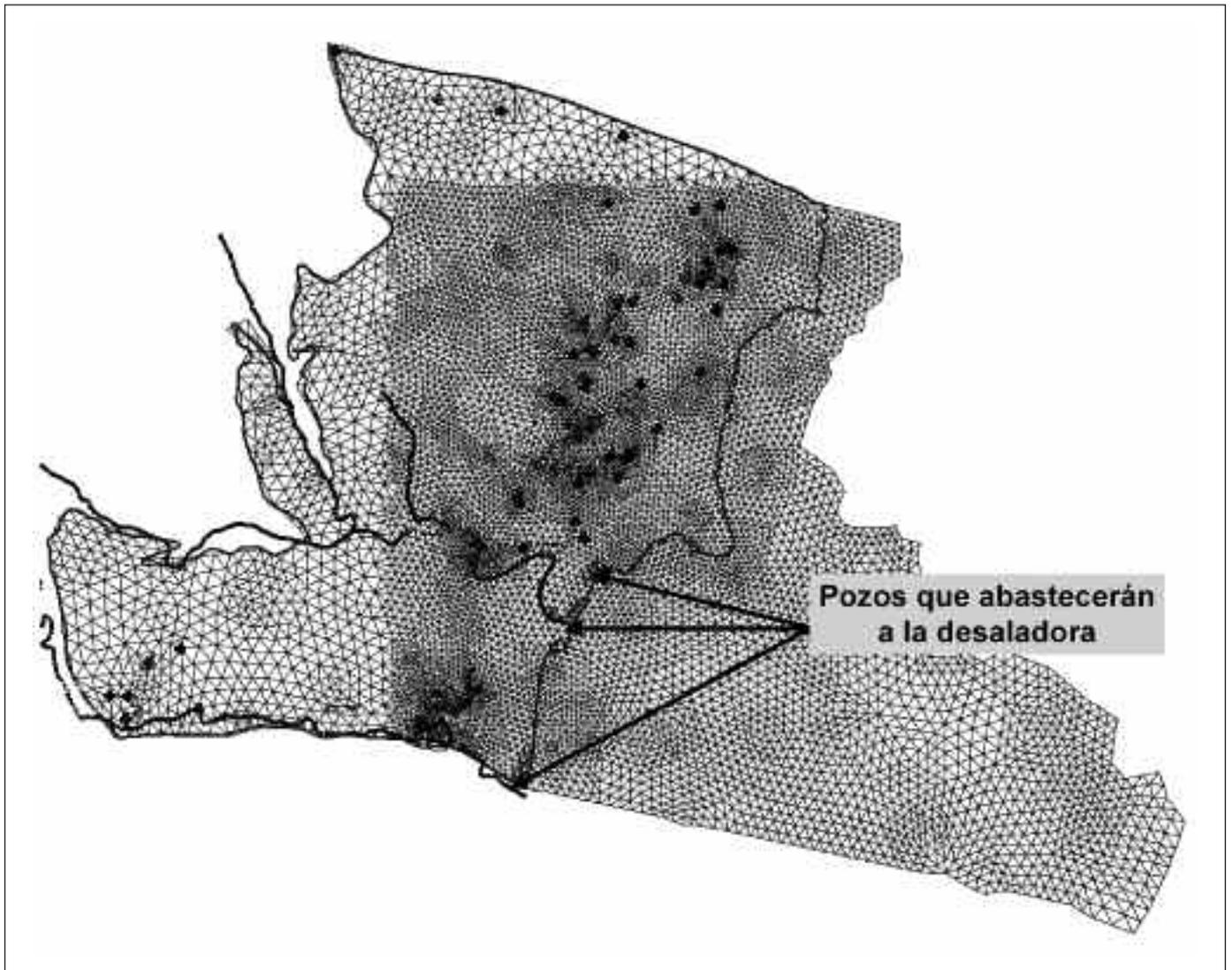


Figura 12. Ubicación geográfica de los sondeos que abastecerían a la planta desaladora. (Escenario II)  
Figure 12. Geographic location of the soundings that will supply to desalination plant (scenario II)

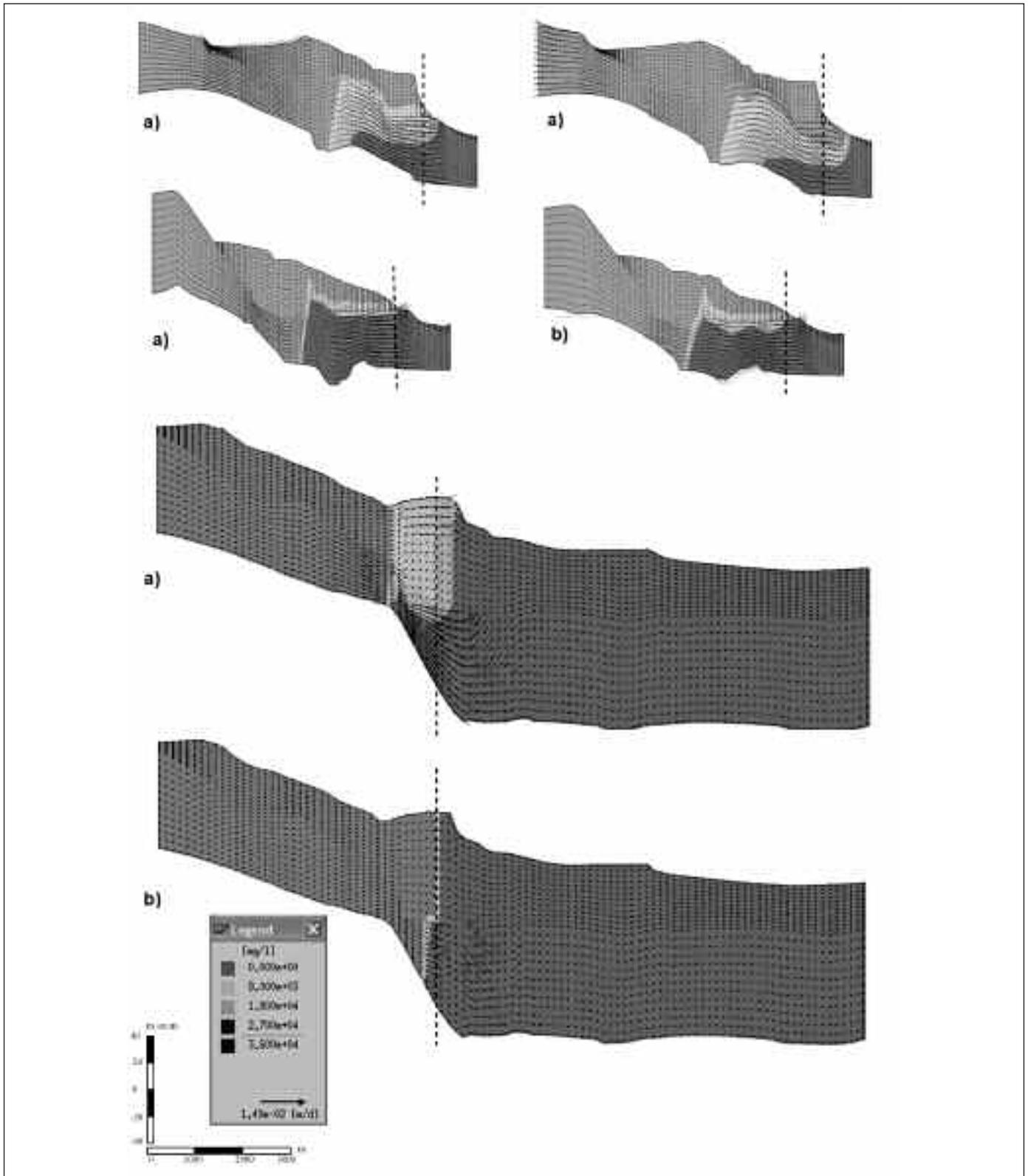


Figura 13. Comportamiento de la intrusión salina para a) el escenario I: explotación de 6 hm<sup>3</sup>/a y recarga mínima de 1 hm<sup>3</sup>/a y b) el escenario II: implantación de planta desaladora (explotación de 31.5 hm<sup>3</sup>/a) y la existente (3 hm<sup>3</sup>/a)  
 Figure 13. Behaviour of seawater intrusion for a) scenario I: exploitation of 6 hm<sup>3</sup>/a and minimum recharge of 1 hm<sup>3</sup>/a and b) scenario II: implementation of desalination plant (exploitation of 31.5 hm<sup>3</sup>/a) and the existing one (3 hm<sup>3</sup>/a)

nes a tener cuenta en este plan de gestión (escenario II):

- La ventaja de extraer agua salobre, en lugar de emplear directamente agua de mar, es disminuir el coste de tratamiento.
- La alternativa II no disminuirá la intrusión marina ya existente; lo que se conseguirá es un avance controlado de la intrusión marina hacia una nueva posición de equilibrio, a partir de la cual se estabilizará. Existe un evidente avance de la cuña salina con respecto a las condiciones del 2001; como se puede ver comparando las figuras 11 y 13 b).
- La simulación de este escenario II ha ayudado a identificar y delimitar las áreas más susceptibles a la intrusión marina y el incremento de la salinidad que se produciría. Se deberá realizar un monitoreo frecuente de los sondeos de abastecimiento a la planta desaladora y de los sondeos ubicados dentro de la zona identificada con mayor riesgo a la intrusión marina.
- Un factor importante a tener en cuenta, es el diseño de los pozos de captación (extensión y situación de la rejilla) para la desaladora, que permitan una máxima productividad, minimizando las pérdidas de las reservas de agua dulce del acuífero. Además, sería interesante plantear y analizar un esquema combinado, con depresión por bombeo y con pozos de inyección, que ayude a incrementar la carga hidráulica de agua subterránea para frenar el avance tierra adentro de la cuña salina.

## Conclusiones

El modelo numérico desarrollado incluye un dominio terrestre y marino del acuífero, debido a que la posición de la interfaz agua dulce/agua salada es muy variable espacialmente. En las zonas norte y central la intrusión se produce en el borde costero, mientras que en la zona sur se produce 5 Km. mar adentro, a través del fondo marino.

El modelo tridimensional de flujo subterráneo con densidad variable (régimen estacionario) presenta una calibración aceptable de los valores de piezometría (67 puntos) y salinidad (37 puntos) y consigue reproducir los niveles de agua y el comportamiento de la zona de mezcla y cuña salina para las condiciones medias del año 2001.

Además, el modelo realizado constituye una importante herramienta para la gestión del agua, que ha permitido evaluar los efectos de diversos escenarios de gestión. Tras su análisis, el planteamiento de

la extracción en la zona costera de agua salobre, para su posterior desalinización por osmosis inversa (escenario II), se considera una fuente de abastecimiento válida, siempre que al mismo tiempo se controlen y limiten las pérdidas de agua dulce y el avance de la intrusión marina.

## Referencias

- CHS, 2004. *Asistencia técnica para el estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación de los acuíferos de la unidad hidrogeológica 07.48 Terciario de Torrevieja y del acuífero 07.31.145 Cabo Roig*.
- Diersch, H.-J. 2005. *FEFLOW - White papers* vol. I. WASY GmbH Institute for water resources planning and systems research Ltd, Berlin, 133 -138.
- Diersch, H.-J. 2002. *FEFLOW User's manual versión 5.0*. WASY GmbH Institute for water resources planning and systems research Ltd. Berlin.
- IGME, 1990. *Estudio de la intrusión marina en acuíferos costeros de Murcia y Alicante*. Informe del centro de documentación del IGME.
- IGME, 2002. *Estudio de los recursos subterráneos de agua salobre en los Acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig, II Fase*. Informe del centro de documentación del IGME.
- IGME, 2004. *Estimación de la recarga en el acuífero de Cabo Roig (Alicante)*. Informe del centro de documentación del IGME.
- IGME, 2006. *Modelo de flujo subterráneo con densidad variable para simular problemas de intrusión marina en el acuífero de Cabo Roig (Alicante)*.
- Kohout, F. A., 1960. Cyclic flow of salt water in the Biscayne aquifer of southeast Florida. *Journal of Geophysical Research*, 65 (7), 2133-2141.
- Langevin, C. D., 2001. *Simulation of ground-water discharge to Biscayne Bay, southeastern Florida*. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 00-4251.
- Lee, C.H. y Cheng T.S., 1974. On seawater encroachment in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 10, 1039-1043.
- Prieto, C., 2001. *Modelling freshwater-seawater interactions in coastal aquifers: Long-term trends and temporal variability effects*. Licentiate thesis, Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Rodríguez Estrella, T., 2003. Situación de la intrusión marina en la cuenca del Segura: Evolución desde el Tiac'88. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros (TIAC)*. 111
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J., García Vera, M.A., 1999. *Manual del usuario del programa Visual BALAN v.1.0*. ENRESA. Madrid.
- Smith, A. J., 2004. Mixed convection and density-dependent seawater circulation in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 40.W08309, doi:10.1029/ 2003WR 002977.
- Smith, A. J. y Turner J.V., 2001. Density-dependent surface

water-groundwater interaction and nutrient discharge in the Swan-Canning Estuary. *Hydrological Processes*, 15, 2595-2616.

UPCT, 2004. *Informe final sobre el control piezométrico e hidroquímico de los pozos ubicados en las fincas "Campoamor" y "Lo Monte", dentro del acuífero de Cabo Roig (Alicante)*. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad Politécnica de Cartagena.

UPCT, 2002. *Informe final sobre los sondeos y pozos de*

*investigación, para captar agua del mar a través de los acuíferos costeros, llevados a cabo en el litoral del sector meridional de la provincia de Alicante por parte del Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura*". Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad Politécnica de Cartagena.

Wilson, A., 2005. Fresh and saline groundwater discharge to the ocean: A regional perspective. *Water Resources Research*, 41.W02016, doi:10.1029/2004WR003399.

Recibido: diciembre 2006

Aceptado: mayo 2007