

Instituto Geológico
y Minero de España



DIPUTACIÓN
DE ALICANTE
CICLO HÍDRICO

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).



MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO CON DENSIDAD VARIABLE PARA SIMULAR LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO DE CABO ROIG (ALICANTE).

MADRID. JUNIO 2007

El presente estudio ha sido realizado en el marco del convenio de asistencia técnica suscrito entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Excm. Diputación Provincial de Alicante (DPA), actuando como directores del mismo D. José Manuel Murillo Díaz (IGME) y D. Luis Rodríguez Hernández (DPA).

El equipo técnico, que ha intervenido en su colaboración, ha estado formado por:

Responsable:

José Manuel Murillo Díaz (IGME)

Autores:

Paola Leonor Romero Crespo (IGME)

Francisco Javier Elorza Tenreiro (ETSI Minas-UPM)

Toma de datos en campo:

Jorge Hornero Díaz (IGME)

José Luis García Aróstegui (IGME)

Tomás Rodríguez Estrella (UPCT)

CONTENIDO

	Pág.
1. Introducción.....	1
2. Objetivos y alcance de la modelización.....	2
3. Metodología de investigación y estudios previos.....	3
4. Modelo conceptual del sistema acuífero de Cabo Roig.....	4
4.1. Geografía y Geología.....	4
4.2. Unidades hidrogeológicas.....	7
4.3. Características hidrogeológicas.....	8
4.4. Componentes del balance hidrológico.....	8
5. Simulación numérica del sistema acuífero de Cabo Roig.....	9
5.1. Descripción del código de simulación utilizado.....	10
5.2. Desarrollo del modelo matemático del flujo subterráneo.....	10
5.2.1. Dominio y marco hidrogeológico.....	11
5.2.2. Discretización espacial y temporal.....	13
5.2.3. Condiciones iniciales.....	14
5.2.4. Condiciones de contorno del modelo.....	17
5.2.5. Parámetros del modelo.....	19
5.2.5.1. Conductividad hidráulica.....	19
5.2.5.2. Coeficiente de almacenamiento específico.....	23
5.2.5.3. Recarga.....	24
5.2.5.4. Dispersión hidrodinámica.....	25
5.3. Calibración de los modelos desarrollados.....	25
5.3.1. Modelo de flujo hidrogeológico en estado estacionario (densidad constante).....	26
5.3.2. Modelo de flujo en estado transitorio (densidad constante). Período 2000-2006.....	30
5.3.3. Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio terrestre del acuífero.....	41
5.3.4. Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio ampliado del acuífero (dominio terrestre y marino del acuífero).....	43
5.3.5. Comparación entre los balances de agua de los distintos modelos desarrollados.....	52
5.4. Resultados de la simulación de los escenarios propuestos.....	55
5.4.1. Modelo de flujo en estado transitorio (densidad constante). Período 2000-2006.....	55
5.4.1.1. Escenario I: Extracciones medias (3 hm ³ /a) y recarga media (2.6 hm ³ /a) para el periodo 2006-2010.....	55
5.4.1.2. Escenario II: Extracciones máximas.....	59

registradas (6 hm ³ /a) y recarga mínima (1 hm ³ /a) para el periodo 2006-2010.....	61
5.4.1.3. Escenario III: Implantación de una planta desaladora (31.5 hm ³ /a), extracciones medias (3 hm ³ /a) y recarga media (2.6 hm ³ /a) para el periodo 2006-2010.....	61
5.4.2. Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio ampliado del acuífero (dominio terrestre y dominio marino del acuífero).....	64
5.4.2.1. Escenario II: Extracciones máximas registradas (6 hm ³ /a) y recarga mínima.....	64
5.4.2.2. Escenario III: Implantación de una planta desaladora (31.5 hm ³ /a), extracciones medias (3 hm ³ /a) y recarga media (2.6 hm ³ /a).....	66
5.4.3. Comparación entre los balances de agua de los distintos escenarios desarrollados.....	71
6. Conclusiones y discusión.....	74
7. Referencias.....	77

Anexo I: Ubicación de los sondeos y asignación del ID para la calibración del modelo de flujo en estado transitorio.

RESUMEN

En este informe se presenta el desarrollo y resultados de un modelo tridimensional del flujo hidrogeológico con densidad variable del acuífero costero de Cabo Roig, ubicado al sur de la provincia de Alicante; realizado para que sirva como herramienta de gestión del agua subterránea para ayudar a la toma de decisiones, y que permita predecir los efectos e impactos de probables escenarios de explotación y de recarga, así como de alternativas de gestión.

Se explica y argumenta la evolución que ha tenido el desarrollo del modelo matemático hidrogeológico de Cabo Roig; describiendo y justificando el desarrollo de los cuatro modelos realizados. Este informe se finaliza con el desarrollo de un modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario, del cual presentaremos los principales resultados de la calibración y la simulación de la piezometría y salinidad para las condiciones medias del 2001, además del balance hidrológico y la cuantificación de la intrusión marina y la descarga submarina de agua subterránea, las cuales son componentes imprescindibles en los balances en acuíferos costeros.

Actualmente está en realización el modelo de flujo con densidad variable en régimen transitorio, con el cual se concluiría la etapa de modelización. Debido a que este modelo no se encuentra finalizado, en este informe se han complementado los resultados del modelo con densidad variable (estacionario) con los resultados de un modelo de flujo con densidad constante en régimen transitorio; aunque estos últimos representen solo una aproximación del avance real de la intrusión marina.

1. INTRODUCCION

El acuífero de Cabo Roig está ubicado al sur de la provincia de Alicante. Este acuífero costero se encuentra sometido a un proceso natural de intrusión marina, debido a que presenta conexión hidráulica directa con el mar. Este proceso se ve acelerado por la intensa explotación de agua subterránea en algunas zonas y debido a los valores bajos de recarga natural del acuífero, todo lo cual no favorece la recuperación de los niveles y la calidad del agua subterránea. La poca recarga natural se origina por la combinación de una escasa precipitación y una elevada evapotranspiración potencial (1014 mm/a).

En la actualidad la explotación promedio de agua subterránea es de unos 3 hm³/a y los mayores caudales de bombeo se encuentran en la zona sur este del acuífero, mientras que algunos años atrás los mayores núcleos de explotación se encontraban localizados en la zona central del acuífero.

Por esto último, la zona central del acuífero presenta los valores más altos de salinidad así como una mayor variación de la salinidad en profundidad. Mientras que la zona norte y sur del acuífero presenta un agua de mejor calidad, con valores más bajos de salinidad y con una variación poco significativa de la salinidad con la profundidad.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA MODELIZACIÓN

El objetivo general de este proyecto 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 estimación de la intrusión marina con un modelo de flujo subterráneo con densidad variable en 3 dimensiones.

Durante las distintas etapas del proyecto se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

1. Elegir el código numérico para análisis y contraste de la metodología a emplear en la valoración de las extracciones en acuíferos salobres.
2. Evaluar los datos disponibles; para determinar cuales son imprescindibles para este estudio, para estudios posteriores y cuales son menos necesarios.
3. Definir el modelo conceptual
4. Construir el modelo matemático
5. Calibrar y estimar los parámetros del modelo
6. Realizar distintas simulaciones que reflejen los diversos escenarios de explotación y de recarga actualmente previstos.

En este informe final se presentan las características y los resultados obtenidos de las simulaciones y las calibraciones correspondientes a los siguientes cuatro modelos:

- Modelo de flujo hidrogeológico en estado estacionario (densidad constante)
- Modelo de flujo en estado transitorio (densidad constante). Periodo 2001-2010.
- Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio terrestre del acuífero.
- Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio ampliado del acuífero (incluyendo el dominio terrestre y el dominio marino del acuífero).

Después de construidos estos cuatro modelos, se pasó a la explotación de dos de los mismos. Particularmente, se han simulado tres escenarios, en función de la recarga y el bombeo, con el modelo de flujo con densidad constante en régimen transitorio:

- Escenario I: Extracciones medias ($3 \text{ hm}^3/\text{a}$) y recarga media ($2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$) para el periodo 2006-2010.
- Escenario II: Extracciones máximas registradas ($6 \text{ hm}^3/\text{a}$) y recarga mínima para el periodo 2006-2010.
- Escenario III: Implantación de una planta desaladora ($31.5 \text{ hm}^3/\text{a}$), extracciones medias ($3 \text{ hm}^3/\text{a}$) y recarga media ($2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$) para el periodo 2006-2010

Los escenarios II y III también fueron analizados con el modelo con densidad variable en estacionario (dominio ampliado). Solo se emplearon estos dos modelos para la simulación de escenarios, debido a que son considerados los modelos más representativos de los desarrollados.

Debido a la gran sensibilidad que presentan los problemas de transporte a la variación en espacio y tiempo de algunos parámetros que son poco o nada conocidos en este acuífero, se ha decidido posponer el desarrollo del modelo de flujo y transporte con densidad variable en estado transitorio hasta la actualización de los datos disponibles.

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS PREVIOS

En este informe se presenta una metodología que ha permitido calibrar y estimar de forma gradual algunos parámetros hidrogeológicos imprescindibles. Iniciando con el tratamiento más simplificado (modelo de flujo con densidad constante) e incrementando de manera progresiva la complejidad del problema de flujo y transporte. Se planteó al inicio del proyecto desarrollar este trabajo de modelación en cuatro etapas, de las cuales sólo se llegó a desarrollar y calibrar las tres primeras; la última (modelo de flujo y transporte en transitorio con densidad variable) no se ha desarrollado debido a la gran complejidad que tienen esos modelos, ocasionada por la alta variabilidad espacial y temporal de los parámetros del acuífero; complejidad que se ve doblemente incrementada por el escaso conocimiento que se tiene de la evolución espacial de algunos parámetros del acuífero que influyen en el proceso de transporte.

Sin embargo, durante el desarrollo de la tercera etapa se vio la necesidad de emplear un dominio geográfico ampliado del acuífero, que incluyese el dominio terrestre y el marino, debido a que no se reproducía la ubicación y comportamiento de la cuña de intrusión marina en la zona sur, donde el contacto agua dulce/agua salada se produce a más de 5 km mar adentro (Rodríguez Estrella, 2003). Por todo ello, las etapas desarrolladas finalmente son:

Etapa 1: Modelo de flujo hidrogeológico en estado estacionario (densidad constante)

Etapa 2: Modelo de flujo en estado transitorio (densidad constante). Periodo 2001-2010.

Etapa 3: Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio terrestre del acuífero.

Etapa 4: Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para un dominio ampliado del acuífero (dominio terrestre y dominio marino del acuífero).

La aplicación de la metodología propuesta presenta como ventaja adicional la de evaluar y comparar la efectividad de los resultados de los modelos de densidad constante frente a los modelos de densidad variable.

Para este estudio se compilaron algunos estudios y artículos de distintos autores que se presentaran en el apartado de referencias, además de inventarios de puntos acuíferos y registros de datos de campo. Este informe nº III se complementa con la información presentada en los siguientes informes previos:

Informe I: “Actualización del conocimiento hidrogeológico en el acuífero de Cabo Roig (Alicante) con vistas a la realización de un modelo matemático de densidad variable” (IGME, 2003).

Informe II: “Estimación de la recarga al acuífero de Cabo Roig (Alicante)” (IGME, 2004).

4. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO DE CABO ROIG

4.1. Geografía y Geología

Los límites geográficos tradicionales del acuífero son: en la zona norte, la falla normal de San Miguel; en la zona sur, la falla normal del río Seco que discurre casi paralela al cauce de este río; al este el mar Mediterráneo y en el borde occidental, el contacto impermeable de las margas del Andaluciense y el eje de un anticlinal de dirección casi norte-sur, que une los Gracias de Abajo y las Casas del Río Seco (mapa 1), que funcionaría como un umbral hidrogeológico.

En el inventario realizado en los años 2000 y 2001 por el Instituto Geológico y Minero de España, se generó un archivo de puntos acuíferos donde se pudo identificar una secuencia cronoestratigráfica que va desde el Andaluciense (Mioceno Superior) hasta el Cuaternario moderno. Según estos datos, la geología del acuífero de Cabo Roig (de muro a techo) consiste principalmente en:

Tma^{BC}₁₂ – Andaluciense: Se desarrolla hasta la base del Plioceno y está formada por margas y limos rojos con un espesor muy variable, desde casi inexistente hasta los 140 m en la zona de San Miguel de Salinas.

Plioceno: Descansa directamente sobre el Andaluciense y está formada por una secuencia de dos términos fácilmente identificables.

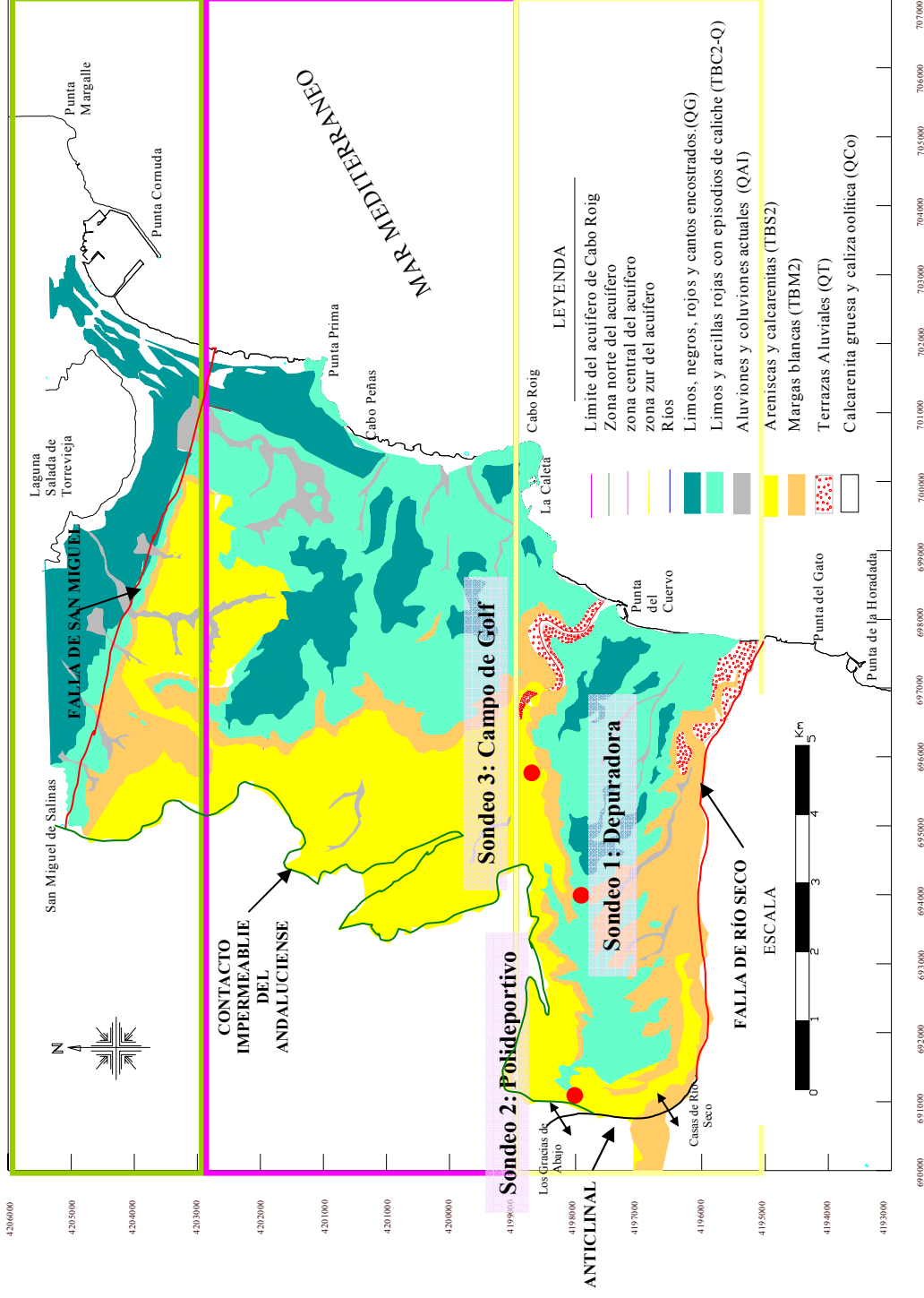
T^Bs₂ – Plioceno inferior: Las areniscas basales están constituidas por litarenitas, sublitarenitas y calcarenitas intraclásticas arenosas con delgados niveles margosos, que tienen un espesor variable de 15 a 100 m en el área de San Miguel de Salinas.

T^Bm₂ – Plioceno Superior: Las margas blancas superiores tienen muy poco espesor (máximo 20m) y están constituidas por margas blancas bajo las arcillas rojas del Plio-Cuaternario.

T^B_{c2-Q} – Plio-Cuaternario: Se apoya tanto sobre cualquier término del Plioceno como del Andaluciense, está constituido por dos tramos: el inferior por arcillitas y limolitas rojas y el superior por una costra o caliche, que en conjunto llegan alcanzar más de 20 m de espesor.

Cuaternario antiguo y Cuaternario moderno: estos depósitos son muy variados y extensos y están divididos en dos grupos con respecto a sus cronologías relativas. El Cuaternario antiguo presenta calcarenitas, calizas oolíticas, terrazas y el glacis superior. El Cuaternario moderno comprende depósitos como playas, dunas y los de los cauces de la red hidrográfica actual.

Como se puede intuir, la geología del acuífero de Cabo Roig es compleja y en algunas zonas muy heterogénea y poco conocida, especialmente en la zona sur, entre las fallas casi paralelas al río Nacimiento y al río Seco, por lo cual actualmente se está revisando la geología en esta zona, para acabar de definir y quizá corregir la geometría empleada en el modelo; para ello durante este proyecto se han perforado 3 nuevos sondeos de investigación hidrogeológica (ver ubicación en mapa 1). La incertidumbre sobre la geometría de la zona sur, surgió cuando en el desarrollo del modelo encontramos que los niveles piezométricos medidos estaban por debajo del muro del acuífero del Plioceno; a partir de la revisión de estos tres sondeos se pudo concluir que el acuífero del Plioceno está desaturado en la zona sur-oeste, y que el agua que se está explotando en esta zona probablemente provenga del acuífero inferior del Andaluciense; lo que explicaría la profundidad de los sondeos de esta zona (profundidades mayores al muro del acuífero). Otro aporte conocido es el de los retornos de riego a través de los niveles superiores.



Mapa 1. Límites geográficos del acuífero de Cabo Roig y ubicación de los sondeos de investigación realizados durante el proyecto. (Fuente cartográfica: IGME, 1990b).

4.2. Unidades hidrogeológicas

Para modelizar matemáticamente este caso, las unidades litoestratigráficas descritas en el apartado anterior se han agrupado hidrogeológicamente en tres unidades: unidad confinante, acuífero y unidad de base, en función de su geología, características hidráulicas y de su ubicación en el sistema.

Así, los depósitos Cuaternarios, Plio Cuaternarios y Plioceno Superior fueron agrupados en una sola unidad hidrogeológica; esta unidad confinante se agrupó en función de simplificar la caracterización hidrogeológica de esas tres unidades litoestratigráficas. La segunda unidad, la más importante del estudio, corresponde al acuífero formado por las areniscas y calcarenitas del Plioceno. La tercera unidad, la de base, se considera como impermeable y está mayoritariamente formada por margas del Andaluciense (IGME, 2003).

La litología y las características hidrogeológicas de las tres unidades identificables en el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Cabo Roig se presentan resumidas en la tabla 1:

Unidades litoestratigráficas	Unidad hidrogeológica	Capa
Limos, gravas, costra calcárea y margas del Cuaternario, Pliocuaternario y Plioceno Superior.	Acuitardo: Unidad con distintos valores de permeabilidad. Semiconfinante/confinante/libre. Acuífero	1
Areniscas y calcarenitas del Plioceno inferior	Acuífero: Unidad permeable. Libre y confinada.	2
Margas del Andaluciense.	Acuicludo: Unidad cuasi-impermeable.	3

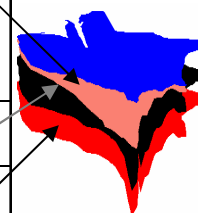


Tabla1. Unidades litoestratigráficas e hidrogeológicas del acuífero de Cabo Roig.

Es importante destacar que en el modelo de flujo con densidad constante se emplearon estas tres unidades hidrogeológicas (figura 1) presentadas en la tabla 1, pero para el modelo de flujo con densidad variable se utilizó un modelo con sólo dos unidades hidrogeológicas, eliminando por sencillez y problemas numéricos la unidad inferior.

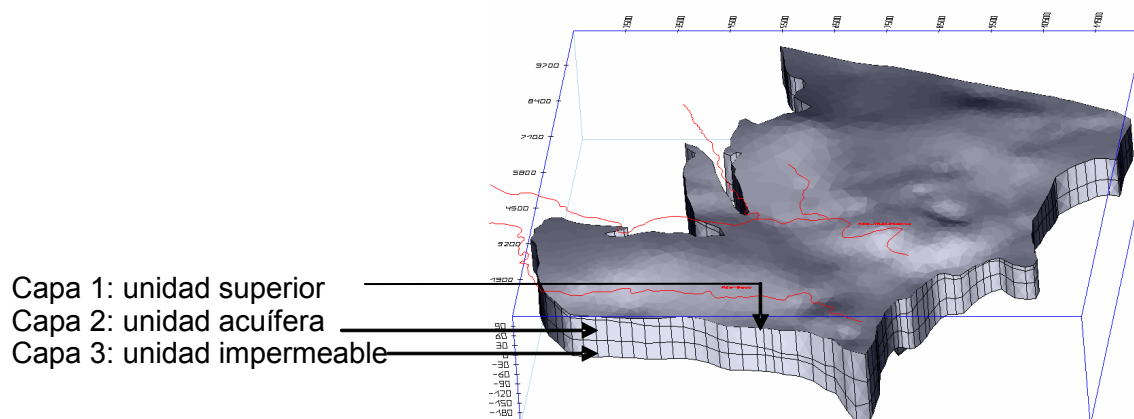


Figura 1. Unidades hidrogeológicas principales del modelo del acuífero de Cabo Roig.

4.3. Características hidrogeológicas

Se describe a continuación la distribución espacial de las características hidrogeológicas del acuífero de Cabo Roig. Desde el límite del acuífero de Torre Vieja con el de Cabo Roig hasta la mitad septentrional de Cabo Roig se tiene una porosidad inferior a 0.12 y un espesor saturado entre 30-40 m. En esta área, en estudios previos se ha obtenido un caudal de explotación entre 5 y 15 l/s, con depresiones dinámicas entre 10-20m y una transmisividad de 20-50 m²/d.

Desde río Nacimiento hasta río seco, este acuífero está probablemente desaturado, al haber sido sobre-explotado en épocas pasadas; este sector tiene peores características hidrogeológicas que el sector norte, descrito en el párrafo anterior. En estudios previos se han obtenido caudales inferiores a 10 l/s con depresiones dinámicas entre 15 y 25 m, por lo que cabe esperar transmisividades entre 15-30 m²/d.

Sin embargo, en el trabajo realizado por la Universidad Politécnica de Cartagena (2004) para el Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo Segura (SCRATS), se hicieron seis sondeos de investigación en el borde costero de río Nacimiento y río Seco; de los ensayos de bombeo realizados en 3 de estos sondeos se obtuvo que la transmisividad está comprendida entre 250 y 750 m²/d. Estos altos valores de transmisividad se explican, posiblemente, por la presencia de cavernas kársticas situadas en el techo del acuífero de las areniscas carbonatadas (calcarenitas). El valor de porosidad eficaz se encuentra comprendido entre 1 y 4 %.

4.4. Componentes del balance hidrológico.

En este apartado se presentan las componentes más importantes del balance hidrológico, lo cual ayudará a comprender y representar matemáticamente la realidad física de dichas componentes, que intervienen en el flujo y transporte subterráneo del acuífero de Cabo Roig.

Entre las principales entradas de agua al sistema hidrogeológico tenemos:

- Entrada de agua del mar Mediterráneo
- Recarga natural por precipitaciones
- Retornos de las dotaciones de riego

Dentro de las principales componentes de salida de agua se considera:

- Descarga submarina al mar Mediterráneo
- Extracciones por bombeos

La descarga submarina de agua subterránea y la intrusión marina son dos componentes pobremente descritas y cuantificadas en el balance hídrico, pero de gran importancia en los balances de agua para zonas costeras (Kohout, 1960; Lee and Cheng, 1974; Langevin, 2001). La entrada de agua de mar en el acuífero de Cabo Roig se produce 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, formando una zona de mezcla o transición dinámica (figura 2), 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 definir la contribución de agua dulce y salada en la descarga submarina, para conocer si existen pérdidas importantes de agua dulce (Smith, 2004; Wilson, 2005; Prieto, 2005). Es también importante resaltar que aunque usualmente todos los acuíferos costeros descargan al mar, al igual que los ríos, esta descarga submarina de agua subterránea es poco evidente, por producirse en muchos casos a través del fondo marino (Smith y Turner, 2001).

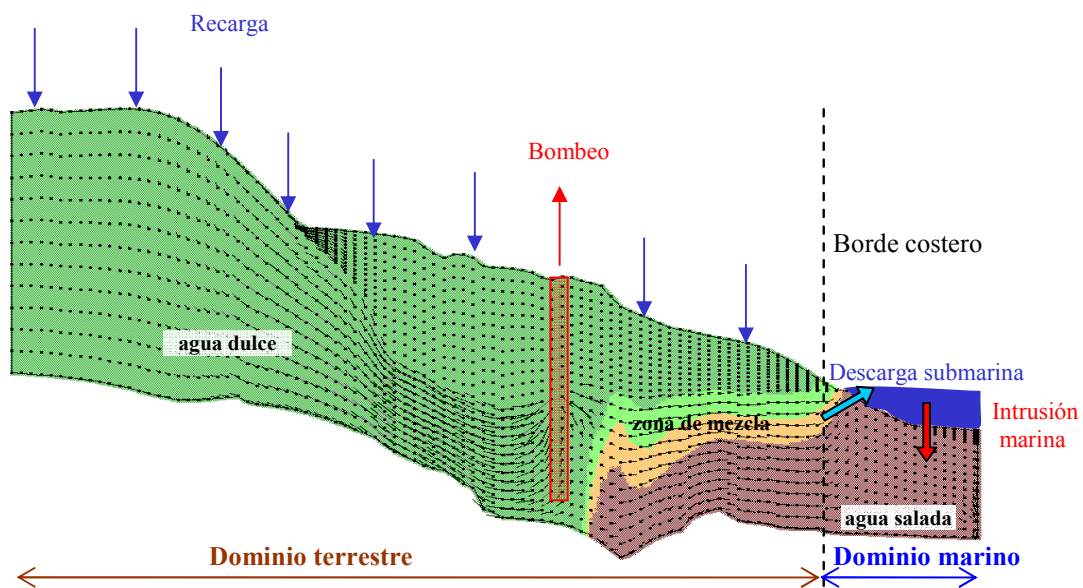


Figura 2. Componentes del balance hídrico y líneas de flujo en una sección vertical del acuífero de Cabo Roig.

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SISTEMA ACUÍFERO DE CABO ROIG

En los problemas de intrusión marina en acuíferos costeros, se puede representar a la zona de mezcla de agua dulce/agua salada mediante modelos de densidad constante (interfase neta) o densidad variable. En nuestro caso se ha empleado un modelo con densidad variable, el cual considera el movimiento del agua dulce/agua salada como un único fluido con densidad variable (fluidos miscibles). Los modelos con densidad variable son necesarios cuando el espesor de la zona de mezcla es amplia y muy variable en el acuífero.

Para problemas con densidad variable, como lo es el problema de la intrusión marina, el movimiento del agua subterránea depende del gradiente hidráulico y del gradiente de concentraciones, este gradiente de concentraciones de la salinidad es muy alto, por lo cual la densidad del fluido se convertirá en una variable que intervendrá en la ecuación de flujo. Mientras que para problemas

donde el gradiente de concentraciones es bajo, la densidad del fluido no interviene como variable en la ecuación de flujo. (Paniconi, et al., 2001; Gingerich and Voss, 2002; Zhang et al., 2004; Qahman K., Larabi, A., 2006).

5.1. Descripción del código de simulación utilizado

Para estudiar el comportamiento del sistema acuífero de Cabo Roig se ha desarrollado un modelo 3D de flujo con densidad variable. El código seleccionado para el desarrollo del modelo es FEFLOW v. 5.0, 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. Las condiciones de contorno que permite representar el programa son muy variadas.

El programa FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system = Sistema de Simulación de Flujo Subterráneo basado en el Método de Elementos Finitos) es un sistema interactivo para la modelización del flujo del agua subterránea en problemas:

- Bidimensionales y tridimensionales.
- En áreas y secciones (horizontales, verticales o de simetría radial) bidimensionales.
- Problemas de flujo con densidad constante y densidad variable del fluido.
- Problemas saturados, no saturados y de saturación variable.
- Para problemas en régimen estacionario y transitorio.
- Además permite realizar modelos de transporte de masa y/o calor.

Se resumen a continuación algunas de las aplicaciones más recientes de FEFLOW:

- Describir la distribución espacial y temporal de contaminantes de aguas subterráneas. (Faye, *et al.*, 2001)
- Modelar procesos geotérmicos. (Kessels, *et al.*, 2004)
- Estimar la permanencia y el tiempo de transporte de los contaminantes en acuíferos. (Dimakis *et al.*, 2005)
- Planear y diseñar estrategias de prevención y remediación. (Annandale, *et al.*, 2006)
- Apoyo en el diseño de alternativas de gestión y esquemas efectivos de monitoreo. (Sarwar, 2004)

5.2. Desarrollo del modelo matemático del flujo subterráneo

Después de la determinación del modelo hidrogeológico conceptual hemos pasado al desarrollo del modelo matemático, intentando reproducir las condiciones reales del sistema hidrogeológico. El desarrollo de este modelo matemático se ha realizado en cuatro etapas, citadas a continuación:

- Etapa 1: Modelo de flujo hidrogeológico en estado estacionario (densidad constante)
- Etapa 2: Modelo de flujo en estado transitorio (densidad constante). Periodo 2001-2010.
- Etapa 3: Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio terrestre del acuífero.
- Etapa 4: Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para un dominio ampliado del acuífero (dominio terrestre y dominio marino del acuífero).

El objetivo final fue conseguir un modelo de flujo subterráneo con densidad variable en estado estacionario, que simule el comportamiento real de la piezometría y la salinidad para las condiciones medias del 2001. Se justifica el desarrollo de las 3 etapas previas debido al bajo conocimiento de la distribución de algunos parámetros, como por ejemplo: recarga natural, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento específico y dispersividades, por lo cual se hubo de realizar un ajuste paulatino de los parámetros del modelo de flujo y posteriormente de los de transporte. A continuación se explicará el desarrollo de estas cuatro etapas; además se presentará y explicará los principales resultados de la calibración y de los distintos escenarios de simulación. Centraremos especial atención en los resultados de las etapas 2 y 4, debido a que estos modelos son los más completos, sin obviar el aporte importante de las etapas 1 y 3.

5.2.1. Dominio y marco hidrogeológico

El acuífero se presenta localmente en estado libre a confinado. El dominio terrestre del acuífero de Cabo Roig tiene un área de 61 km², limita al norte con la falla de San Miguel de Salinas, al sur con la falla de río Seco, el límite occidental coincide con el contacto impermeable de las margas grises del Andaluciense y al este con la línea de costa (mar Mediterráneo).

Como se comentó en el punto 4.2, para el desarrollo del modelo, fue necesario dividir el dominio en tres unidades hidrogeológicas superpuestas. La primera, la superior, es la unidad confinante, donde se agruparon depósitos Cuaternarios, Pliocuatnarios y margas del Plioceno Superior. En la figura 3 puede observarse la variación de espesores que tiene la primera unidad hidrogeológica, desde espesores prácticamente nulos hasta casi 88 m.

La segunda unidad hidrogeológica, que corresponde a la unidad acuífera estudiada, se encuentra en estado libre a confinado y su grado de confinamiento aumenta en dirección norte-sur. Esta unidad está formada por las areniscas y calcarenitas del Plioceno; como puede verse en la figura 4, los espesores varían entre 7 y 118 m y el espesor promedio es de 50 m, aproximadamente. Los mayores espesores del acuífero se encuentran en la zona oriental, como lo evidencian los registros de las columnas estratigráficas realizados por el IGME y los sondeos realizados en el borde costero en río Nacimiento y río Seco por parte del Sindicato General de Regantes del Acueducto Tajo-Segura.

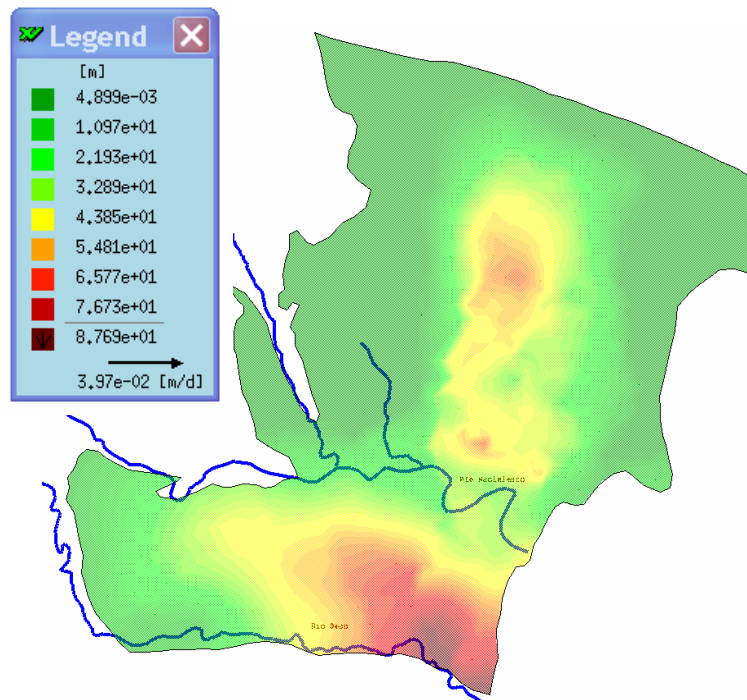


Figura 3. Espesor de la unidad hidrogeológica confinante del acuífero (m).

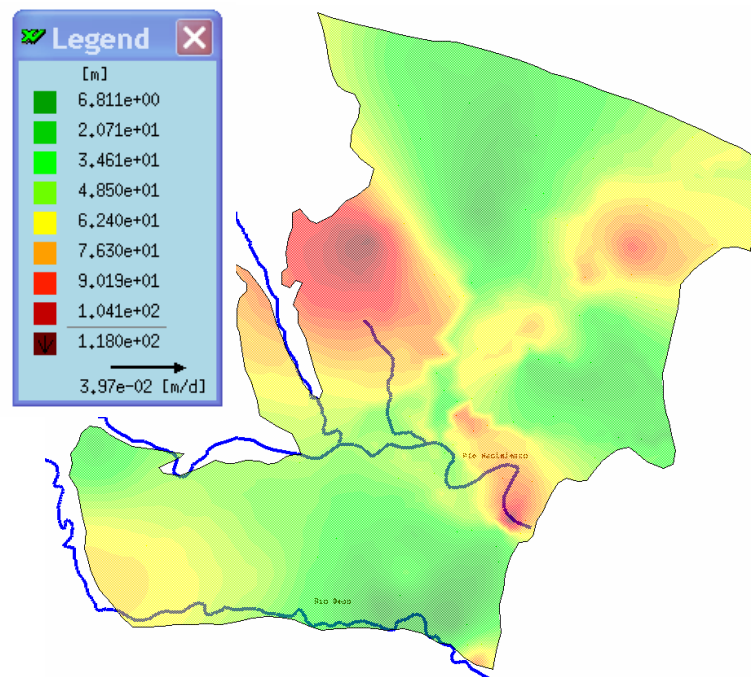


Figura 4. Espesor de la unidad hidrogeológica acuífera (m).

Por último, el dominio tiene como base una formación quasi-impermeable compuesta por las margas grises del Andaluciense (IGME, 1990 a). En la figura 5 se puede ver la geometría y la disposición de las tres unidades hidrogeológicas mencionadas en cuatro secciones transversales características.

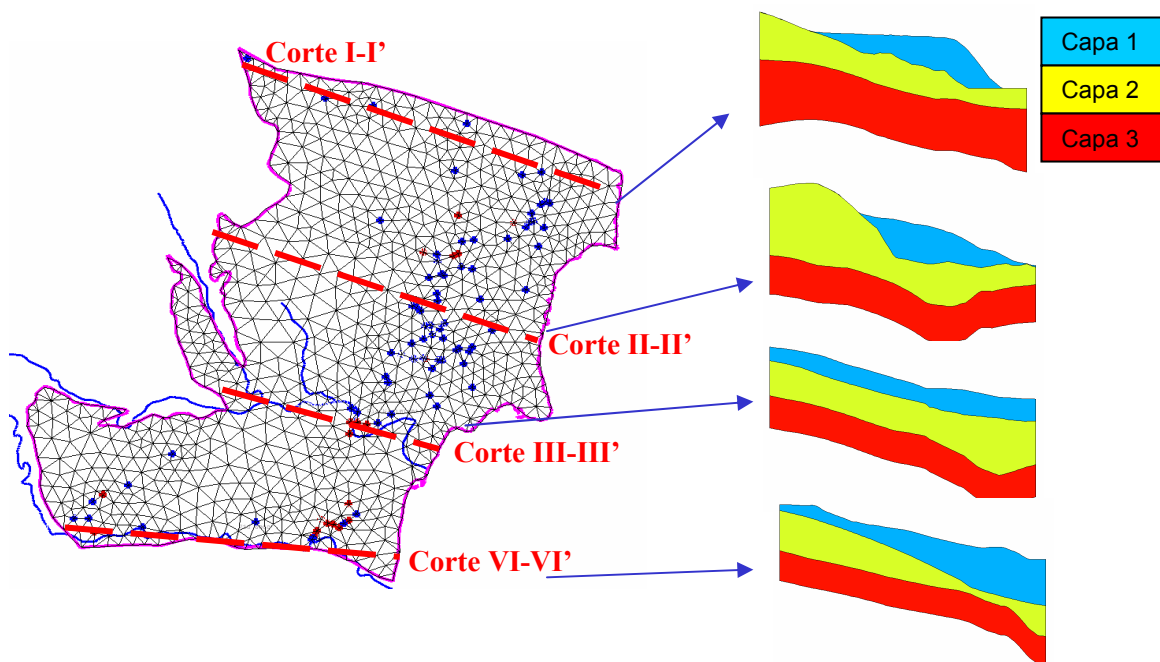


Figura 5. Geometría del modelo hidrogeológico conceptual.

5.2.2. Discretización espacial y temporal

El dominio terrestre del acuífero de Cabo Roig, fue inicialmente discretizada tridimensionalmente para el modelo de flujo en estado estacionario y transitorio utilizando 6244 nudos y 8685 elementos (2895 elementos/capa* 3 capas). La discretización vertical empleó 3 capas, la primera corresponde a la unidad confinante, la segunda al acuífero y la tercera a la capa quasi-impermeable inferior (Figura 6.a). Para el problema de flujo en estado transitorio, se ha realizado una simulación para 10 años, desde el año 2001 al 2010, con paso de tiempo mensual.

Por razones numéricas, para el problema de flujo con densidad variable en estacionario se utilizó una discretización más fina. Para este modelo se empleó una discretización de 53200 nudos y 96768 elementos (4032 elementos/capa*24 capas). Ver Figura 6.b).

Después de esta segunda discretización se observó la necesidad de ampliar espacialmente el modelo de flujo con densidad variable, intentando con ello mejorar la descripción de la relación mar/acuífero. Para lo cual, el dominio marino se representó a partir de la información geológica y de la batimetría obtenida del mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes. Escala 1:200.000 (1990 b). Para el problema de flujo con densidad variable en estado estacionario del modelo ampliado (dominio terrestre + dominio marino del acuífero) se utilizó una discretización de 77475 nudos y 143040 elementos (5960 elementos/capa*24 capas). Ver Figura 6.c).

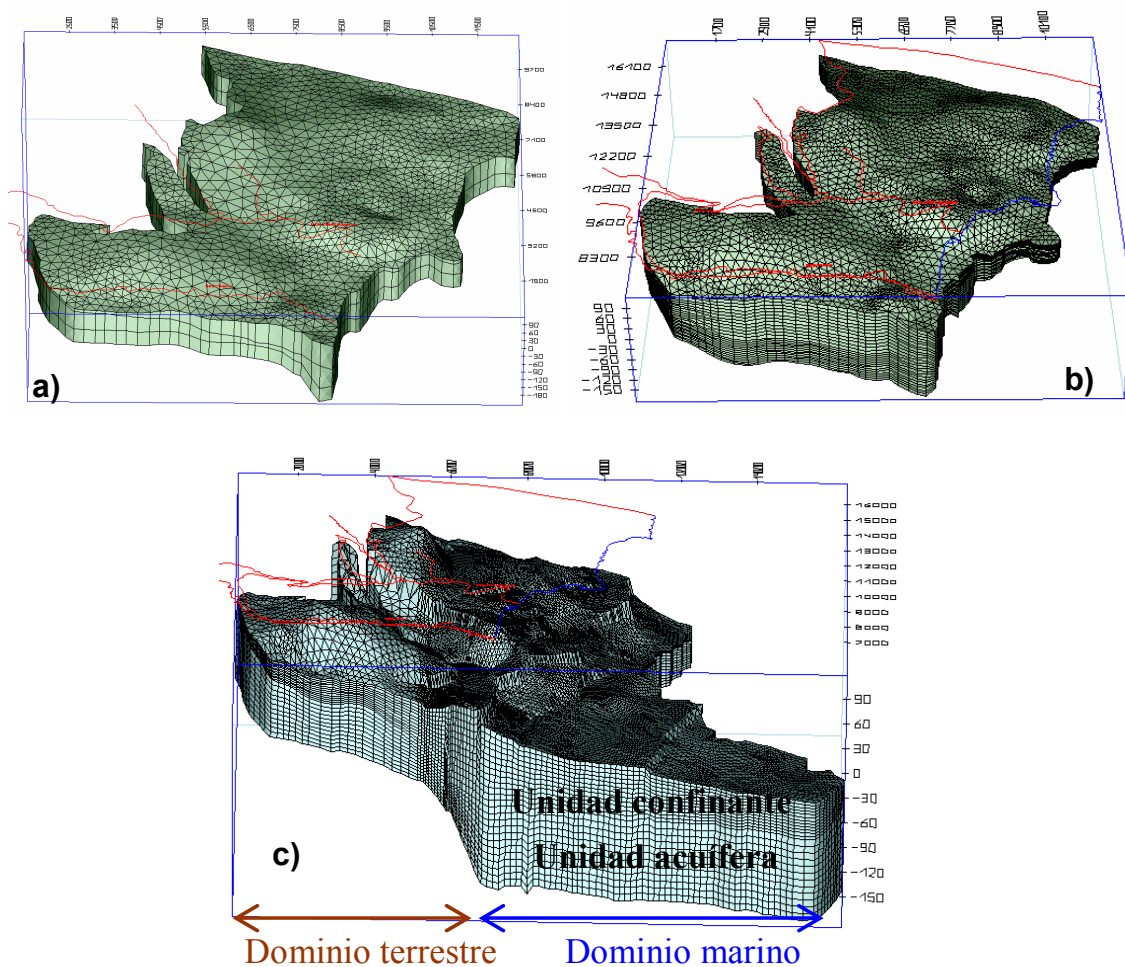


Figura 6. Discretización del a) modelo de flujo con densidad constante en estado estacionario y transitorio, b) modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario (dominio terrestre del acuífero) y c) modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario (dominio terrestre y dominio marino del acuífero).

Para los dos últimos modelos, la discretización vertical se realizó mediante 24 capas; las primeras doce corresponden a la unidad hidrogeológica confinante y las siguientes corresponden al acuífero del Plioceno; la tercera unidad hidrogeológica no se incluyó en estas simulaciones, por el gran contraste de permeabilidades existentes entre la unidad 2 y la unidad 3.

5.2.3. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales empleadas en los modelos en estado estacionario son los promedios de los valores de piezometría y salinidad medidos en el año 2001. La calibración del modelo de flujo en estado transitorio con densidad constante tuvo como condición inicial el resultado de la simulación de flujo en régimen estacionario que se acaba de citar.

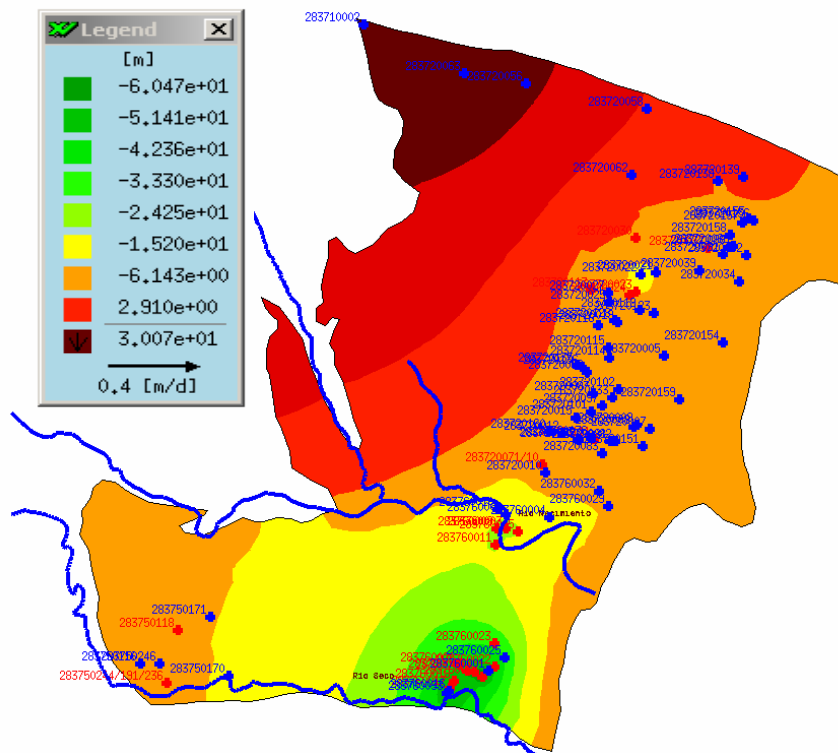


Figura 7. Valores promedios de la piezometría medida en el 2001, empleados como condición inicial.

En la figura 7 se presenta la distribución espacial de la piezometría media en el año 2001. Se puede ver que el área de mayor descenso de la piezometría se encuentra en la zona sur-este, debido al aumento de núcleos de explotación en los últimos años en esta zona. En la parte central del acuífero se observan dos áreas de descenso piezométrico menos importantes, las cuales antiguamente eran núcleos importantes de explotación, pero en los últimos años se ha producido un abandono progresivo de esos pozos.

En la figura 8 se representa la distribución de los valores promedios de la salinidad para el 2001. En la zona norte del acuífero se observan valores bajos de salinidad, debido a su cercanía con la principal zona de recarga del acuífero, la cual crea una barrera hidráulica que dificulta el avance de la intrusión marina, a pesar de que en esta zona el contacto de la unidad acuífera con el mar se produce justo en la línea de costa. En la zona central se presentan valores de salinidad altos, debido, por una parte, a que aquí también el contacto entre el acuífero y el agua de mar se produce en la línea de costa y, por otra, a la existencia previa de importantes núcleos de bombeo en la zona.

Hay que señalar que en la zona sur del acuífero se midieron valores de salinidad relativamente bajos (ver figura 8), debido a que el contacto del acuífero con el agua de mar se ha localizado a más de 5 km. mar adentro (Rodríguez Estrella, 2003). Este contacto se produce a dicha distancia debido a que el estrato acuífero en esta zona está a gran profundidad (profundidad aproximada de 80 m) y a la

suave pendiente del fondo marino, como puede observarse en el corte presentado en la figura 9b. Todo lo cual justificó la necesidad de ampliar la extensión espacial del modelo, intentándose reproducir la geometría del fondo marino para simular las condiciones reales de la intrusión marina en la zona sur del acuífero.

Los pozos ubicados en la zona sur-oeste extraen el agua del acuífero inferior del Messiniense (Andaluciense), mientras que en esta zona el acuífero superior del Plioceno se encuentra desaturado. Uno de los pozos (283750191) de esta zona presenta mayor salinidad (4020 mg/l) debido a que es un pozo muy profundo de 300m, lo cual pone en contacto el agua extraída del Messiniense con las margas con yeso del Tortoniense Superior (impermeable de base del acuífero inferior).

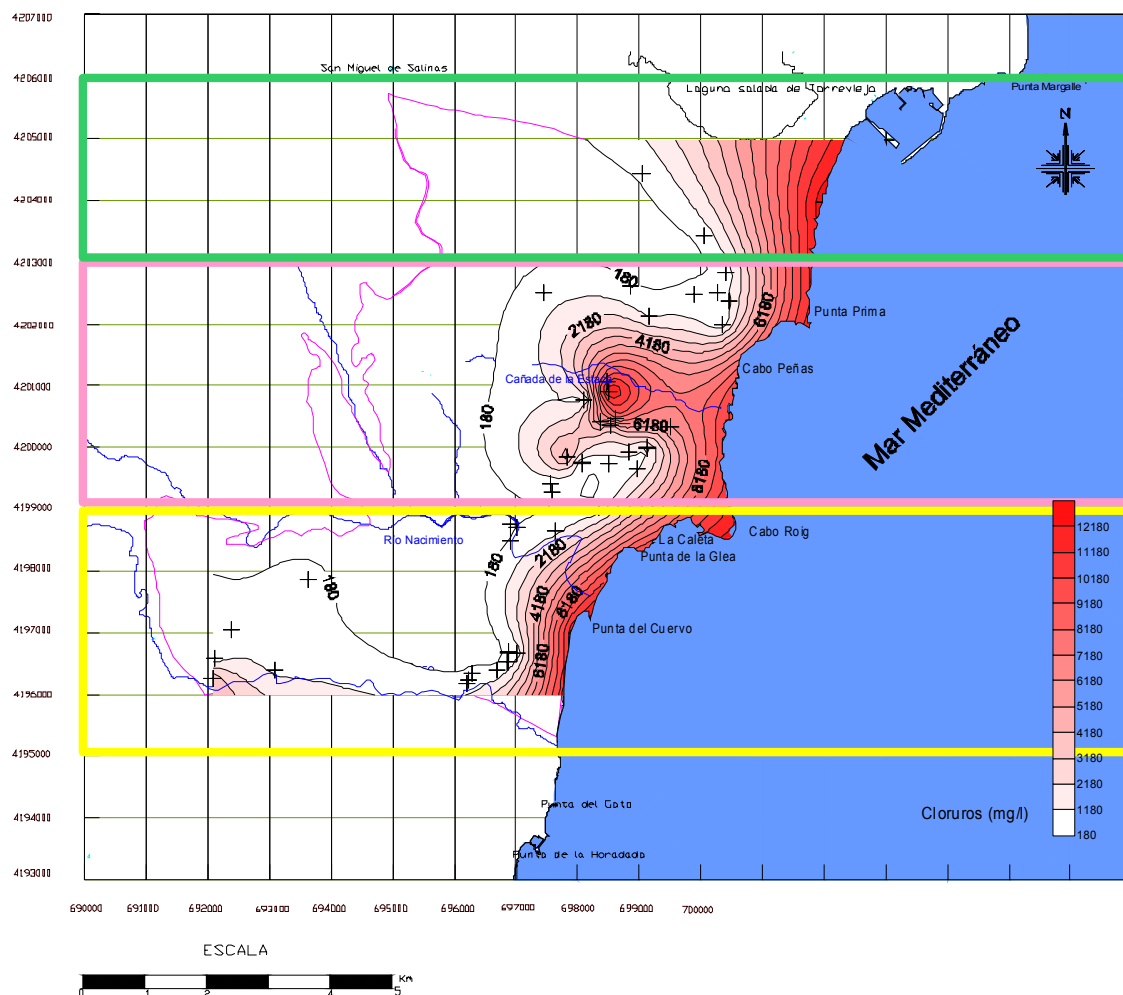
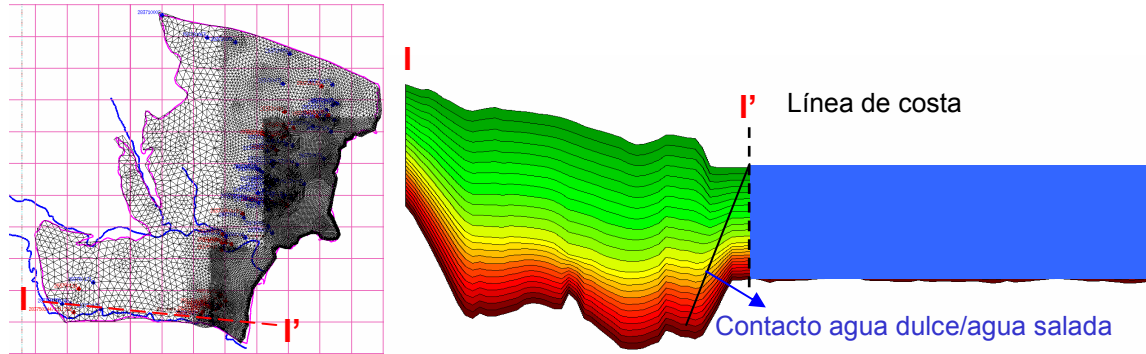


Figura 8. Valores promedio de la salinidad medida en el 2001 (empleados como condición inicial del problema de transporte de masa).

En la figura 9 también se puede analizar la influencia de las dos formas de simular la interacción entre el acuífero y el mar en la zona sur; en la simulación con el dominio terrestre del acuífero (figura 9a), en el cual la zona de contacto acuífero/agua salada se impone justo en el borde costero, se puede provocar una sobreestimación artificial de los valores simulados de salinidad para dicho borde, al imponer la condición de agua de mar a lo largo del mismo; en cambio,

con la ampliación del dominio del modelo (figura 9b) la zona de contacto del acuífero con el agua salada se impone 5 Km. mar adentro.

a) Dominio terrestre del acuífero



b) Dominio ampliado: dominio terrestre del acuífero y dominio marino

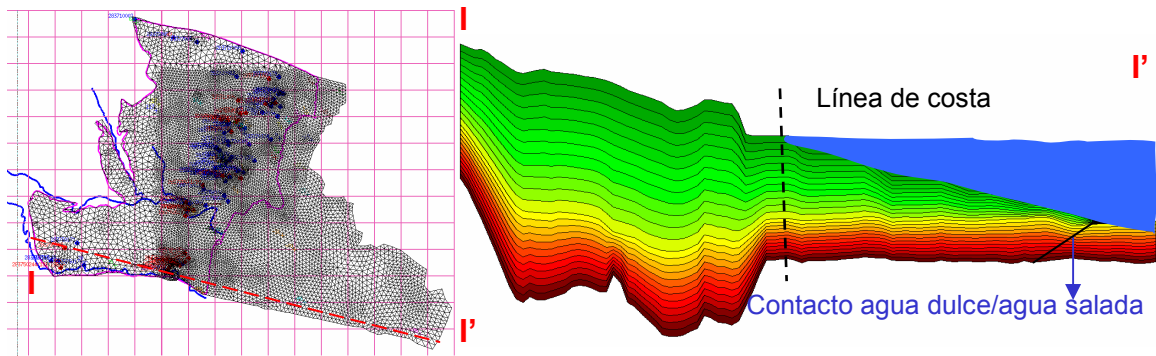


Figura 9. Dominios de simulación empleados: a) Dominio terrestre del acuífero b) Dominio ampliado: Dominio terrestre del acuífero y dominio marino.

5.2.4. Condiciones de contorno del modelo

Las condiciones de contorno corresponden a los límites físicos reales del acuífero. En la zona norte, la falla de San Miguel, en la zona sur, la falla del río Seco y en el borde occidental las margas del Andaluciense, se han definido como condiciones de contorno de flujo y transporte nulo (bordes impermeables), estas condiciones fueron impuestas en todos los modelos desarrollados (figura 10).

La condición de contorno en el borde costero empleada en los modelos de flujo con densidad constante, en estado estacionario y transitorio, fue de carga hidráulica constante ($h=0$). Mientras que, para los modelos de flujo con densidad variable se ha definido en el límite con el mar, una condición de contorno de concentración constante de 36000 mg/l (TSD) y de carga hidráulica h variable con la profundidad, definida por la siguiente expresión:
$$h = \frac{\rho_s}{\rho_o} h_s - \left(\frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o} \right) z,$$
 asumiéndose que el nivel del mar no varía $h_s = 0$ y que h tiene una distribución

vertical lineal. Donde, h es el nivel piezométrico, ρ_s es la densidad del agua de mar, ρ_o es la densidad del agua subterránea y z es la profundidad bajo el nivel del mar. (Ver figura 11).

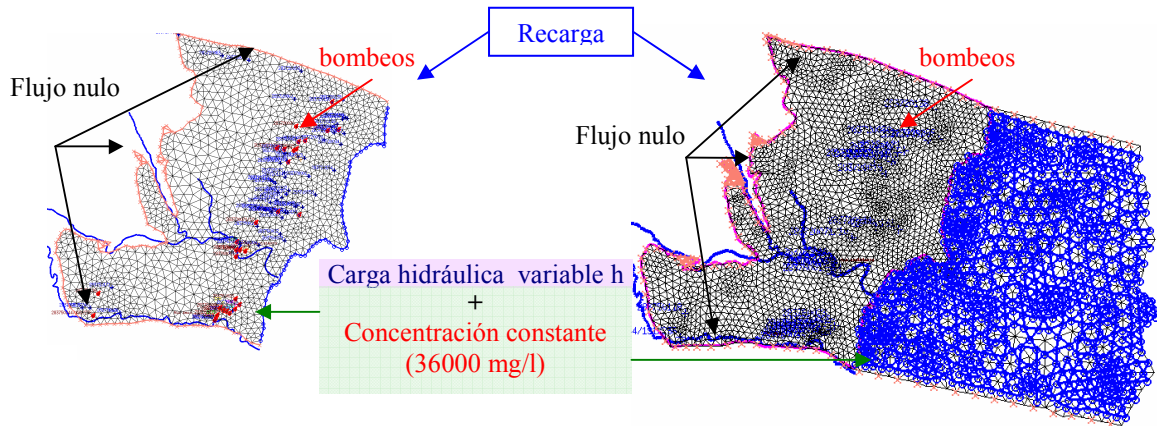


Figura 10. Dominio y condiciones de contorno empleadas en superficie en el modelo inicial (a la izquierda) y en el modelo ampliado (a la derecha).

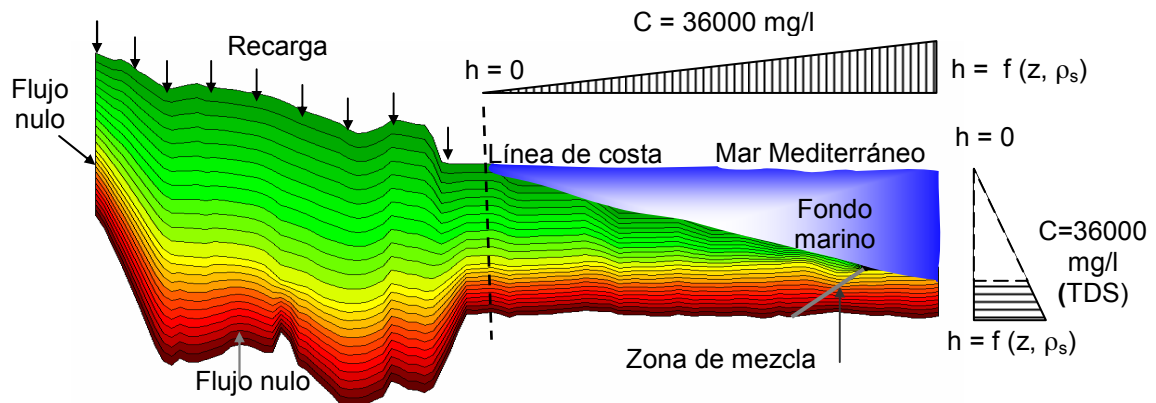


Figura 11. Condiciones de contorno empleadas en una sección del modelo ampliado de flujo y transporte del acuífero de Cabo Roig.

La condición de contorno de la superficie superior del dominio del modelo en la parte no sumergida, corresponde a la recarga por lluvia y retornos de riegos, calculada previamente mediante el programa Visual Balan V.1.0 (Samper et al., 1999). Se realizó una zonación del acuífero con respecto a los valores estimados de recarga natural, en función del tipo, uso de suelo y de la geología (IGME, 2004). La principal área de recarga esta formada por los afloramientos de las areniscas y calcarenitas del Plioceno, ocupando un área de 18 km^2 y con una recarga estimada inicialmente en $1,7 \text{ hm}^3/\text{a}$, de los cuales $0,6 \text{ hm}^3/\text{a}$ corresponden a las entradas de agua por retornos de riego; esta estimación inicial de los valores de recarga ha sido reajustada durante la calibración de cada uno de los modelos realizados.

La superficie inferior del modelo se define como una condición de flujo nulo, debido a la formación impermeable de las margas del Andaluciense. Por último, se imponen puntualmente los caudales de bombeo extraídos de la unidad acuifera para cada periodo de explotación; el volumen promedio de extracciones de agua subterránea está entre 3 y 3.8 hm³/a, según los inventarios realizados por el IGME en el 2002 y por la CHS en el 2003.

Las condiciones de contorno superior, inferior y los caudales de bombeo fueron similares en todos los modelos en régimen estacionario; para el modelo de flujo en régimen transitorio se estimó previamente la recarga mensual y se inventariaron las extracciones mensuales de agua subterránea.

5.2.5. Parámetros hidrogeológicos del modelo

Los parámetros del modelo fueron obtenidos de mediciones de campo, estudios previos y referencias bibliográficas. A partir de toda esta información se definió un rango de valores para cada parámetro, algunos de los cuales durante el proceso de calibración han permanecido inalterados, varios han sido modificados localmente y otros estimados.

En el desarrollo de las diferentes etapas por las cuales ha pasado el desarrollo del modelo de Cabo Roig, se ha identificado la necesidad de realizar una zonación de algunos parámetros para mejorar los resultados locales de la simulación, estos parámetros fueron la conductividad hidráulica, la recarga natural y el coeficiente de almacenamiento específico.

Otros parámetros, como la porosidad, difusión molecular, dispersividad longitudinal y transversal, han sido empleados como valores globales, sin afectar los resultados de situaciones regionales y locales. Otro factor importante que se consideró fue la anisotropía de la conductividad hidráulica, esta anisotropía 3D fue estimada por calibración $K_x = K_y > K_z$ ($K_z = K_x/50$). A continuación se describen los parámetros empleados en las diferentes etapas del modelo de Cabo Roig y sus respectivos ajustes.

5.2.5.1. Conductividad hidráulica

En este apartado se indican los valores de conductividad hidráulica empleados para las distintas zonas y capas del acuífero, dichos valores fueron los mismos para todos los modelos realizados. Para la primera capa del modelo (unidad confinante) se estimaron 4 zonas con diferentes valores de conductividad hidráulica (ver figura 12). Estas zonas fueron las correspondientes a:

- Zona A: afloramiento del acuífero (areniscas y calcarenitas del Plioceno).
- Zona B: unidad confinante de baja permeabilidad.
- Zona C: río Nacimiento.
- Zona D: río Seco.

La zona A es la principal zona de recarga del acuífero, debido a la presencia de casi 18 km² de afloramiento de areniscas del Plioceno inferior, esta zona presenta valores de permeabilidad media. La zona B se considera como la zona con valores más bajos de permeabilidad debido a que la unidad confinante está formada por limos y arcillas de los depósitos Cuaternarios y Pliocuaternarios y por margas del Plioceno superior.

En la zona C se estimó un valor alto de permeabilidad como resultado de la calibración, esto se justifica por la presencia de depósitos Cuaternarios de alta permeabilidad, como las terrazas aluviales y depósitos Cuaternarios más recientes, por encima de una capa poco potente de depósitos del Plioceno superior; además esta permeabilidad podría verse incrementada por la posible presencia de una falla normal que discurre casi paralela al río Nacimiento. En la zona D se estimó un valor bajo de permeabilidad, a pesar de la presencia de depósitos cuaternarios permeables a lo largo del río Seco, pero la baja potencia de estos depósitos unido a que por debajo de esta zona se encuentra un importante espesor de arcillas, limos y margas de la zona, justifica el empleo de dichos valores bajos.

En la figura 12 y en las tablas 2 y 3 se observa la distribución de los valores de conductividad hidráulica en la primera capa del modelo. Para la zona A se estimó arbitrariamente una anisotropía vertical de $K_z = K_x/50$, debido a que no se disponía de datos de conductividad hidráulica vertical. En el desarrollo del modelo se observó que la anisotropía afecta significativamente a los resultados de la simulación, por lo cual fue necesario considerar esta anisotropía para la calibración del modelo. Las otras zonas se las ha considerado como medios isótropos.

Unidad hidrogeológica	Capa	Permeabilidad (m/s)				
		Kx	Ky	Kz	Isotropía / anisotropía	
Capa semiconfinante / confinante	1	A	0.1 e-04	0.1 e-04	0.2e-06	$K_x = K_y > K_z (K_z = K_x/50)$
		B	0.12 e-06	0.12 e-06	0.12 e-06	$K_x = K_y = K_z$
		C	0.14 e-04	0.14 e-04	0.14 e-04	$K_x = K_y = K_z$
		D	0.8 e-5	0.8 e-5	0.8 e-5	$K_x = K_y = K_z$

Tabla 2. Valores de conductividad hidráulica en m/s, para la primera capa del modelo.

Unidad hidrogeológica	Capa	Permeabilidad (m/d)				
		Kx	Ky	Kz	Isotropía / anisotropía	
Capa semiconfinante / confinante	1	A	0,86	0,86	0,02	$K_x = K_y > K_z (K_z = K_x/50)$
		B	0,01	0,01	0,01	$K_x = K_y = K_z$
		C	1,21	1,21	1,21	$K_x = K_y = K_z$
		D	0,69	0,69	0,69	$K_x = K_y = K_z$

Tabla 3. Valores de conductividad hidráulica en m/d, para la primera capa del modelo.

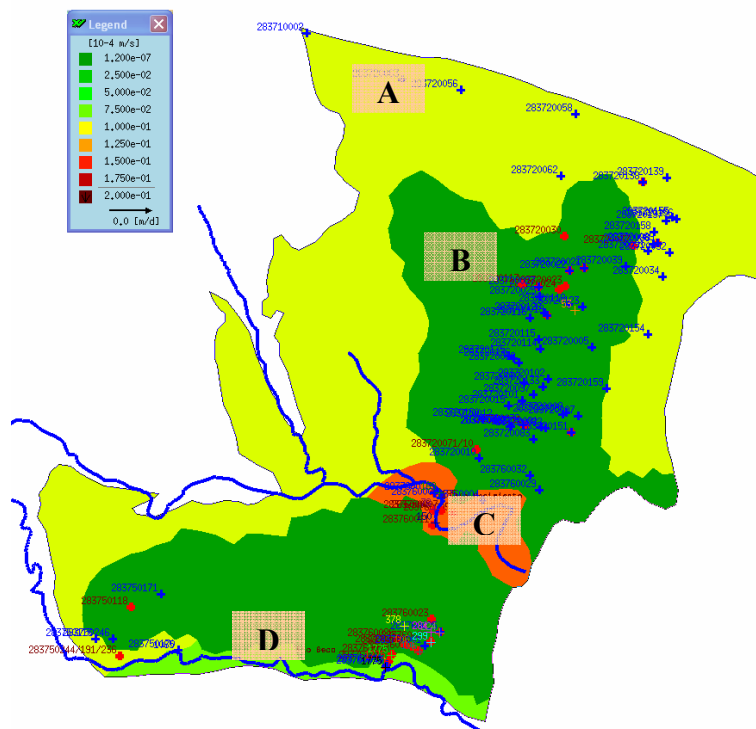


Figura 12. Distribución espacial de los valores de conductividad hidráulica utilizados en la primera capa del modelo de flujo del acuífero de Cabo Roig.

La segunda capa del modelo, que corresponde a la unidad acuífera, se la ha dividido en tres sectores, la distribución de valores de permeabilidad puede verse en la figura 13 y en las tablas 4 y 5:

Zona E: sector norte y central del acuífero

Zona F: zona de baja permeabilidad paralela a río Nacimiento

Zona G: sector sur del acuífero

La zona E presenta un valor de conductividad hidráulica ligeramente inferior al valor de la zona G; estos datos estimados para cada sector están dentro del rango de permeabilidades obtenidos de estudios anteriores, esta estimación fue realizada a partir de un ajuste de los valores iniciales generales obtenidos de informes anteriores. La zona F se representó como una zona de baja permeabilidad casi paralela al río Nacimiento para intentar simular una baja conexión hidráulica entre el sector norte (por encima del río Nacimiento) y el sector sur del acuífero, producida posiblemente por la zona de falla del río Nacimiento. Se planteó esta hipótesis al ver un comportamiento distinto de la piezometría y de la salinidad en la zona sur con respecto a la zona norte. Posteriormente, al simular con esta hipótesis vimos una respuesta aceptable en los resultados de la calibración de los piezómetros de la zona sur.

Esta segunda capa corresponde al acuífero y se la ha considerado como un medio anisótropo, donde la $K_z = K_x/50$ para todas las zonas. Las zonas E y F se

las considera isotrópicas en el plano horizontal a excepción de la sur, donde se considera que $K_x = K_y/1.2$ (el factor 1.2 fue estimado por calibración), debido al flujo preferente en la dirección y según lo observado en el patrón de flujo.

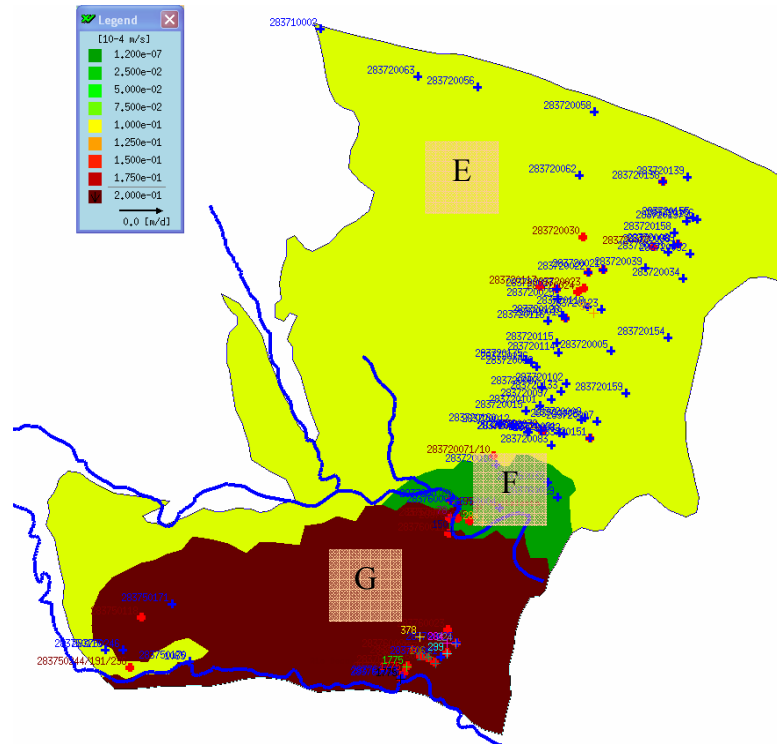


Figura 13. Distribución de los valores de conductividad hidráulica en la capa acuífera del modelo de Cabo Roig.

Unidad hidrogeológica	Capa	Permeabilidad (m/s)				
		Kx	Ky	Kz	Isotropía / anisotropía	
Acuífero	2	E	0.1 e-04	0.1 e-04	0.2e-06	$K_x = K_y > K_z$ ($K_z = K_x/50$)
		F	0.12 e-10	0.12 e-10	0.24 e-12	$K_x = K_y > K_z$ ($K_z = K_x/50$)
		G	0.20 e-04	0.24 e-04	0.48 e-06	$K_x = K_y/1.2$, K_y , $K_z = K_y/50$

Tabla 4. Valores de conductividad hidráulica en m/s, para la capa acuífera del modelo.

Unidad hidrogeológica	Capa	Permeabilidad (m/d)				
		Kx	Ky	Kz	Isotropía / anisotropía	
Acuífero	2	E	0,86	0,86	0,02	$K_x = K_y > K_z$ ($K_z = K_x/50$)
		F	1,04E-06	1,04E-06	2,07E-08	$K_x = K_y > K_z$ ($K_z = K_x/50$)
		G	1,73E+00	2,07E+00	4,15E-02	$K_x = K_y/1.2$, K_y , $K_z = K_y/50$

Tabla 5. Valores de conductividad hidráulica en m/d, para la capa acuífera del modelo.

En la primera etapa de la modelización se empleó una tercera capa que correspondía a la base cuasi-impermeable formada por las margas del

Andaluciense, a la cual se la consideró como un medio cuasi-impermeable e isotrópico ($K_x=K_y=K_z=1.04e-06$ m/d). Pero en la segunda etapa de la modelización estos valores bajos de permeabilidad ocasionaron problemas numéricos en la resolución del problema de flujo en estado transitorio, por lo cual se eliminó esta capa y se consideró directamente una condición de contorno inferior de flujo nulo en la capa acuífera.

5.2.5.2. Coeficiente de almacenamiento específico

Los valores del coeficiente de almacenamiento específico empleados en el modelo en régimen transitorio (densidad constante) fueron distribuidos en zonas, en relación al comportamiento libre, semiconfinado o confinado de la capa confinante y acuífera. La distribución de los valores puede verse en las figuras 14 y 15. La capa 1 presenta en la zona libre del acuífero y en las terrazas de los ríos Nacimiento y Seco los valores más altos de coeficiente de almacenamiento específico. Además, se puede ver que la zona libre del acuífero, en la segunda capa (color naranja), tiene los valores más altos: 2×10^{-3} 1/m, el sector semiconfinado en el río Nacimiento (color marrón) es el segundo valor más alto con 1.2×10^{-3} 1/m, mientras la zona confinada (color verde) del acuífero presenta los valores más bajos del coeficiente de almacenamiento.

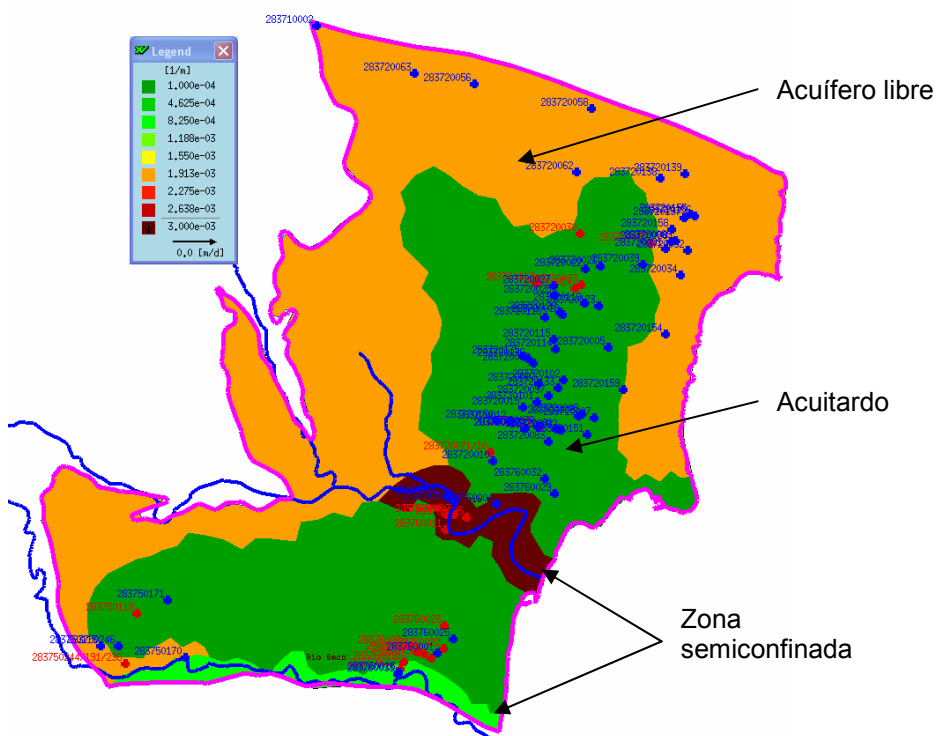


Figura 14. Valores del coeficiente de almacenamiento específico empleados en la capa 1 del modelo conceptual de flujo en estado transitorio.

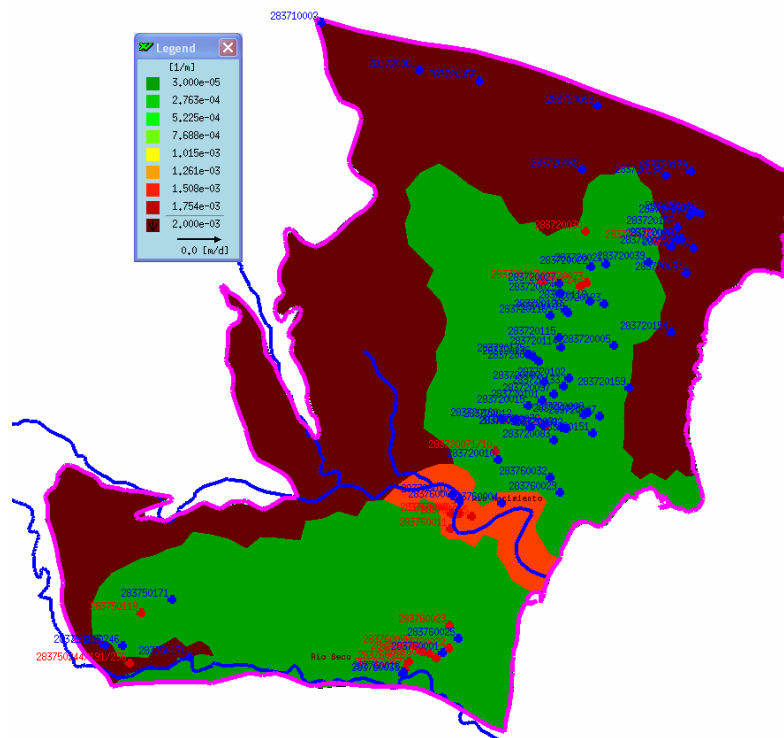


Figura 15. Valores de coeficiente de almacenamiento específico empleados en la capa acuífera del modelo de flujo en estado transitorio.

5.2.5.3. Recarga

La recarga natural del acuífero se evaluó previamente con el programa Visual Balan V.1.0 (Samper, J. *et al*, 1999), mediante el cual se obtuvo una distribución espacial inicial de los valores de recarga en el acuífero, a partir de los datos meteorológicos de 1997-2002. Estos valores fueron los datos de entrada del modelo, a partir de los cuales hubo un reajuste paulatino de este parámetro en cada uno de los modelos desarrollados (figura 16). Para el modelo en estado transitorio se emplearon los valores de bombeo y de recarga media mensual obtenidos de estudios anteriores (IGME, 2002, 2004).

En la aplicación de Visual Balan, las entradas de agua que se consideraron en el balance hidrológico fueron la precipitación y los retornos de riego (IGME; 2004). Se estimó que la recarga media anual por precipitaciones fue de $2 \text{ hm}^3/\text{a}$, lo que equivale al 12% de la precipitación media anual ($279 \text{ mm}/\text{a}$). Los retornos de riego se estimaron en $0.6 \text{ hm}^3/\text{a}$, lo que equivale a un 5% de las dotaciones de riego empleadas en la zona ($11 \text{ hm}^3/\text{a}$); estas dotaciones de riego se obtuvieron a partir del estudio de usos del suelo mediante técnicas de teledetección (IGME, 2000) y del Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura (C.H.S, 1999). Por lo tanto las entradas medias anuales al sistema acuífero de Cabo Roig son de unos $2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$ para las condiciones del año 2001.

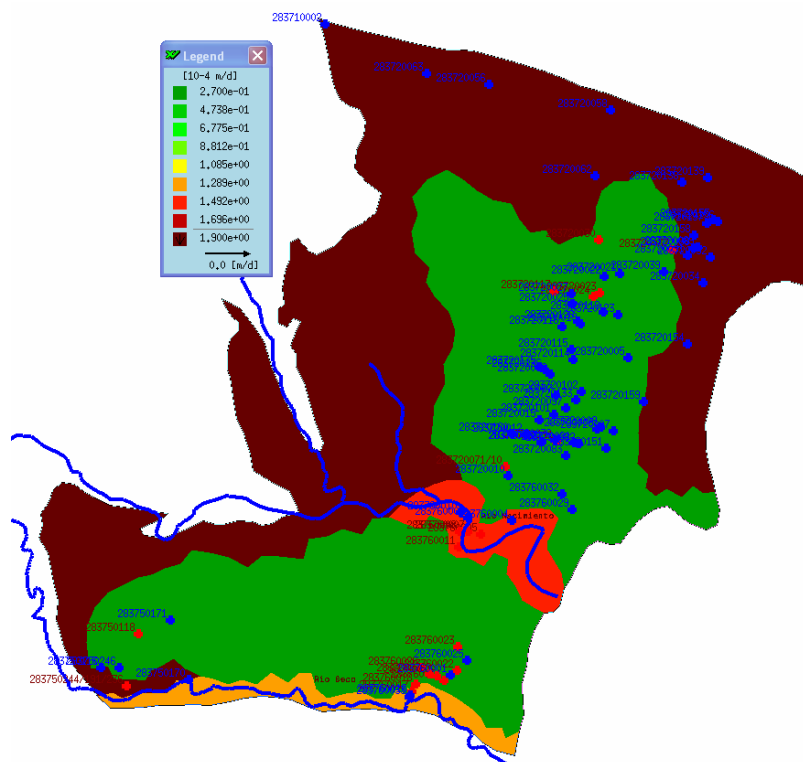


Figura 16. Distribución de la recarga media anual en el acuífero de Cabo Roig.

5.2.5.4. Dispersión hidrodinámica

Los valores de la dispersividad longitudinal y de la dispersividad transversal usados para todas las capas del modelo son 50 m y 0.1 m respectivamente. Estos valores de dispersividad fueron estimados durante la calibración del modelo de flujo y transporte en estado estacionario. El valor de la difusión molecular se consideró de $1 \text{ e-}09 \text{ m}^2/\text{s}$, el cual no fue calibrado, porque el modelo resultó insensible a este parámetro.

5.3. Calibración de los modelos desarrollados

A continuación se van a describir sucesivamente los modelos desarrollados en este proyecto, comentando las características de cada uno y sus principales resultados. Todo modelo debe ser calibrado antes de ser usado como una herramienta para predecir el comportamiento de un sistema acuífero; en este proyecto la fase de calibración fue conseguida por el ajuste manual de los parámetros de entrada en el modelo, dentro de un rango razonable, hasta reproducir los valores observados en el campo de piezometría y la posición y anchura de la zona de mezcla de la intrusión marina. Esta calibración partió de un rango de parámetros iniciales obtenidos de: mediciones de campo, estimaciones preliminares con otros programas, estudios e informes anteriores e información bibliográfica; dicha estimación inicial de los coeficientes del modelo fue modificada de manera gradual en cada una de las etapas de la modelización.

Los modelos fueron calibrados por la comparación de niveles piezométricos y valores de salinidad medidos y simulados obtenidos del monitoreo de pozos realizado por el IGME en el periodo 2000-2003. La ubicación geográfica de los pozos de monitorización usados para el ajuste de los niveles y salinidades es la mostrada en la figura 17.

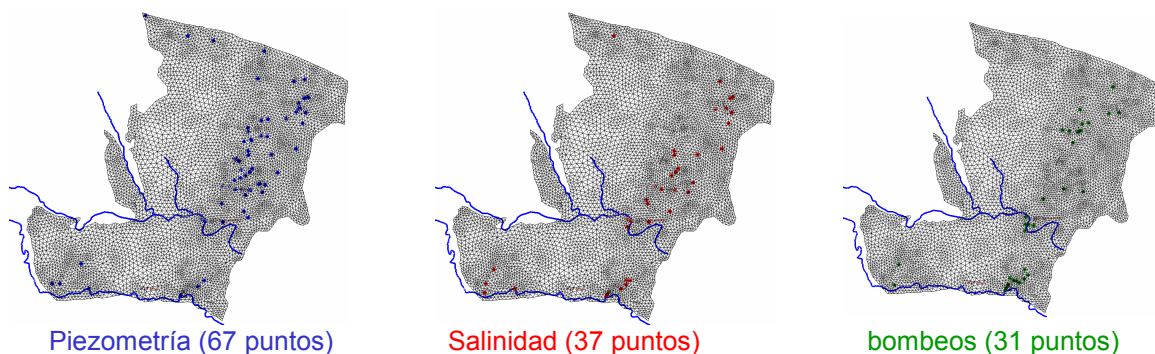


Figura 17. Ubicación de los registros de piezometría, salinidad y bombeos usados en la calibración del modelo.

Para ilustrar el grado de la calibración logrado en los niveles se presentan las gráficas de valores medidos versus simulados para los pozos monitoreados; si todos estos puntos se ajustan a una línea recta de pendiente la unidad y con intercepción en cero, ésta es una indicación de un buen ajuste entre los valores medidos y los simulados con el modelo.

5.3.1. Modelo de flujo hidrogeológico en estado estacionario (densidad constante)

El desarrollo de este primer modelo fue muy importante debido a que, entre otros casos, sirvió como condición inicial del modelo de flujo en estado transitorio, además en esta etapa se realizó el primer ajuste de la distribución espacial de la conductividad hidráulica y la recarga natural. La calibración fue realizada mediante el ajuste de los niveles medidos y observados medios del 2001; a continuación se presenta los principales resultados de la calibración de este primer modelo, no explicaremos en detalle estos resultados, ni simularemos con el hipótesis de gestión debido a que se considera un modelo poco realista.

En la figura 18 se observa que, en general, los niveles piezométricos simulados representan fielmente la realidad de las condiciones medias del 2001, a excepción de los niveles en la zona sur-oeste. Dicha zona presenta niveles simulados muy por encima de los niveles medidos en el 2001; además de encontrarse niveles piezométricos medidos por debajo de la cota del muro del acuífero; por lo que durante este proyecto se planteó la necesidad de revisar la información que existe de la geología en esta zona, a partir de lo cual surgió la necesidad de realizar tres sondeos para correlacionar con la información ya existente y con este primer modelo. Después de la revisión de la información litoestratigráfica de estos 3 sondeos, se ha concluido que los pozos de la zona sur-oeste explotan el agua del acuífero inferior del Mioceno, debido a que el acuífero superior del Plioceno está

desaturado, por lo cual los sondeos ubicados en esta zona no han sido incluidos en la calibración del modelo. El registro piezométrico 283750246 en 1987 fue de -13 msnm y en el 2001 de -63 msnm, lo que pone en evidencia la desaturación que presenta actualmente el acuífero en esta zona.

Actualmente este nivel acuífero del Plioceno está desaturado en esta zona sur-oeste, presentando niveles piezométricos por debajo del muro del acuífero, por lo cual se piensa que el agua que se capta en los sondeos situados en esta zona puede provenir del nivel acuífero inferior de las areniscas del Andaluciense o del aporte de agua de acuíferos aledaños, debido a que esta zona, de gran incertidumbre, coincide con el área cercana al anticlinal de Los Gracias de Abajo y Las Casas del Río Seco, al cual es necesario revisar si realmente funciona como un umbral hidrogeológico. Otro aporte de agua es el flujo lateral, por retornos de riego y precipitaciones, del nivel acuífero superior del Plioceno. El hecho de plantearse que el agua extraída en la zona puede provenir de un acuífero inferior, explicaría que los sondeos en esta zona profundicen a cotas muy por debajo del muro del acuífero del Plioceno, presentando las mayores profundidades (hasta 231 m) de toda el área de estudio. Por todo ello, estos sondeos de la zona sur-oeste no fueron considerados en la calibración.

La zona sur-este en el 2001 también presenta una importante desaturación del acuífero del Plioceno, con descensos de más de 25 m, en comparación con los registros de 1989 (sondeos 283760016 y 283760001), sin embargo los niveles de agua en esta zona presentan una recuperación más rápida a pesar de la intensa explotación, debido a la importante entrada de agua de mar.

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. Mientras 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 estas zonas; los valores más negativos se encuentran en la zona sur-este cerca de río Seco, por la intensa explotación en los últimos años. Ver figura 18.

En la figura 19 se observa que los principales conos de descenso se encuentran en la zona sur-este (cotas muy por debajo del nivel del mar) y en la zona central (entre Punta Prima y Urbanización La Zenia) debido a la intensa explotación de núcleos de bombeo. Actualmente la zona sur-este, es el mayor núcleo de explotación (cerca de río Seco), mientras que algunos sondeos de la zona central han sido abandonados por el incremento de la salinidad en sus aguas. Mientras que los mayores niveles de agua están localizados en el sector noroccidental del acuífero, dentro de los afloramientos de las areniscas y calcarenitas del Plioceno.

La dirección del flujo preferencial es en sentido noroeste-sureste, pero también se pueden observar en la zona sur líneas de flujo en dirección casi este-oeste, debido a la entrada de agua del mar mediterráneo y al importante descenso del nivel piezométrico en la zona. Además, en la zona central también se observan líneas de flujo en sentido este-oeste, como consecuencia de la intrusión marina en este sector.

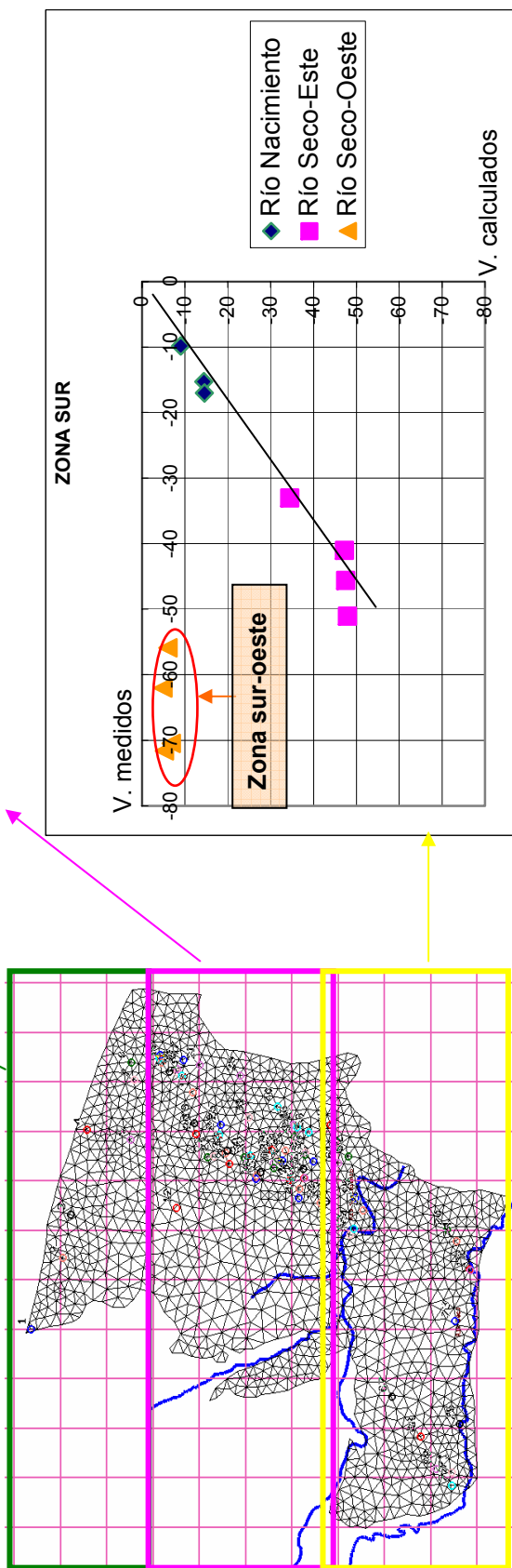
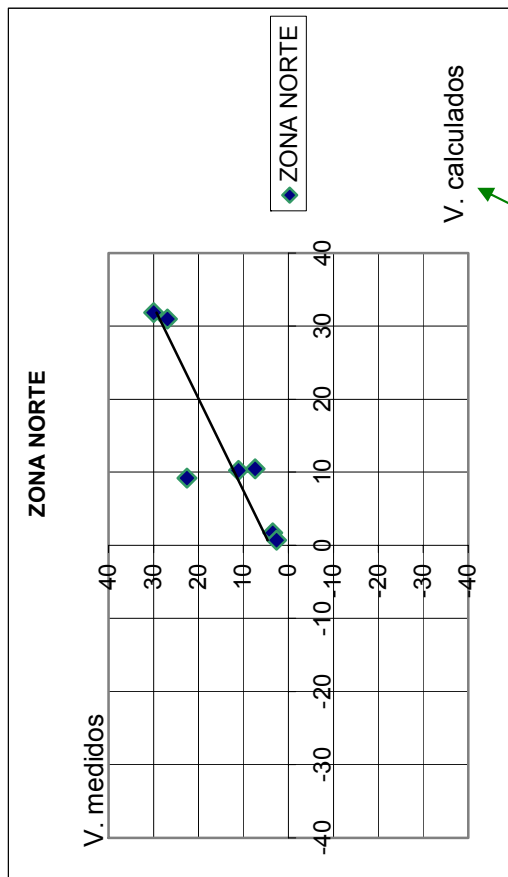
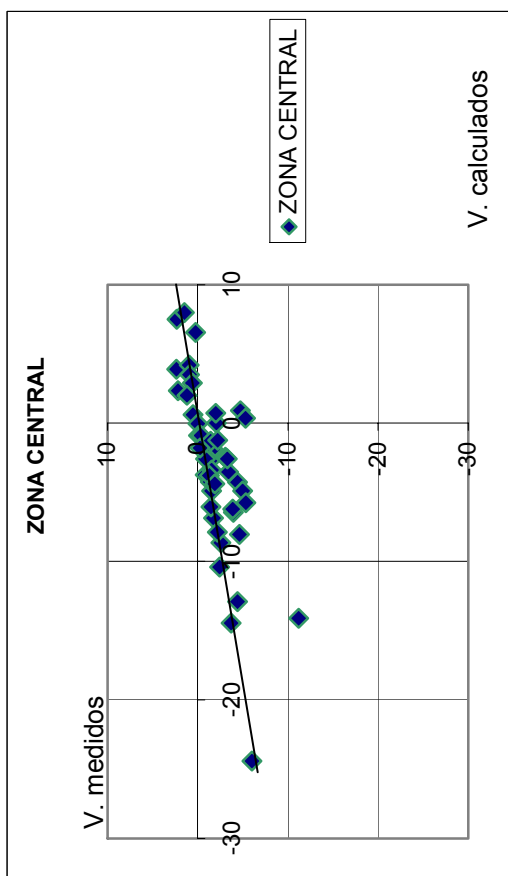


Figura 18. Calibración de los niveles piezométricos medios del 2001 con el modelo de flujo de densidad constante en estado estacionario.

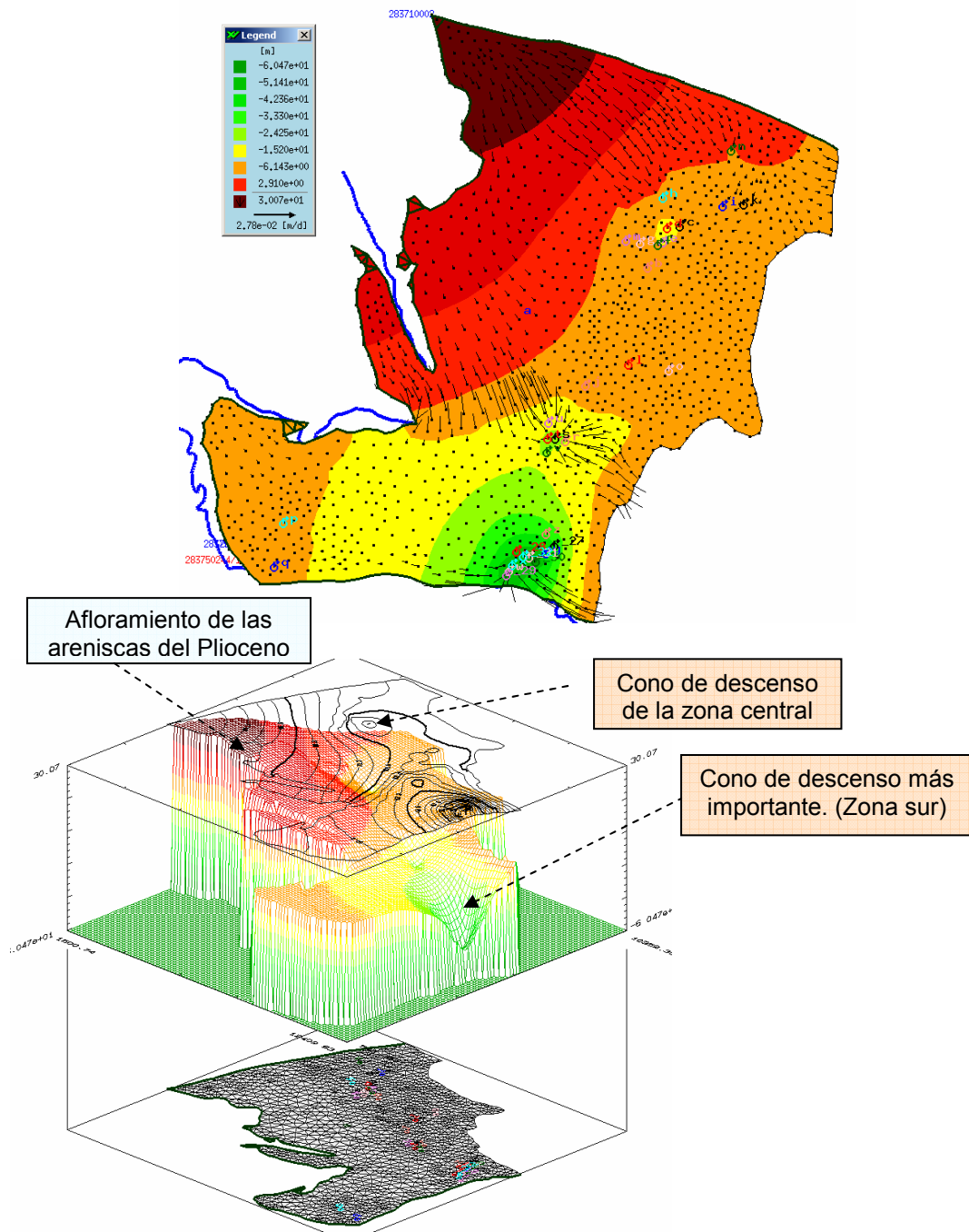


Figura 19. Niveles piezométricos promedio para el 2001 simulados con el modelo de flujo en estado estacionario (densidad constante).

En el balance (figura 20) se puede ver que la entrada de agua de mar en el acuífero es del orden de $1.4 \text{ hm}^3/\text{a}$, esta entrada se produce principalmente en la zona sur, desde río Nacimiento a río Seco; las salidas de agua subterránea se producen en las zonas norte y central, las cuales son consideradas despreciables ($0.2 \text{ hm}^3/\text{a}$). Durante la calibración se realizó un reajuste del valor de recarga estimado previamente con el Visual Balan, a una recarga promedio de $2.3 \text{ hm}^3/\text{a}$ y un bombeo promedio de $3.5 \text{ hm}^3/\text{a}$, donde el mayor núcleo de explotación se encuentra localizado en la zona sur del acuífero. Este primer modelo presenta una

subestimación del caudal de entrada de la intrusión marina y de la descarga de agua subterránea al mar, debido a que el movimiento del flujo subterráneo solamente es inducido por el gradiente hidráulico (convección forzada), sin considerar que el movimiento también es inducido por la variación de la densidad del fluido (convección libre), mecanismo principal en zonas costeras con problemas de intrusión marina.

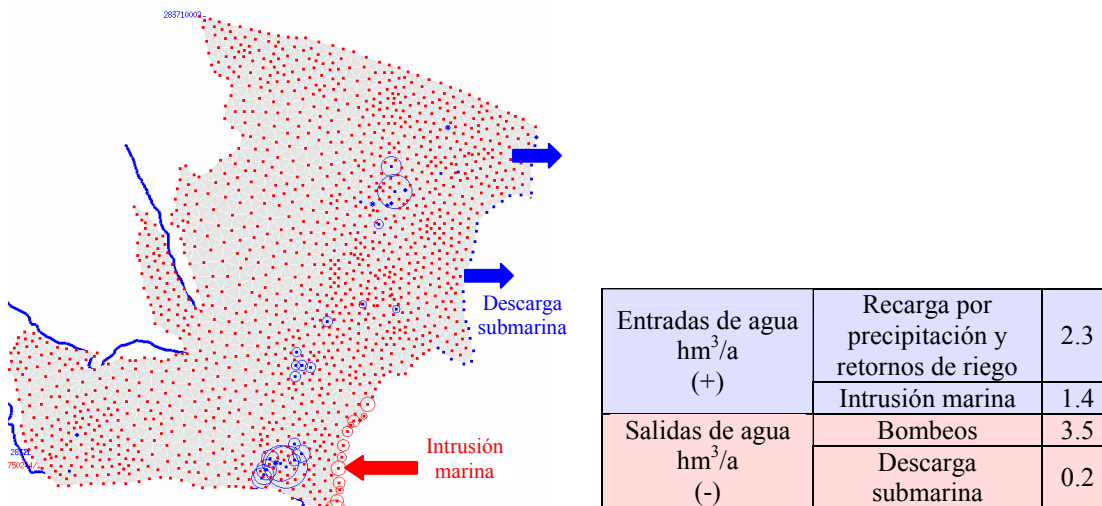


Figura 20. Balance hídrico para el modelo de flujo en estado estacionario para el año 2001.

5.3.2. Modelo de flujo en estado transitorio (densidad constante). Periodo 2000-2006

Para la simulación en este periodo del 2000-2006 (0 a 2200 días) se emplearon como valores medios mensuales de los bombeos los obtenidos por ajuste entre los inventarios realizados en el 2002 por el IGME y en el 2003 por CHS, debido a que no se cuenta con datos mensuales de las extracciones para los otros años de dicho periodo. La distribución mensual de la recarga para el periodo de 1997-2002 para cada zona del acuífero está disponible en informes anteriores (IGME, 2004) y mientras que para el periodo de 2002-2006 los valores de recarga medios mensuales fueron inferidos mediante los valores de precipitación para dicho periodo y a través de los porcentajes medios mensuales de recarga obtenidos del balance de agua para un periodo de 5 años. Al periodo de 2000-2004 se lo ha considerado como húmedo, lo cual provoca la recuperación general de los niveles de agua, como se podrá observar en las figuras 21, 22 y 23, mientras que al periodo de 2004-2006 se lo ha considerado como seco. La distribución mensual de los bombeos y de la recarga (0 a 2200 días) se presenta en las figuras 40 y 41.

Los sondeos empleados en la calibración de este modelo son presentados en el anexo I, donde se indica la ubicación y el ID asignado a cada registro según la zona a la que pertenezca; fue necesario la asignación de un ID para un mejor manejo de los datos durante la calibración y para diferenciar por zonas el comportamiento y evolución de los niveles de agua. En la zona norte, central y sur se cuenta con 7, 55 y 15 sondeos respectivamente.

La calibración del modelo de flujo en estado transitorio fue realizada con respecto a los niveles piezométricos medidos desde octubre del 2000 hasta febrero del 2003, el cual fue un periodo muy húmedo en la zona de estudio con altos valores de recarga y con una explotación media de 3 hm³/a; los resultados de la calibración para cada zona del acuífero son presentados mediante la comparación entre los niveles medidos y simulados, ver figuras 21, 22 (a, b, c) y 23 (a, b, c). Además se presentan mediante tablas los niveles piezométricos promedios medidos en 1989 y 2001, que nos han servido para realizar una comparación cuando en 1989 (año húmedo) el bombeo era de aproximadamente 6 hm³/a y el mayor núcleo de explotación se encontraba localizado en la zona central, mientras que en el 2001 (año húmedo) el bombeo se redujo a la mitad con 3 hm³/a y el mayor núcleo de explotación se encuentra en la zona sur. Esta comparación de los niveles de agua entre 1989 y 2001 nos ayuda a tener una idea general del descenso y recuperación del nivel piezométrico bajo distintas condiciones de bombeo, además servirá para contrastar con los resultados obtenidos en el escenario II, donde se considera un caudal de extracción total de 6 hm³/a igual que el de 1989, periodo en el cual la zona central se vio afectada por un mayor descenso de niveles e incremento de salinidad.

Los sondeos ubicados en la zona norte hasta la altura de Punta Prima presentan niveles piezométricos por encima del nivel del mar, y una recuperación general de los niveles de 1 a 2 m aproximadamente en un periodo de un año, debido principalmente a los afloramientos de las areniscas y calcarenitas del Plioceno (principal zona de recarga) y al periodo húmedo del 2000 al 2003, especialmente en los sondeos alejados del borde costero; mientras que los pozos en la zona costera presenta un nivel casi constante en el tiempo, con alguna disminución puntual de nivel en los meses de mayor bombeo, pero con una rápida recuperación de hasta 3 m en un mes (figura 21). Si comparamos la piezometría de 1989 con la de 2001-2002, podemos ver que en los últimos años existe una ligera recuperación de los niveles registrados, esto se debe a la disminución general de las extracciones de agua subterránea en la zona. Ver tabla 7.

Registros	Niveles		Diferencia de niveles (ascenso (+) / descenso (-))
	1989	2001	
283720058	10.60	10	-0.60
283720089	-3.60	4.2	7.80
283720090	2.17	3.5	1.33

Tabla 7. Niveles piezométricos promedios en 1989 y 2001 en la zona norte.

La zona central presenta un suave ascenso de los niveles en un año, (0.5 a 1.5 m en el mejor de los casos) (figuras 22 a, b, c), además se observan disminuciones puntuales en los meses de mayor bombeo (disminución mensual del nivel de agua de 1 a 2 m). Los registros piezométricos del 2001-2002 presentan una notable recuperación en esta zona con respecto a los registros de 1989 (tabla 8), con un incremento máximo de hasta 19.5 m; esto se debe a que en años anteriores era el núcleo de explotación más importante, pero algunas explotaciones han sido abandonadas en la actualidad, debido al aumento de la salinidad en sus aguas.

Registros	Niveles		Diferencia de niveles (ascenso (+) / descenso (-))
	1989	2001	
283720039	-9.24	-3.8	5,44
283720118	-16.30	-8.1	8,2
283720019	-12.80	-4.9	7,9
283720005	-1.28	-1.9	-0,62
283720099	-9.18	-0.9	8,28
283720102	-10.88	-2.7	8,18
283720101	-20.46	-3.4	17,06
283720015	-17.30	-4.3	13
283720007	-5.50	-7.9	-2,4
283720076	-2.16	0.9	3,06
283720081	-7.25	-3.6	3,65
283720083	-7.08	-14.5	-7,42
283720010	-25.37	-5.8	19,57

Tabla 8. Niveles piezométricos promedios en 1989 y 2001 en la zona central.

Los sondeos cercanos al río Nacimiento de la zona sur presentan un ascenso del nivel de agua de 1 m por año, y no se observan disminuciones puntuales mensuales importantes a pesar del incremento del bombeo en la zona sur; esto se debe a que los depósitos cuaternarios del río Nacimiento presentan conexión hidráulica con las areniscas del Plioceno, convirtiéndose en la segunda área mas importante de recarga del acuífero (figura 23 a). Además en el registro 283760010 se observa un incremento del nivel en 2001 de 3, 2 m con respecto a 1989.

En los registros de la zona sur–este se puede ver una disminución significativa de los niveles piezométricos, produciéndose descensos de más de 22 m en el 2001 con respecto a 1999 (tabla 9), como consecuencia del aumento del volumen de explotación que ha existido en los últimos años (en la actualidad es el núcleo más importante de explotación en todo el acuífero). En los registros mensuales del 2001-2002 se observan un descenso progresivo de los niveles piezométricos (figura 23b), con una disminución mensual promedio de aproximadamente 1m, y con un descenso máximo de 20 m por mes (registro 283750081).

Los sondeos de la zona sur-oeste muestran un ligero incremento general del nivel piezométrico en los registros de octubre del 2000 a febrero del 2002. Con incrementos puntuales máximos de hasta 10 m por mes, en el mejor de los casos; esto se debe a que se encuentra en la zona de afloramiento de las areniscas y calcarenitas del Plioceno (figura 23 c).

Registros	Niveles		Diferencia de niveles (ascenso (+) / descenso (-))	Ubicación
	1989	2001		
283760010	-18.5	-15.3	3,21	Río Nacimiento
283760001	-18.3	-41	-22,65	Zona sur-este
283760016	-6.6	-51.1	-44,5	Zona sur-este

Tabla 9. Niveles piezométricos promedios en 1989 y 2001 en la zona sur.

ZONA CENTRAL I
Area ampliada

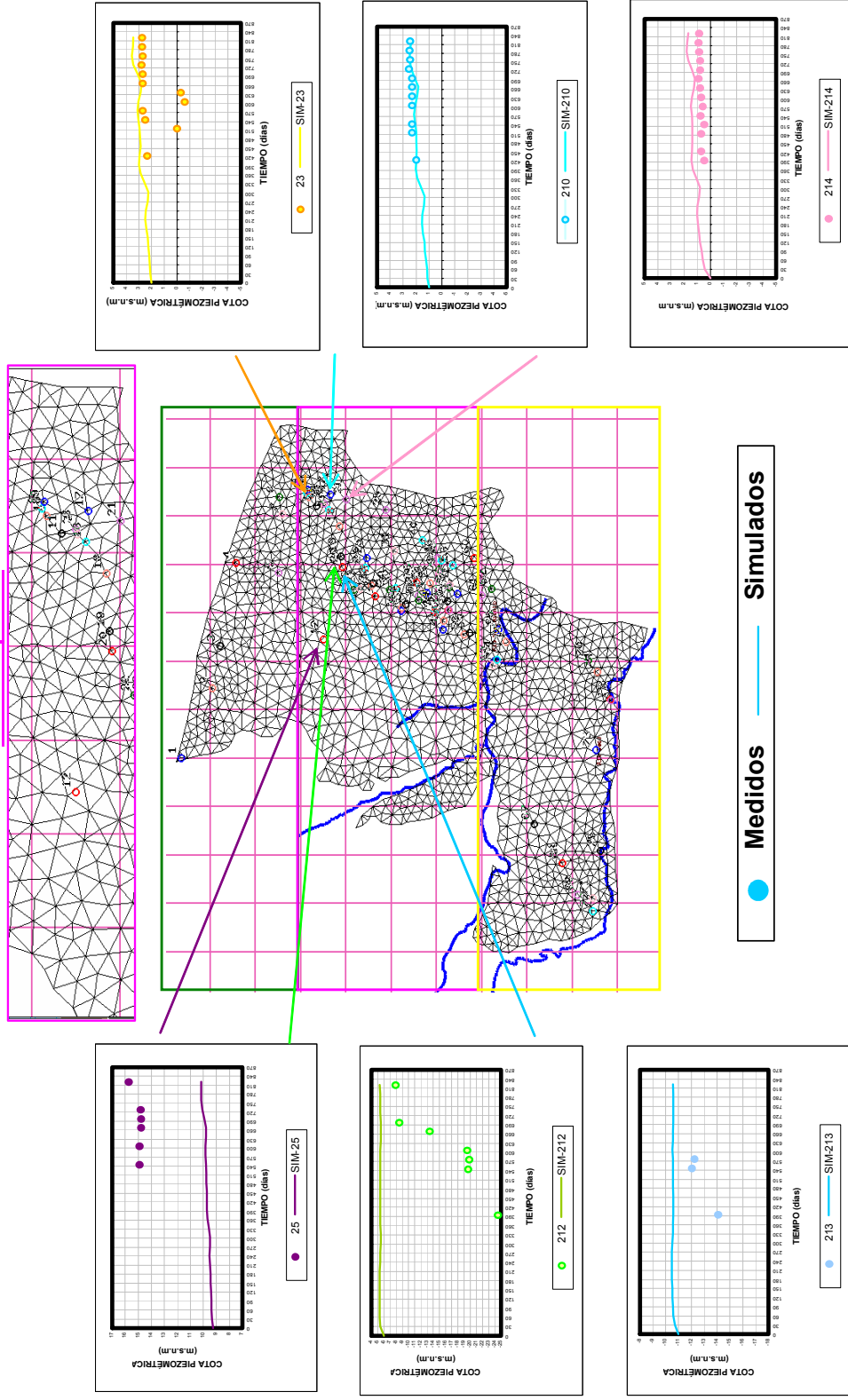


Figura 22 a. Niveles medidos y simulados para la zona central del acuífero de Cabo Roig con el modelo de densidad constante (octubre del 2000 a febrero del 2003).

ZONA CENTRAL II

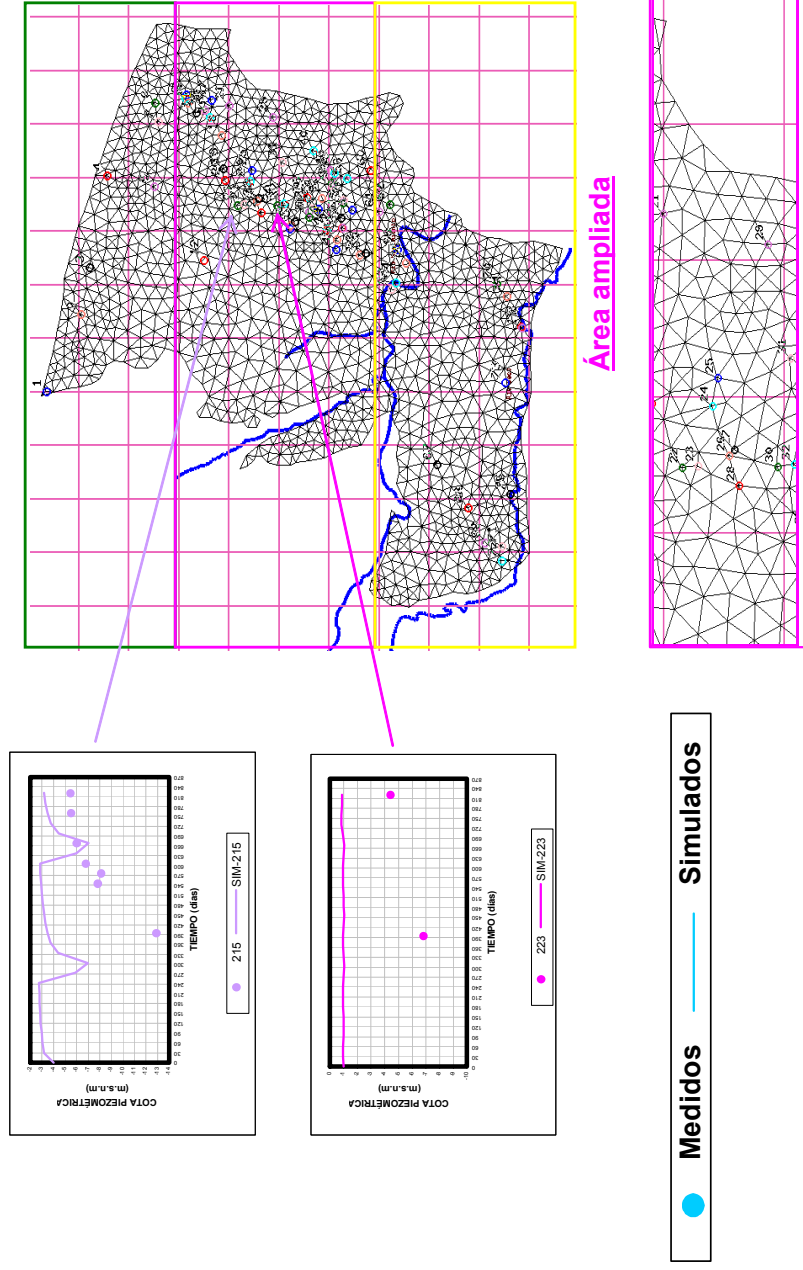


Figura 22 b. Niveles medidos y simulados para la zona central del acuífero de Cabo Roig con el modelo de densidad constante (octubre del 2000 a febrero del 2003).

ZONA CENTRAL III

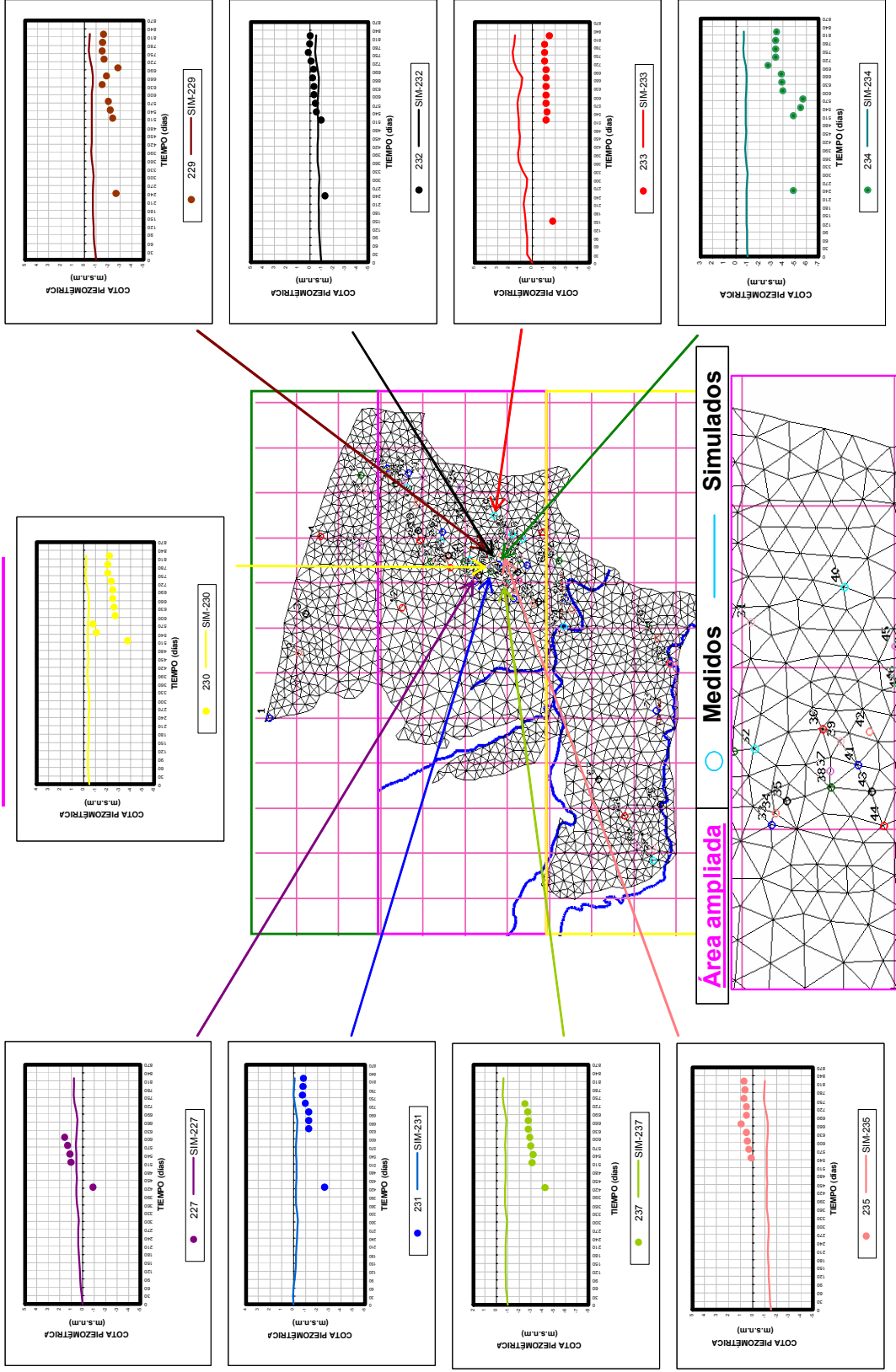


Figura 22 c. Niveles medidos y simulados para la zona central del acuífero de Cabo Roig (octubre del 2000 a febrero del 2003).

ZONA SUR - RÍO NACIMIENTO

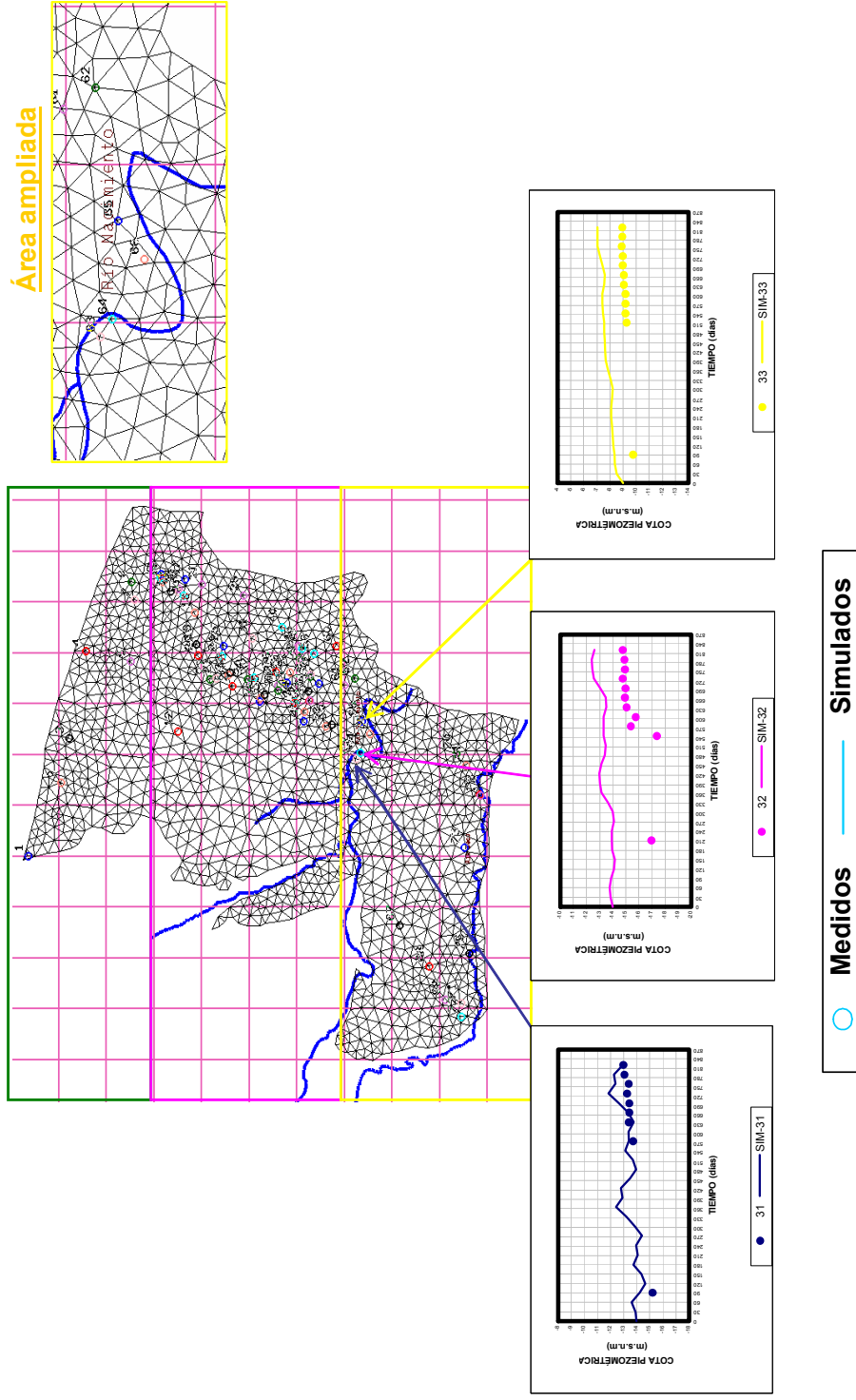


Figura 23 a. Niveles medidos y simulados para la zona sur (Río Nacimiento) del acuífero de Cabo Roig con el modelo de densidad constante (octubre del 2000 a febrero del 2003).

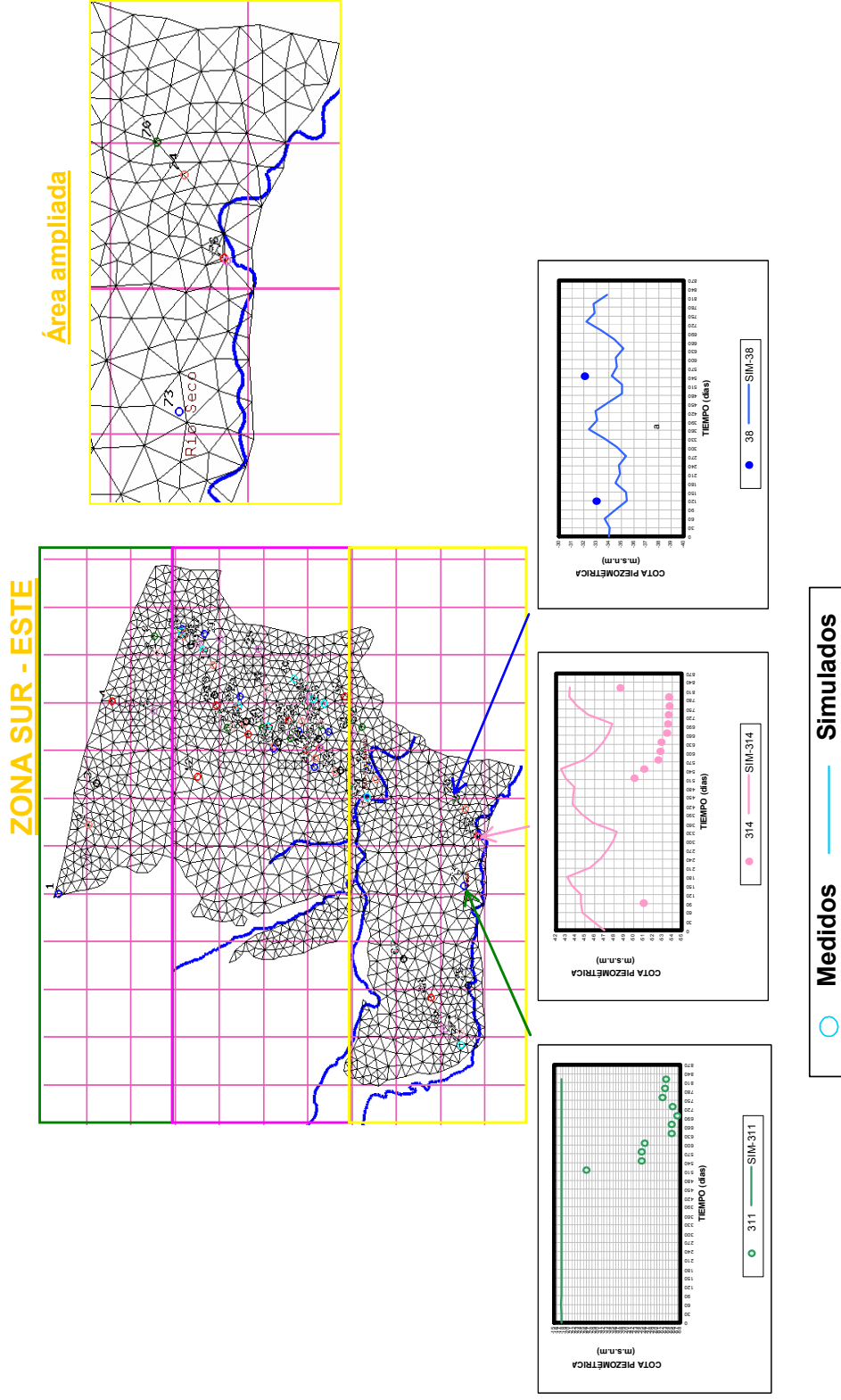


Figura 23 b. Niveles medidos y simulados para la zona sur – este del acuífero de Cabo Roig con el modelo de densidad constante (octubre del 2000 a febrero del 2003).

ZONA SUR - OESTE

Área ampliada

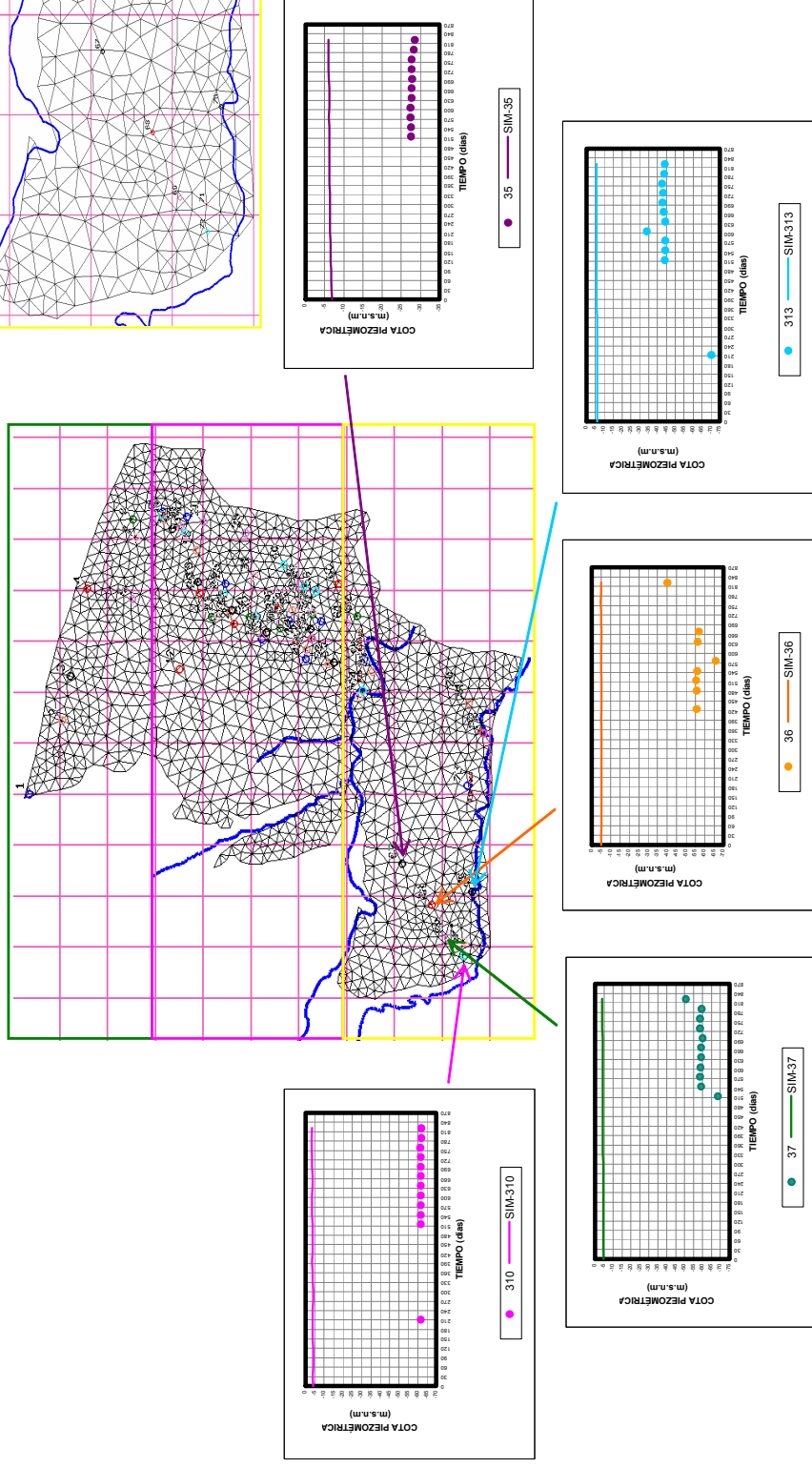


Figura 23 c. Niveles medidos y simulados para la zona sur – oeste del acuífero de Cabo Roig con el modelo de densidad constante (octubre del 2000 a febrero del 2003).

En la figura 24 se observa la evolución de los niveles piezométricos para las distintas zonas del acuífero en el periodo de 2000-2006. Estos niveles están influenciados por un periodo húmedo (2000-2004) en el cual se observa una recuperación general de los niveles de agua, principalmente en la zona norte. Después se presenta un periodo seco (2004-2006) en el cual ocurre una ligera disminución de los niveles de agua en la zona norte, algunos de la zona central y los de río Nacimiento en la zona sur, mientras que el resto de los sondeos ubicados en la zona central y sur, que presentan una mayor influencia de los bombeos, mantienen una tendencia de los niveles casi constante.

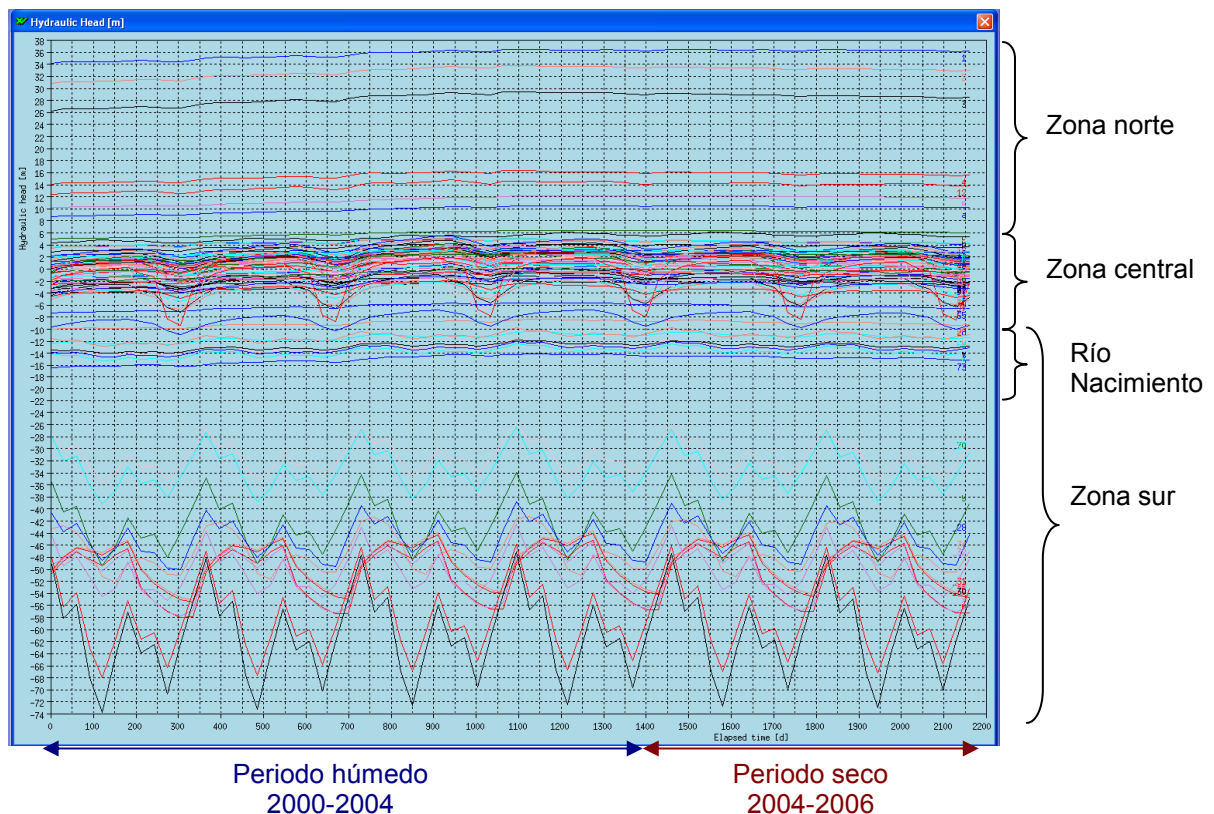


Figura 24. Niveles piezométricos simulados para el modelo de flujo en régimen transitorio para el periodo 2000-2006.

En el balance hídrico para las condiciones de septiembre de 2006 (figura 25) se observa una entrada de agua de mar de $1.2 \text{ hm}^3/\text{a}$ y una descarga submarina de $0.4 \text{ hm}^3/\text{a}$, valores muy parecidos a los obtenidos con el modelo de flujo en régimen estacionario, para las condiciones de 2001. Además se muestra que la intrusión marina se produce en la zona sur, mientras que la descarga submarina ocurre en las zonas norte y central, similar a lo obtenido en el modelo anterior.

Los valores de recarga y bombeo para septiembre de 2006, fueron obtenidos por ajuste a partir de los datos mensuales disponibles. Estos valores difieren de los otros balances porque este es para las condiciones del 2006 y los otros para las del 2001.

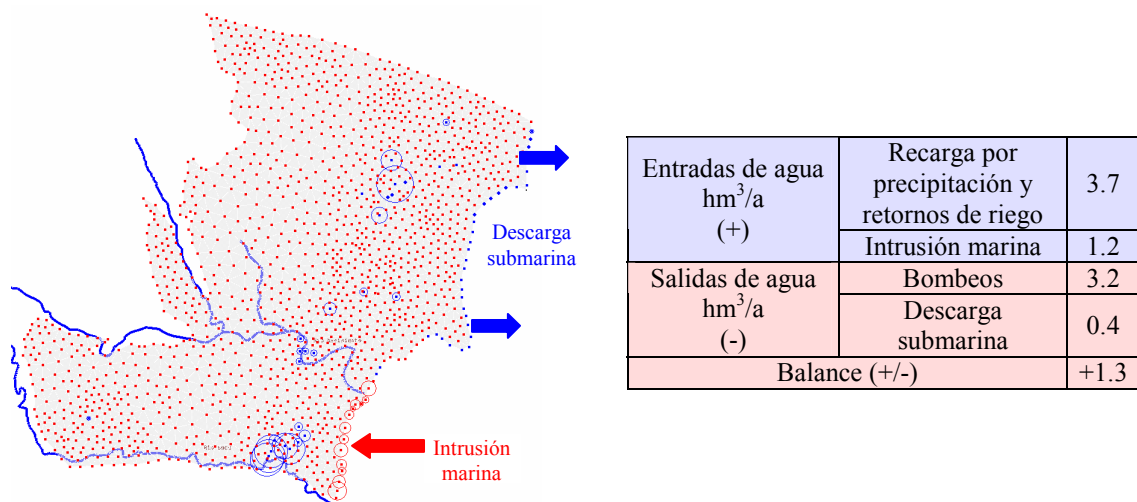


Figura 25. Balance hídrico para el modelo de flujo en régimen transitorio para septiembre 2006.

5.3.3. Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio terrestre del acuífero

Tras el desarrollo de los dos modelos con densidad constante, que permitieron realizar un ajuste gradual de algunos de los parámetros más importantes en los modelos de flujo, y tener una primera aproximación de lo que sería el comportamiento de la intrusión marina, se desarrolló el modelo de flujo con densidad variable para el dominio terrestre del acuífero. Durante el desarrollo de este modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario nos encontramos con la necesidad de ampliar el dominio del modelo, incluyendo además del dominio terrestre del acuífero, el dominio marino, debido a que no se conseguía reproducir la ubicación y el comportamiento de la cuña de intrusión marina en la zona sur, donde, según la información disponible, el contacto del acuífero con el mar se produce a más de 5 km mar adentro (Rodríguez Estrella, 2003).

Hay que señalar que los resultados de este modelo de flujo y transporte desarrollado en el dominio terrestre del acuífero solo son aceptables para la zona norte y central del acuífero. Mientras que en la zona sur los valores de salinidad han sido sobrestimados en relación con los valores medidos en esa zona, debido a que en el modelo se están imponiendo concentraciones de agua de mar en el acuífero en el borde costero, lo cual no puede asumirse debido a que, en la realidad, en el acuífero a la altura de la línea de costa existe un agua salobre, de una extensa zona de mezcla, con un espesor de 150 m, aproximadamente. En la figura 26 a), 27 d) y 27 e) se observa que la salinidad simulada en la capa confinante en la zona costera sur tiene concentraciones de agua de mar (36000 mg/l), lo cual no ocurre en la realidad, ya que las concentraciones medidas en esta primera unidad hidrogeológica son de 1000 a 10000 mg/l, correspondientes a una amplia zona de mezcla presente en esta zona (agua salobre), situándose la interfaz agua dulce/salada mucho más profunda (en la segunda unidad hidrogeológica).

No se discutirán en detalle los resultados de la simulación de este modelo, debido a que no es muy realista, por lo cual aquí solo presentaremos brevemente los resultados de la simulación de la distribución de la salinidad.

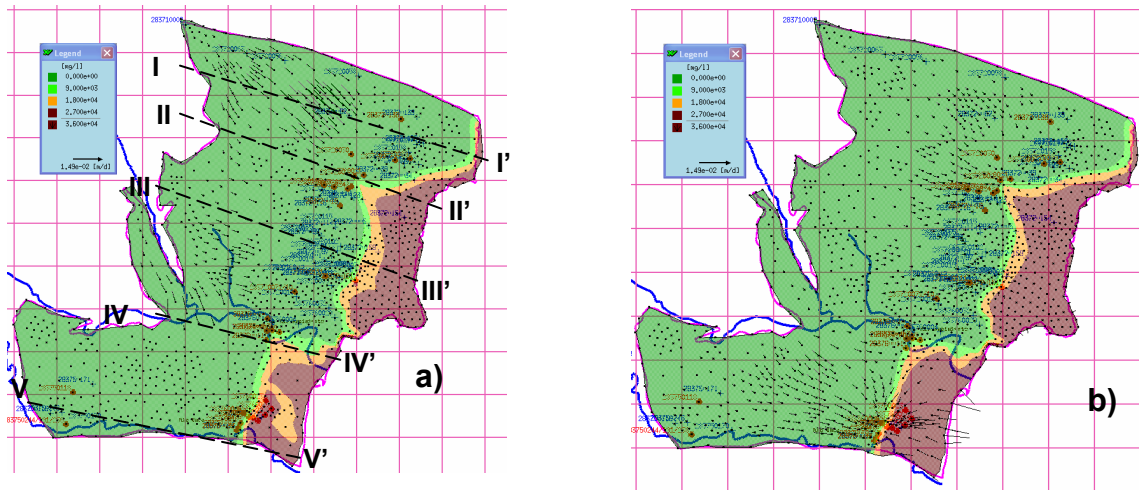


Figura 26. Simulación de la distribución de la salinidad en la capa confinante a) y en el muro de la capa acuífera b).

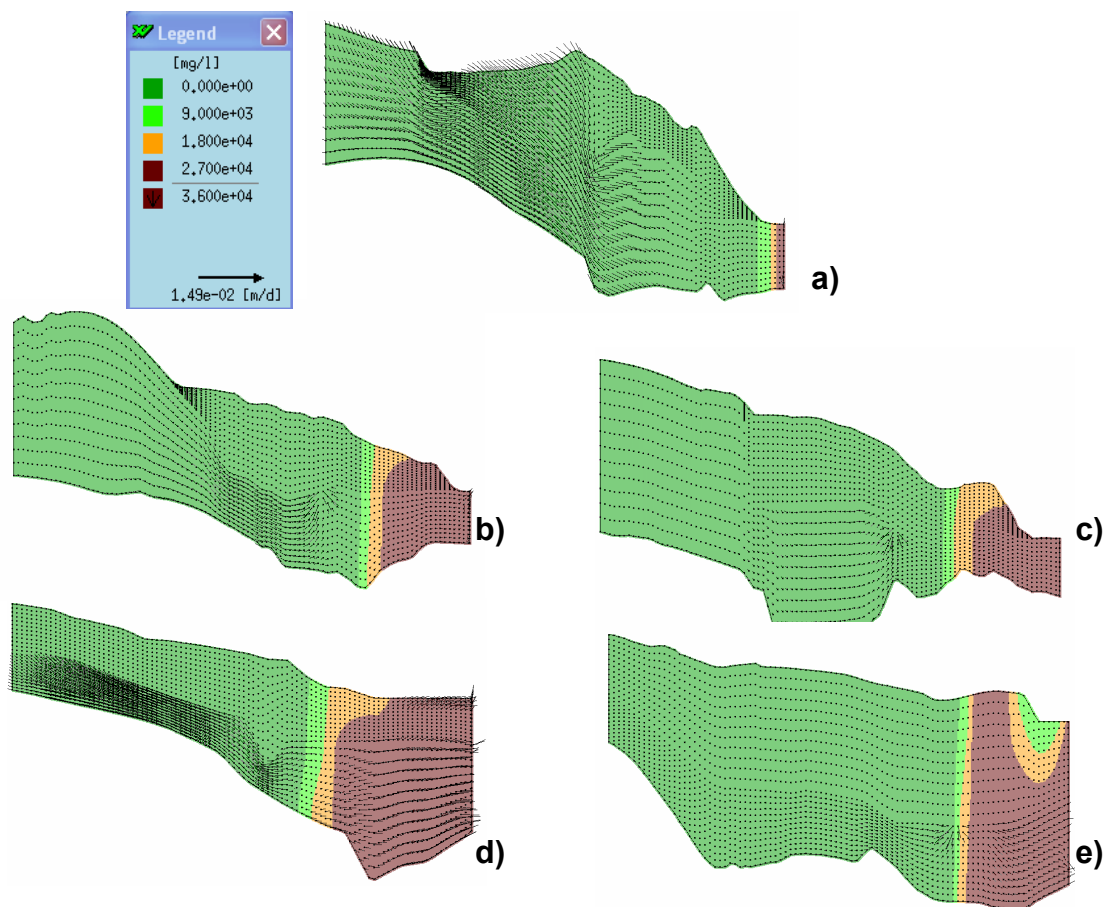


Figura 27. Resultados de la simulación de la intrusión marina en la zona norte, I-I' a), central, II-II' b), III-III' c) y sur, IV-IV' d), V-V' e).

Si realizamos una comparación del balance de este modelo (figura 28) con el del modelo de flujo con densidad constante en estado estacionario (figura 20), podemos comprobar que los valores del caudal de entrada de la intrusión marina y de la descarga submarina obtenidos aquí son mucho mayores que los obtenidos allí, debido a que aquí se considera el efecto de la densidad en el movimiento del flujo subterráneo y no solo el del gradiente hidráulico. La intrusión marina ha sido estimada en $16.5 \text{ hm}^3/\text{a}$ aproximadamente y la descarga al mar se estimó en $16 \text{ hm}^3/\text{a}$ (figura 28); estos valores muestran que los modelos con densidad constante pueden presentar una subestimación de la intrusión marina con respecto a los modelos con densidad variable. Los valores de bombeo y recarga difieren ligeramente del modelo con densidad constante (figura 20) como resultado del proceso de calibración de estos parámetros, los bombeos tuvieron también que calibrarse debido a que solo se cuenta con inventarios del 2002 y 2003.

Además se observa que en los resultados con densidad constante la zona afectada por la intrusión marina es la zona sur, mientras que los resultados con densidad variable muestran que las zonas más afectadas son la zona central y sur, lo que es coherente con las mediciones de salinidad realizadas en toda el área de estudio, (ver figuras 20 y 28).

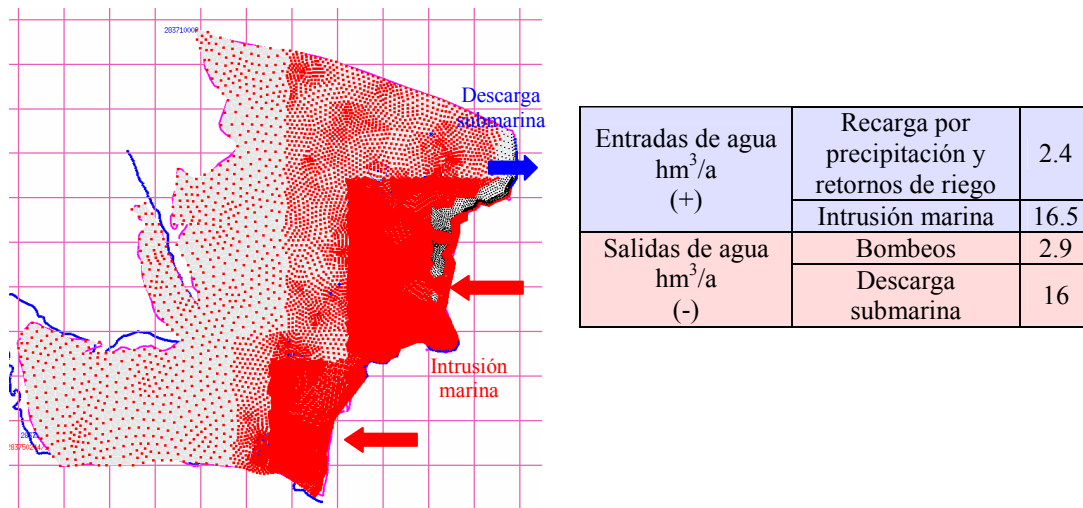


Figura 28. Balance hídrico para el modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario para el 2001 (dominio terrestre del acuífero).

5.3.4. Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio ampliado del acuífero (dominio terrestre y marino del acuífero)

Este modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario desarrollado para el dominio terrestre y marino del acuífero reproduce de manera más eficaz las condiciones reales del comportamiento de la intrusión marina en el acuífero costero de Cabo Roig. Esto se muestra en la figura 29 a), allí podemos ver que la salinidad en el muro de la capa confinante de la zona costera sur está entre 1000

a 10000 mg/l, correspondiente a la zona de mezcla, lo cual es coherente con la situación real del medio, mientras con el modelo terrestre del acuífero los valores estimados fueron 36000 mg/l, valor correspondiente al agua marina (ver figura 26a). La figura 29 b) muestra la distribución de la salinidad en el muro del acuífero, lo cual nos sirve para estimar la máxima longitud de la cuña salina en cada zona del acuífero; se puede apreciar que el mayor avance de la intrusión marina se produce en la zona central y sur del acuífero.

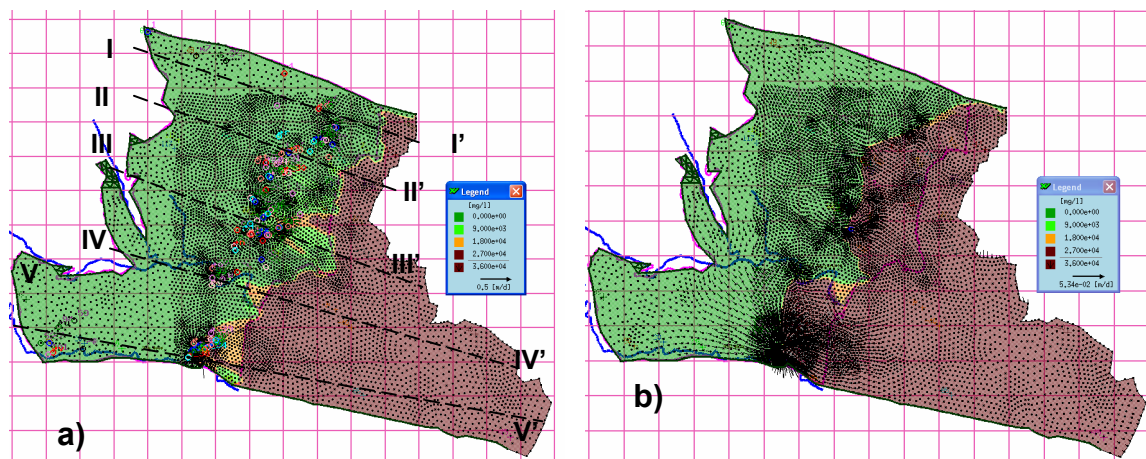


Figura 29. Simulación de la distribución de la salinidad en el muro de la capa confinante a) y en el muro de la capa acuífera b) del modelo ampliado de flujo con densidad variable para las condiciones medias de 2001.

Los resultados de la calibración y simulación de la intrusión marina, serán discutidos a continuación para cada una de las tres zonas del acuífero, mientras que los resultados de la calibración de la piezometría son muy parecidos a los obtenidos con el modelo con densidad constante en estado estacionario (5.3.1), por lo cual solo se presentan los resultados de la simulación de los niveles piezométricos para el 2001.

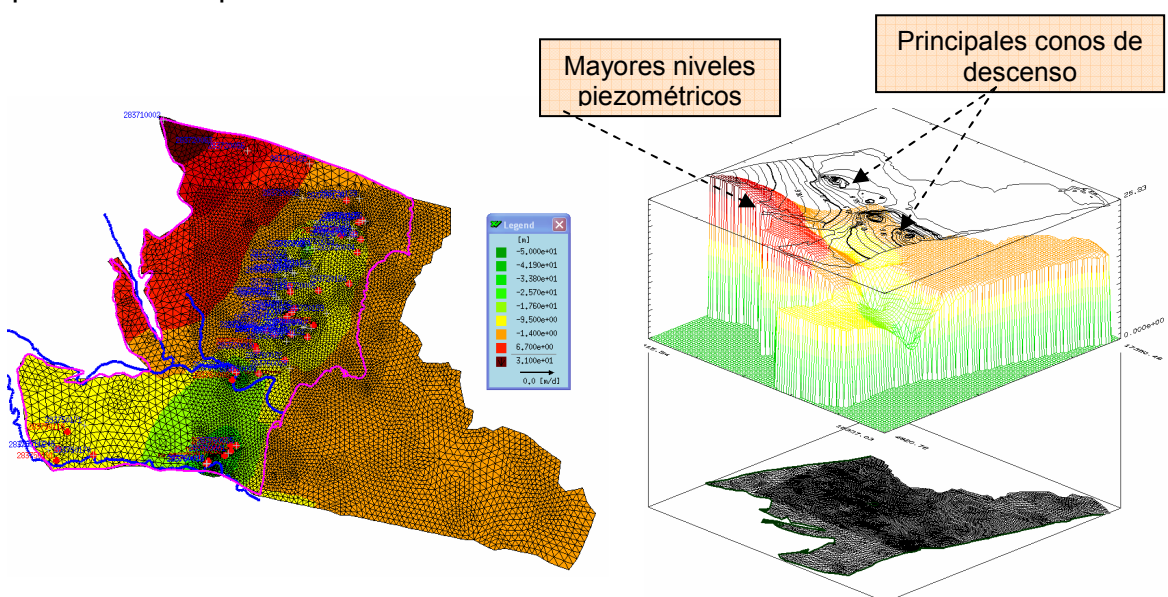


Figura 30. Niveles piezométricos promedio simulados para el 2001 con el modelo de flujo en estado estacionario (densidad variable).

En la figura 30 se observa que los principales conos de descenso, por orden de importancia, se encuentran localizados en la zona sur-este (cerca de río Seco) y en la zona central (entre Punta Prima y Urbanización La Zenia), producto de la intensa explotación del acuífero en estas zonas. Mientras los mayores niveles de agua se encuentran localizados en los afloramientos de las areniscas y calcarenitas del Plioceno, en el sector occidental del acuífero. La explicación de la distribución de los niveles de agua en el acuífero se puede revisar en el apartado 5.3.1.

Para observar en detalle la distribución vertical de la salinidad se han empleado cinco cortes (ver su localización en la figura 29 a) que permiten describir en cada zona del acuífero, la variabilidad de la cuña salina y de la zona de mezcla. En estas descripciones se considera como agua dulce a valores menores a 1000 mg/l, agua salobre (zona de mezcla) a valores entre 1000 a 10000 mg/l TSD y agua salada a valores mayores de 10000 mg/l TSD.

En la zona norte el contacto agua dulce/agua salada se produce justo en el borde costero (figura 31), encontrándose el pie de la cuña de agua salada aproximadamente a 1500 m tierra adentro y el espesor de la zona de mezcla es de unos 10 m. Debido a la cercanía de la principal área de recarga, esta zona presenta escasa penetración de la cuña marina, obteniéndose valores bajos de salinidad, entre 896 y 7180 mg/l. A continuación se presenta la comparación entre los valores medidos y simulados de la salinidad en los registros 283720092 y 283720157 ubicados en el corte I-I' de la zona norte (figura 32).

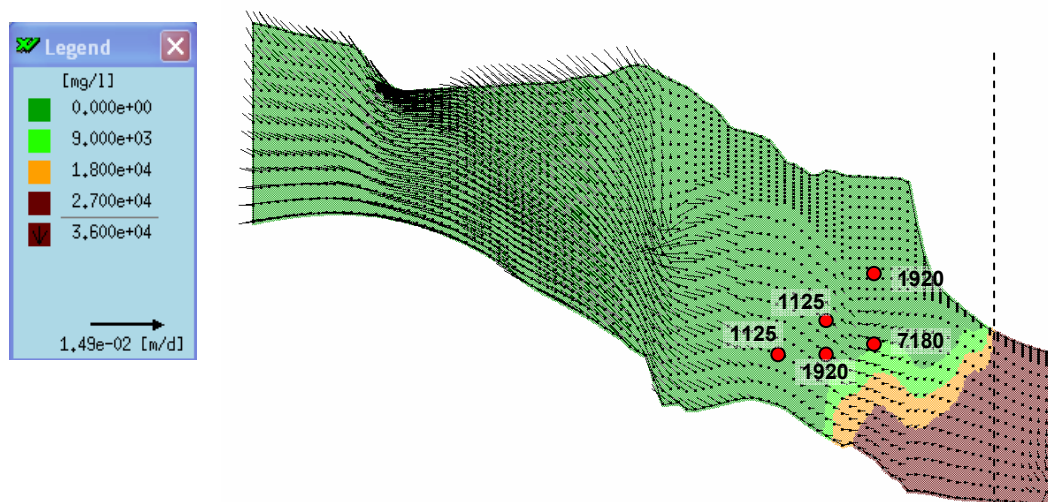


Figura 31. Comportamiento de la intrusión marina en la zona norte (corte I-I'), en las condiciones del 2001.

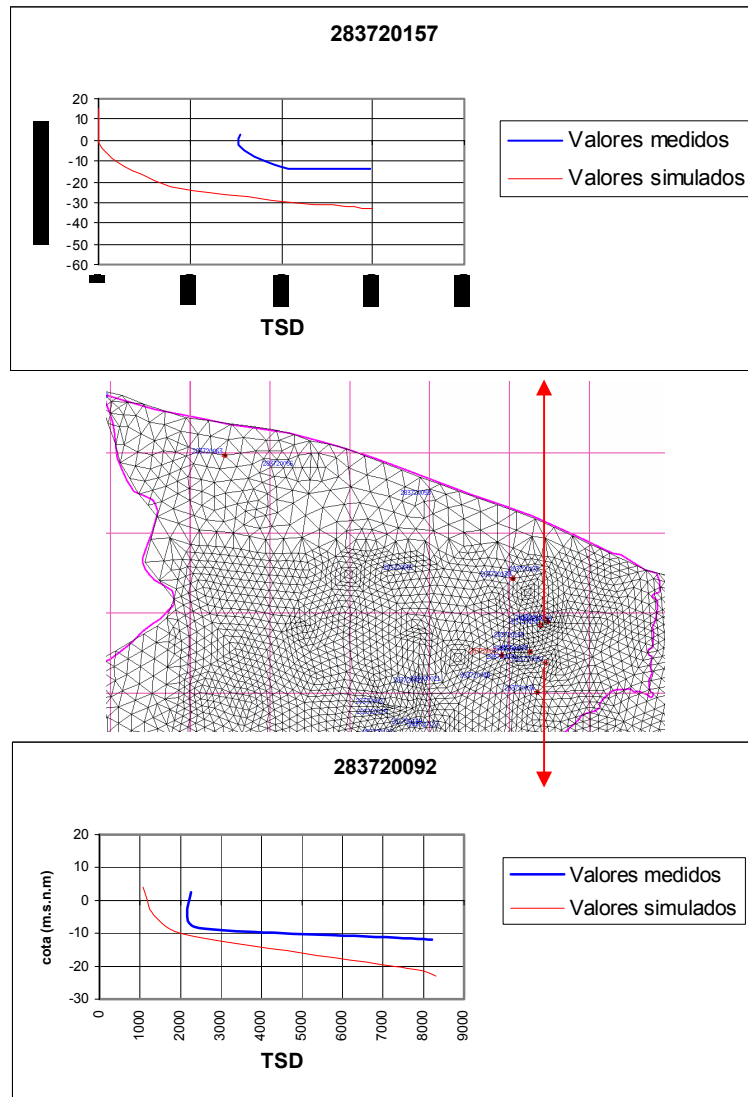


Figura 32. Valores medidos y simulados de la salinidad (TSD) en la zona norte para las condiciones del 2001.

La zona central presenta los valores más altos de salinidad (1280 a 32000 mg/l TSD) en toda el área de estudio, debido a la intensa explotación de núcleos de bombeo en años anteriores, además estas explotaciones presentan niveles piezométricos negativos. La mayor penetración tierra adentro de la cuña salina se encuentra en esta zona aproximadamente a 2500 m y el espesor de la zona de transición es de unos 25 m. Además, esta zona presenta conos ascendentes de agua salada debido a los bombeos y la mayor penetración de los pozos (figura 33 y 34). Podemos observar en la figura 35 los resultados de la calibración de algunos de los registros de la zona costera ubicados en los cortes II-II' y III-III'; solo se han incluido los registros más representativos que presenten variación en profundidad de la salinidad, sin considerar sondeos poco profundos o muy distantes de la costa.

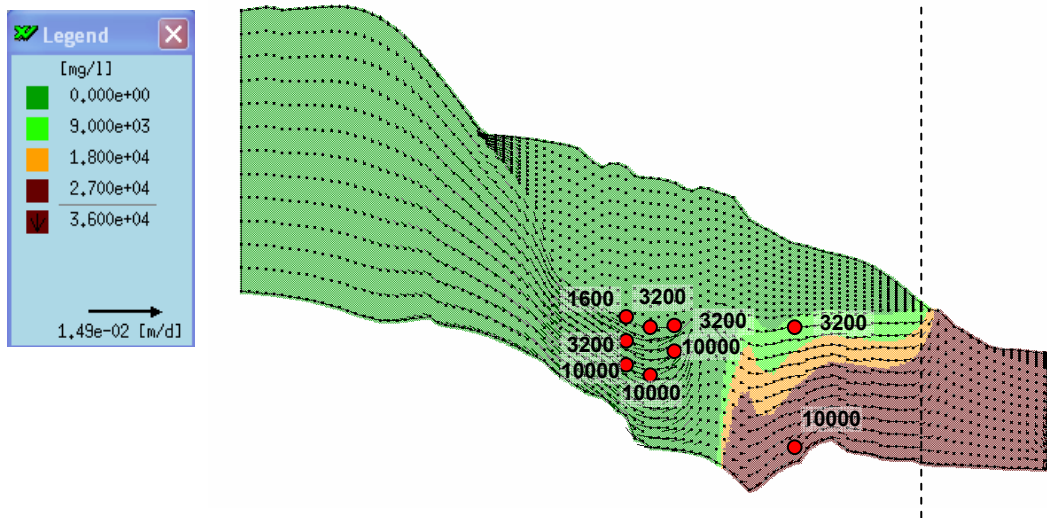


Figura 33. Comportamiento de la intrusión marina en la zona central (corte II-II'), en las condiciones del 2001.

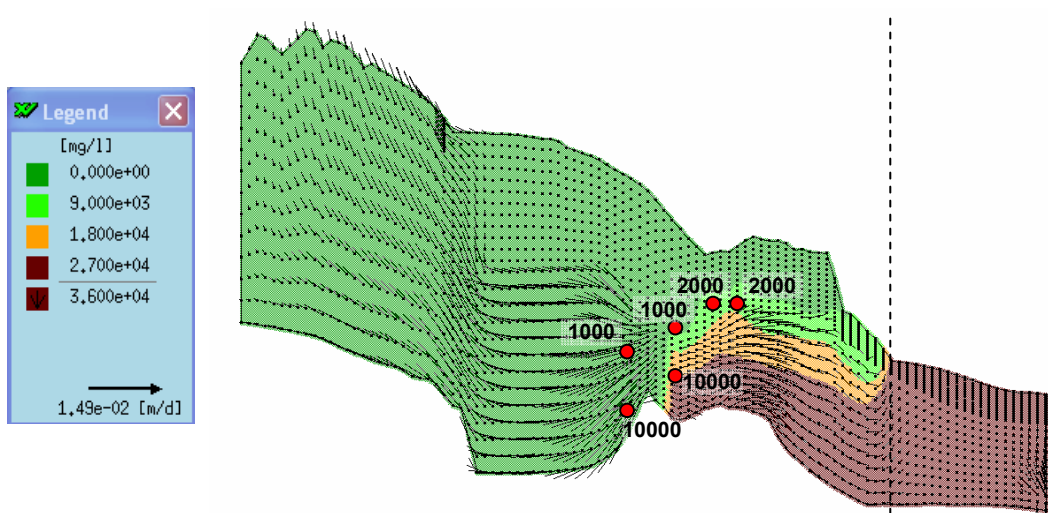


Figura 34. Comportamiento de la intrusión marina en la zona central (corte III-III'), en las condiciones del 2001.

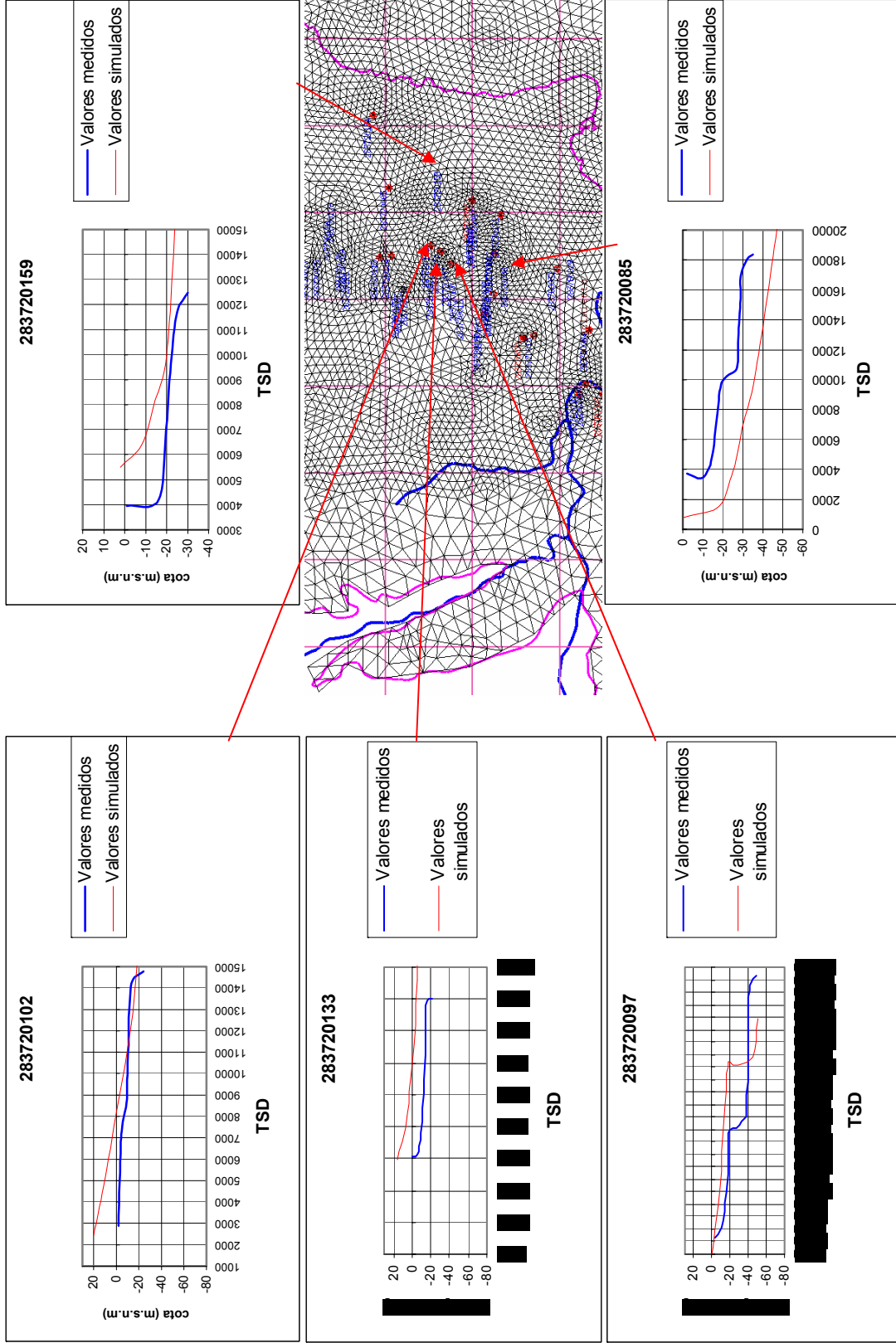


Figura 35. Valores medidos y simulados de la salinidad (TSD) en registros de la zona central para el 2001.

La interfaz agua dulce/agua salada en la zona sur se produce a más de 5 km mar adentro (Rodríguez Estrella, 2003), por lo cual los valores medidos de salinidad (500 a 26000 mg/l TSD) en esta zona son relativamente bajos, debido a que los sondeos ubicados en esta zona captan el agua de la extensa zona de mezcla (figura 36 y 37). En el borde costero la cuña salina está a una profundidad de 155 m y el ancho de la zona de transición es de unos 150 m, el mayor espesor registrado en el área de estudio. El pie de la cuña salina tierra adentro se encuentra a 1600 m del borde costero, resultando la longitud de la cuña salina ser de 6600 m.

En la figura 38 se observan los niveles medidos del 2001, 2003 y 2004, así como los valores simulados de la salinidad, para algunos de los registros más representativos de la zona, no se incluyeron otros registros de salinidad porque estos no mostraban variación significativa de la salinidad en profundidad, debido a que son pozos alejados de la costa o pozos de poca profundidad que no llegan a captar el agua de la zona de interfase agua dulce / agua salada.

En la gráfica del sondeo de río Nacimiento (figura 38) además de comparar las salinidades medidas y calculadas del 2001, se incluye la evolución de las medidas de la salinidad en el 2003 y 2004 lo cual nos ayuda a observar que existe un incremento progresivo de la salinidad desde el 2001 al 2004 (UPCT,2004), además vemos que el cambio brusco de salinidad que existe en el 2001 desaparece en los registros del periodo 2003 – 2004; en este periodo notamos que desaparece la zona de mezcla que existía en el 2001, encontrando directamente agua salada.

En el sondeo de río Seco (figura 38) no se tiene registros de salinidad en profundidad en el 2001, por lo cual solo podemos contrastar con valores de salinidad medidos en el 2003 y 2004 (UPCT, 2004), en esta gráfica se observa que no existe variación entre los valores medidos de 2003 y 2004, además se observa que la zona de mezcla en este periodo no desaparece con el paso del tiempo, ni se incrementa la salinidad como lo ocurrido en río Nacimiento para el mismo periodo.

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 cada vez más próxima a la costa; mientras que en río Seco la salinidad no presenta variación significativa en los últimos años, debido a que el contacto agua dulce/agua salada se encuentra más alejado de la línea de costa y a que el material confinante presenta en esa zona una permeabilidad más baja.

En general se observa un ajuste bastante coherente entre los valores medidos y calculados de la salinidad de las distintas zonas del acuífero, consiguiendo reproducir la forma y posición variable de la interfase agua dulce/agua salada; estos resultados de la piezometría y salinidad del modelo en estado estacionario con densidad variable se emplearán como condición inicial para el futuro modelo en régimen transitorio.

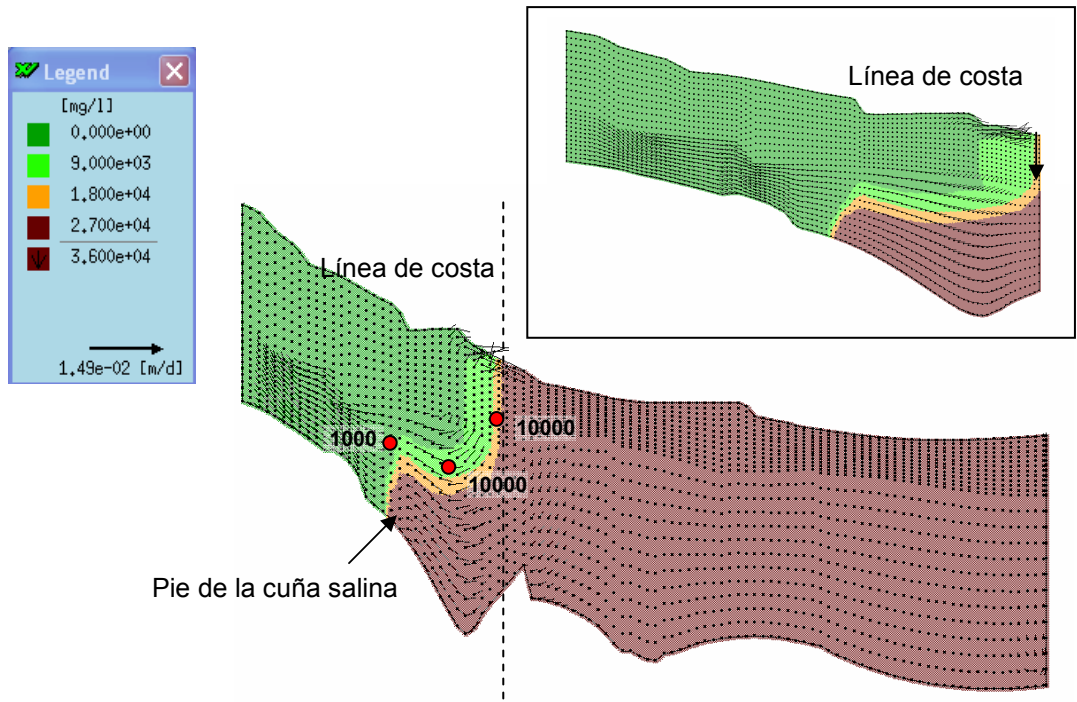


Figura 36. Comportamiento de la intrusión marina en la zona sur-río Nacimiento (corte IV-IV') en las condiciones del 2001.

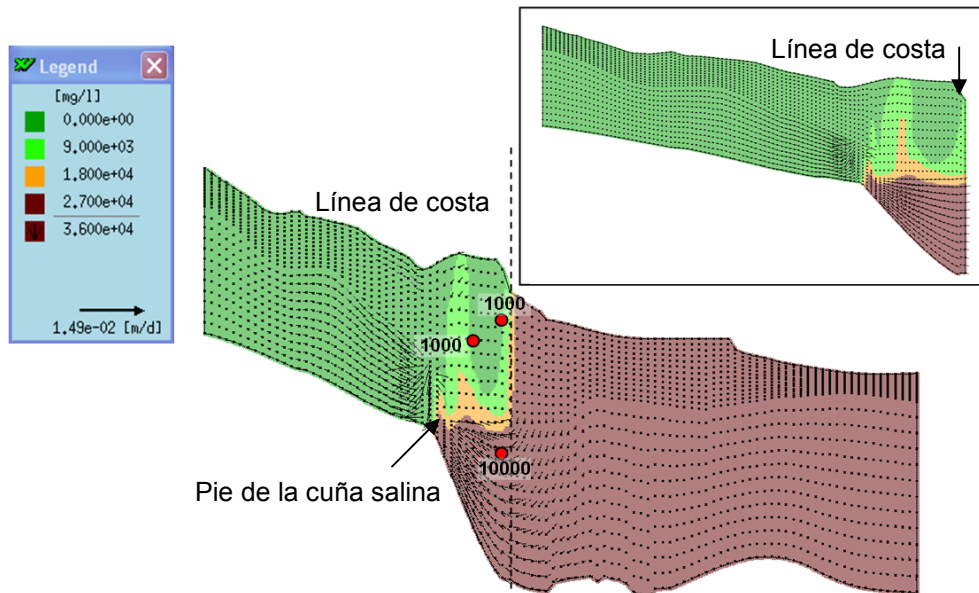


Figura 37. Comportamiento de la intrusión marina en la zona sur-río Seco (corte V-V') en las condiciones del 2001.

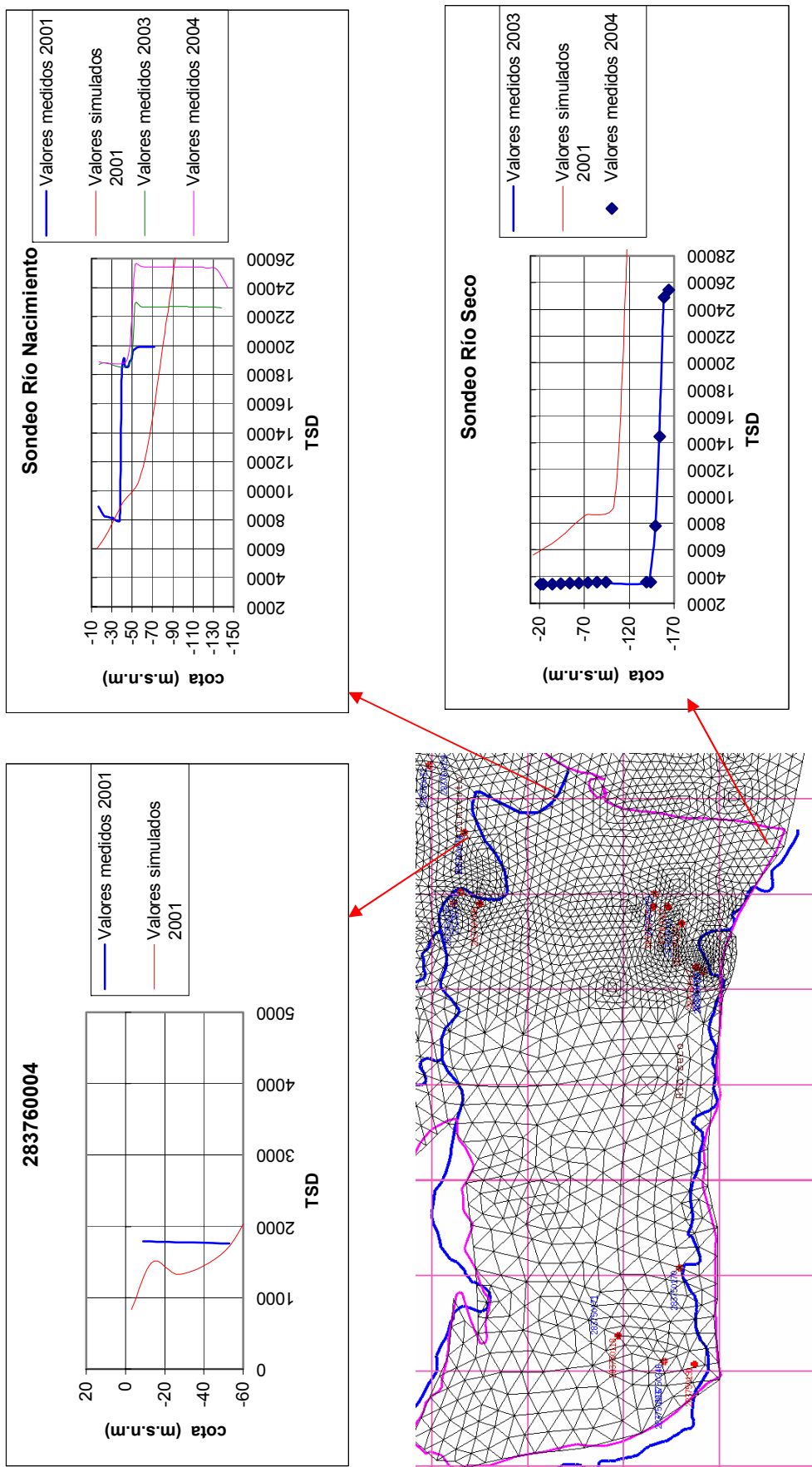
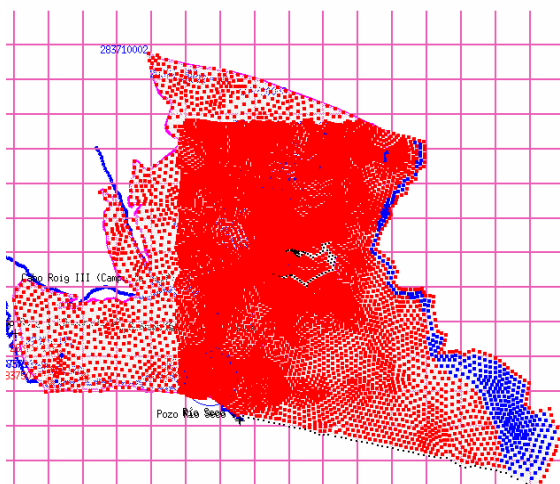


Figura 38. Valores medidos y simulados de la salinidad (TSD) en la zona sur para el 2001, 2003 y 2004. (Valores medidos de salinidad de los sondeos de río Nacimiento y río Seco, tomados de UPCT, (2004)).

Con este modelo ampliado, los valores de intrusión marina y descarga submarina son de 26.3 y 25.6 hm³/a, respectivamente. Se puede apreciar que estos valores son superiores a los obtenidos en el modelo con densidad constante y en el modelo terrestre con densidad variable; debido a que este es un modelo más realista, en el cual se considera el gradiente de concentraciones en el movimiento del flujo subterráneo y se incluyen los flujos entrante (intrusión marina) y saliente (descarga submarina) a través del fondo marino en la zona sur. Además se muestra que la intrusión marina se produce realmente a lo largo de casi toda la línea costera (principalmente en la zona sur); a excepción de la zona norte donde se presenta descarga submarina. Los valores de bombeos difieren ligeramente con respecto al modelo terrestre con densidad variable (figura 28) como resultado de la calibración de dicho parámetro, mientras que la recarga no presenta variación.



Entradas de agua hm ³ /a (+)	Recarga por precipitación y retornos de riego	2.4
	Intrusión marina	26.3
Salidas de agua hm ³ /a (-)	Bombeos	3.1
	Descarga submarina	25.6

Figura 39. Balance hídrico para el modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario para las condiciones medias de 2001 (dominio ampliado)

5.3.5. Comparación entre los balances de agua de los distintos modelos desarrollados

Por último se resume en la tabla 10 los principales resultados de los balances hídricos obtenidos en los cuatro modelos realizados; aquí podemos ver y comparar con más claridad la influencia de los modelos propuestos en la cuantificación de la intrusión salina y la descarga submarina de agua subterránea. La definición del balance hídrico forma parte importante del modelo hidrogeológico conceptual; lo cual nos ayudará a entender mejor los procesos y funcionamiento que se producen en el acuífero.

Para explicar los balances de los distintos modelos, se definen y estiman las entradas y salidas de agua en el sistema acuífero de Cabo Roig. Dentro de las entradas de agua tenemos la recarga por precipitación y retornos de riego y la intrusión marina. El paulatino ajuste de los valores de recarga varían muy poco entre los modelos en régimen estacionario, mientras que con respecto al modelo en régimen transitorio existe mayor variación, debido a que la recarga estimada

es mayor para septiembre de 2006, considerado uno de los meses más lluviosos. Sin embargo, los resultados de la componente de la intrusión marina son muy variables, como se puede ver en la tabla 10, por lo cual a continuación se explicará con más detalle estas variaciones.

Como parte de las salidas de agua están los bombeos y las descargas submarinas de agua subterránea. La estimación de las extracciones de agua subterránea se realizó mediante un ajuste de los valores de los bombeos con respecto al inventario realizado por el IGME en el 2002 ($3 \text{ hm}^3/\text{a}$) y por CHS en el 2003 ($3.8 \text{ hm}^3/\text{a}$), el cual se empleó como una extracción media para los periodos donde no existían datos; además de la ligera variación que presentan los valores de los bombeos por el continuo re-ajuste realizado entre estos dos inventarios. La significativa variación de la descarga submarina de agua subterránea se explicará con más detalle a continuación.

Las componentes de la intrusión marina y descarga submarina de agua subterránea, son poco conocidas pero de gran importancia en los balances de agua en las zonas costeras, por lo cual se explicarán las diferencias en la cuantificación de dichas componentes en función de las hipótesis planteadas para los distintos modelos: densidad constante, densidad variable, régimen estacionario, régimen transitorio, dominio terrestre del acuífero y dominio ampliado (dominio terrestre y marino del acuífero).

En la tabla 10 se puede apreciar que los modelos con densidad constante presentan una evidente subestimación de la intrusión marina y de la descarga submarina, con relación a los modelos con densidad variable, los cuales son modelos más realistas para problemas de intrusión marina, donde la salinidad juega un papel muy importante en el movimiento del flujo de agua subterránea.

En los inicios del proceso de modelización del acuífero de Cabo Roig se empleó un modelo terrestre del acuífero, pero al realizar el modelo con densidad variable nos encontramos con la necesidad de ampliar dicho modelo debido a que con el primero no se conseguía reproducir la distribución de la salinidad en la zona sur (entre los ríos Nacimiento y Seco), por lo cual, además del dominio terrestre se incluyó el dominio marino para poder simular la interfaz agua dulce/agua salada en la zona sur, que se produce mar adentro. En la tabla 10 se observa que los valores de la intrusión marina y la descarga submarina del modelo ampliado han resultado incrementados con respecto al modelo terrestre, debido a que en dicho modelo se incluyen también las entradas y salidas de agua que se dan a través del fondo marino.

Los valores de la intrusión marina y la descarga submarina fueron estimados para las condiciones de septiembre de 2006 en el modelo con densidad constante en régimen transitorio. A pesar de que estos resultados presenten una subestimación de dichas componentes; este modelo ha sido necesario para tener una primera valoración de la evolución de la intrusión marina en el periodo de 2000-2006, hasta que se tenga finalizado el modelo con densidad variable en régimen transitorio, el cual permitirá además poder determinar el nivel de afectación en la calidad del agua.

Balance hídrico	Componentes del balance	MODELOS			
		Estacionario con densidad constante Dominio terrestre del acuífero	Transitorio con densidad constante Dominio terrestre del acuífero	Estacionario con densidad variable Dominio terrestre del acuífero	Estacionario con densidad variable Dominio terrestre y marino del acuífero
Entradas de agua (+) hm ³ /a	Recarga por precipitación y retornos de riego	2.3	3.7	2.4	2.4
	Intrusión marina	1.4	1.2	16.5	26.3
salidas de agua (+) hm ³ /a	Bombeos	3.5	3.2	2.9	3.1
	Descarga submarina	0.2	0.4	16	25.6
Balance (+/-)		0	+ 1.3	0	0

Tabla 10. Balances de agua de los distintos modelos desarrollados para el acuífero de Cabo Roig.

5.4. Resultados de la simulación de los escenarios propuestos

Después de construidos estos cuatro modelos, se pasó a la explotación de dos de ellos: 1) modelo con densidad constante (transitorio) y 2) modelo del dominio ampliado con densidad variable (estacionario). Para lo cual se ha simulado con el modelo de flujo con densidad constante (transitorio) tres escenarios distintos en función de la recarga y el bombeo:

Escenario I: Extracciones medias ($3 \text{ hm}^3/\text{a}$) y recarga media ($2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$) para el periodo 2006-2010.

Escenario II: Extracciones máximas registradas ($6 \text{ hm}^3/\text{a}$) y recarga mínima para el periodo 2006-2010.

Escenario III: Implantación de una planta desaladora ($31.5 \text{ hm}^3/\text{a}$), extracciones medias ($3 \text{ hm}^3/\text{a}$) y recarga media ($2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$) para el periodo 2006-2010

Una versión simplificada de los escenarios II y III también fue analizada con el modelo del dominio ampliado con densidad variable (estacionario). Solo se emplearon estos dos modelos para la simulación de escenarios, debido a que por el momento son los considerados más representativos del sistema hidrogeológico.

Actualmente no se tiene completamente desarrollado el modelo con densidad variable en estado transitorio, se ha aprovechado el modelo con densidad constante para evaluar algunos escenarios de gestión, aunque estos resultados presentarán siempre una subestimación de la intrusión salina.

El periodo simulado fue 2000-2010, donde las condiciones de recarga y bombeo son conocidas y las mismas para todos los escenarios durante el intervalo 2000-2006, mientras que para el intervalo 2006-2010 no se conocen las condiciones a las cuales va a estar expuesto el sistema acuífero, por lo cual lo que se hace es plantear 3 distintos escenarios de recarga y bombeo para este intervalo.

5.4.1. Modelo de flujo en estado transitorio (densidad constante). Periodo 2000-2006

5.4.1.1. Escenario I: Extracciones medias ($3 \text{ hm}^3/\text{a}$) y recarga media ($2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$) para el periodo 2006-2010

En el escenario I consideramos un periodo de 10 años, dentro del cual se consideró del 2000 al 2004 un periodo húmedo y del 2004 al 2006 un periodo seco y para el periodo de 2006 al 2010 se emplearon los valores medios anuales de recarga calculados previamente para un periodo de 5 años en estudios anteriores (IGME, 2004), con una recarga media por año de $2.6 \text{ hm}^3/\text{a}$ y un caudal de extracción promedio de $3 \text{ hm}^3/\text{a}$.

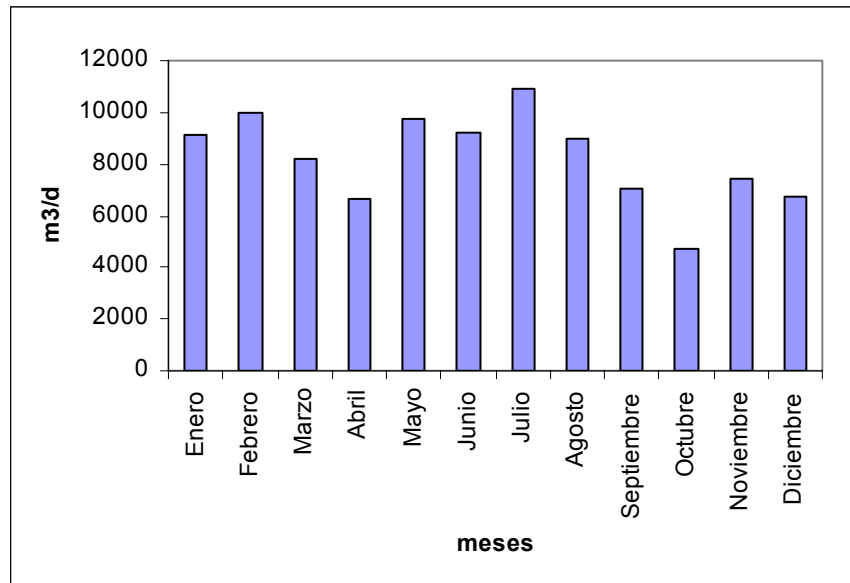


Figura 40. Escenario I: Extracción mensual (m^3/d) de agua subterránea durante el periodo de 2000-2010.

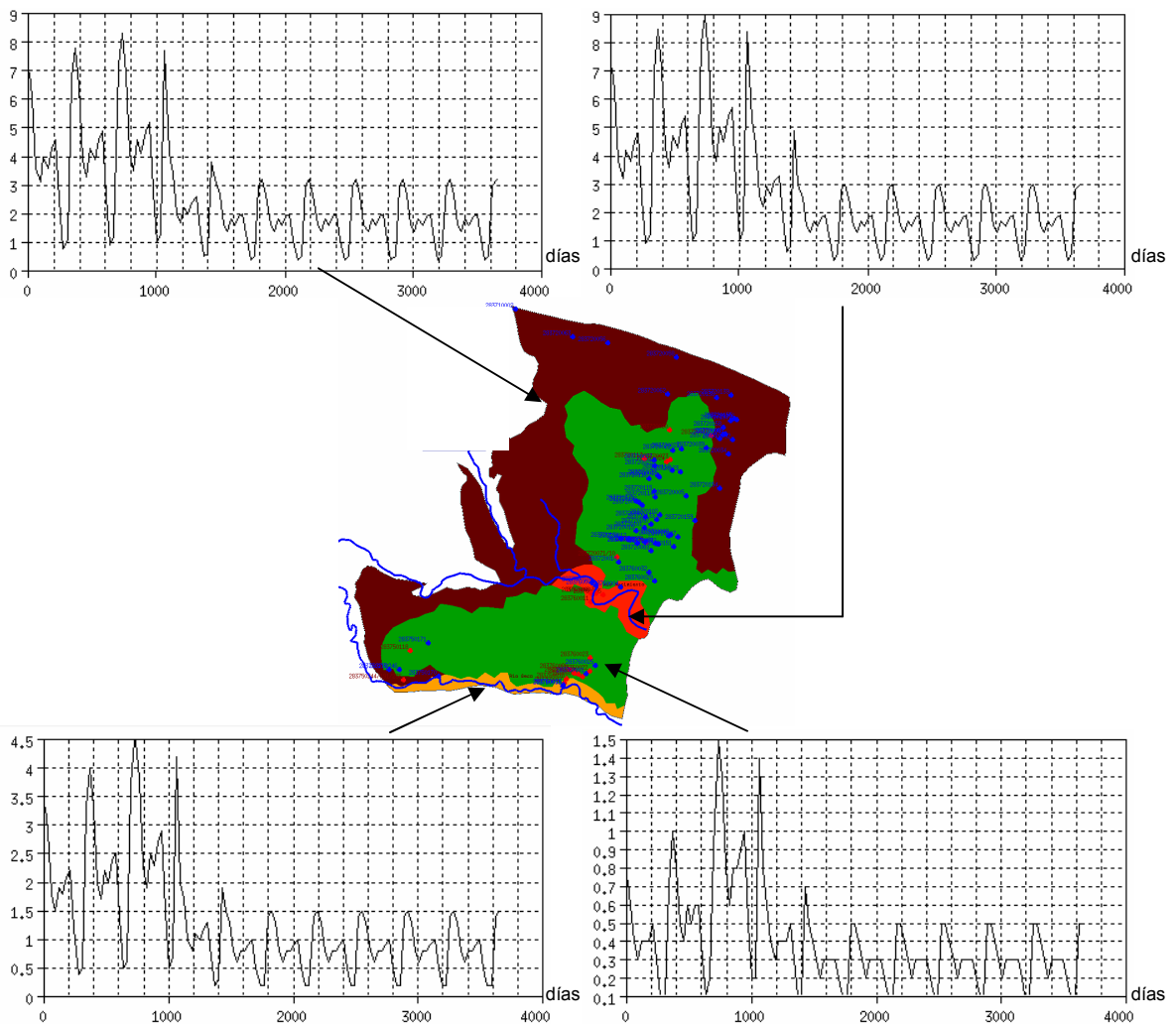


Figura 41. Escenario I: distribución espacial y temporal de la recarga ($10^{-4} m/d$) para el periodo de 2000-2010.

Debido a que solo existen registros mensuales de las extracciones de agua subterránea para el 2002 y 2003, ha tenido que realizarse un ajuste de la distribución mensual de los bombeos, como valores medios para los otros periodos (figura 40). La distribución mensual de la recarga para el periodo 1997-2002 ha sido calculada previamente mediante un balance de agua realizado en el acuífero (IGME, 2004), mientras que para el periodo de 2002-2006 se ha estimado la recarga mediante los valores de precipitación y los porcentajes medios mensuales de recarga obtenidos del balance de agua. Por último, para el periodo 2006-2010 se emplean los valores medios mensuales de recarga calculados para un periodo de 5 años. Además de presentarse en la figura 41 dicha evolución de la recarga en el tiempo, también se puede observar la distribución espacial de la recarga en el acuífero de Cabo Roig.

En la figura 42 se observan los resultados de la simulación de la piezometría para las condiciones de octubre del 2010, lo cual indica que bajo estas condiciones, el acuífero presenta una recuperación general de los niveles en toda el área de estudio debido principalmente al periodo húmedo hasta el 2003.

Para estas condiciones de recarga y bombeo se puede ver que la piezometría en los sondeos de la zona norte (figura 43 a) no se ve influenciada por el bombeo y se tiene una recuperación aproximada de 1 m por año hasta octubre del 2003, a partir del cual se observa un descenso entre 0.5 a 1 m en los niveles de agua hasta el 2010 con las condiciones medias de bombeo y recarga. Como podemos ver la zona central (figura 43 b) está muy influenciada por bombeos, según registros de 1989 se observó que esta era la principal zona de explotación de agua subterránea, pero en la actualidad, estos sondeos han sido abandonados por el deterioro de la calidad de su agua. Se observa un ascenso de los niveles hasta octubre de 2003, de 1.5 a 2 metros al año, a partir del cual existe un ligero descenso de los niveles (0.7 a 2 m) hasta el 2010.

En la zona sur (figura 43 c) se puede ver que existen dos grupos de evoluciones piezométricas bien diferenciadas: el *grupo I* está formado por los pozos ubicados en la zona de río Nacimiento y en la zona sur oeste del acuífero, estos sondeos presentan una tendencia a la recuperación de sus niveles hasta el 2003, vemos que en 1 año aproximadamente se recuperan 1m. Esto se debe a que los sondeos se encuentran cerca de las principales áreas de recarga: la de los depósitos Cuaternarios de río Nacimiento y el afloramiento de areniscas y calcarenitas del Plioceno; para el periodo del 2006 al 2010 se observa un descenso aproximado de 1m. El *grupo II* está formado por los sondeos ubicados en la zona sur este cerca del río Seco; se observa una gran variación de los niveles como respuesta de la intensa explotación que se está llevando en los últimos años. Actualmente esta zona presenta los mayores caudales de extracción de agua subterránea. Estos pozos del borde costero, muestran una fuerte capacidad de recuperación de sus niveles, de hasta 4 m en un mes, lo cual evidencia el gran aporte de entrada de agua de mar.

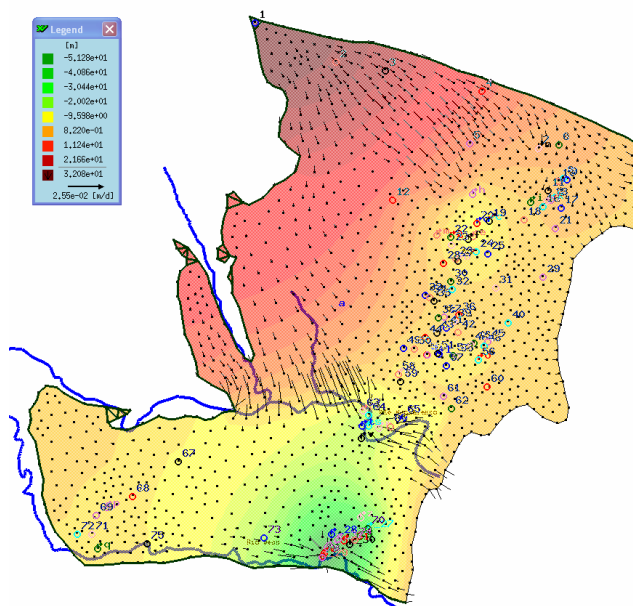


Figura 42. Niveles piezométricos simulados para el escenario I en octubre del 2010.

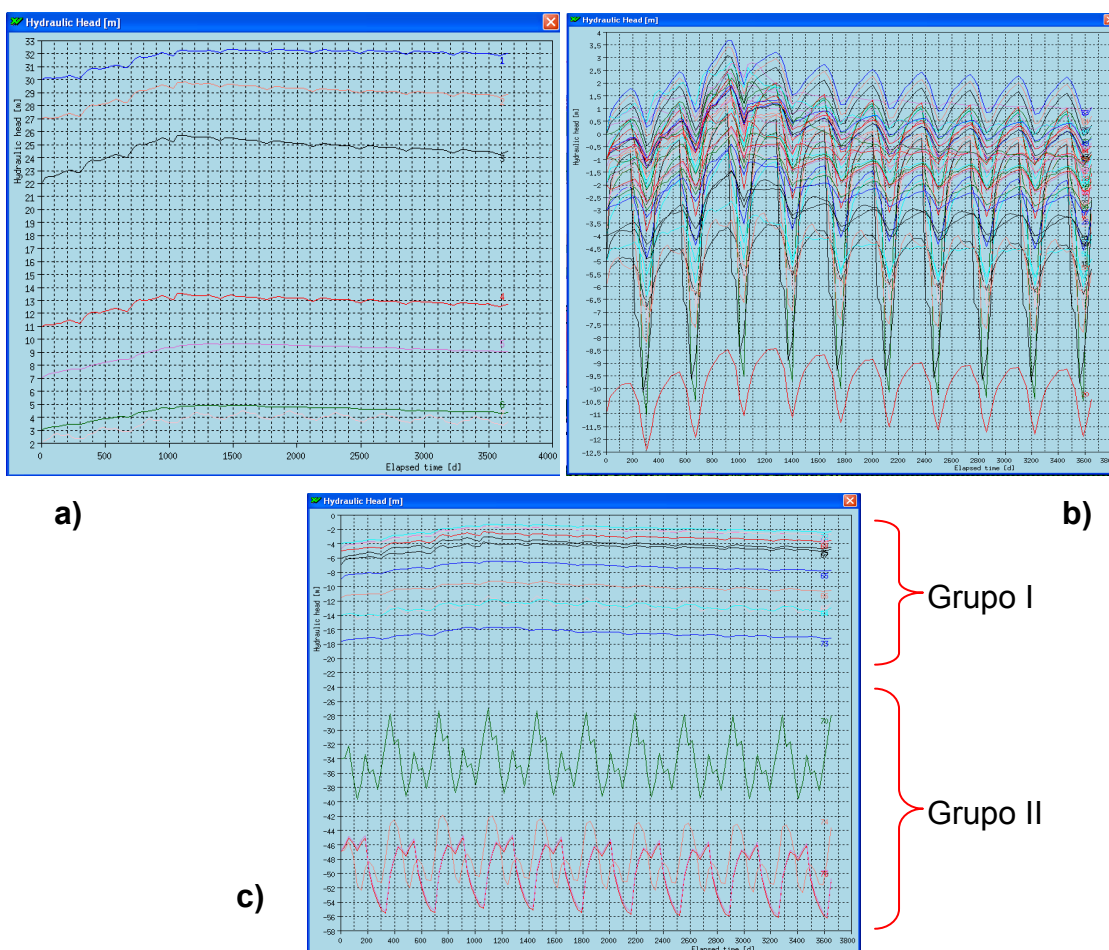


Figura 43. Niveles piezométricos simulados para el escenario I, desde octubre del 2000 a octubre del 2010. a) zona norte, b) zona central, c) zona sur.

Mediante el balance hídrico para estas condiciones, se puede ver que en el borde costero de la zona norte y central existen salidas de agua dulce (círculos color azul), esto indica que no existe riesgo significativo de salinización del agua subterránea en esta zona. Mientras en la zona costera sur se observa la mayor entrada de agua de mar (círculos color rojo) lo cual provocará un incremento de la salinidad, estos incrementos serán estimados con más precisión en el modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario. Ver figura 44.

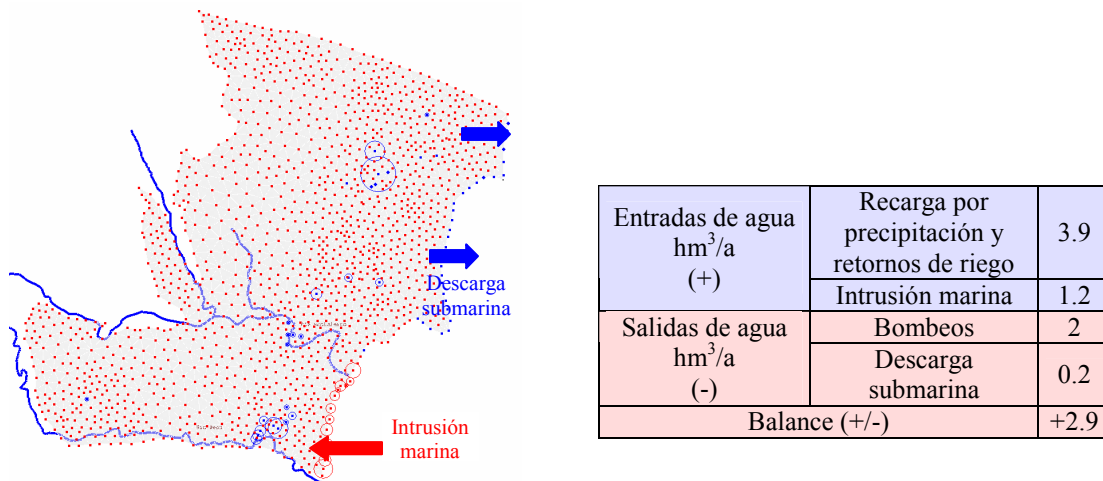


Figura 44. Balance hídrico obtenido para octubre del 2010 del escenario I.

5.4.1.2. Escenario II: Extracciones máximas registradas (6 hm³/a) y recarga mínima (1 hm³/a) para el periodo 2006-2010

En el escenario II intentamos reproducir las peores condiciones a las cuales puede estar expuesta el sistema hidrogeológico para el periodo del 2006-2010, con valores de recarga bajos y con el valor más alto de bombeo registrado en el acuífero (caudal de 6 hm³/a en 1989). Para estas condiciones se observa a partir del 2004 un descenso de 0.7 m al año en los sondeos de la zona norte, para la zona central se observa una disminución del nivel piezométrico de 0.5 a 3 m por año. Mientras en la zona sur-oeste y río Nacimiento se observan descensos de 1 a 3 m por año (grupo I) y en la zona sur-este se registran descensos entre 5 a 8 m por año (grupo II). Todo esto como consecuencia de la simulación del periodo seco del 2004 al 2010 y de la imposición del mayor caudal de extracción registrado. Figuras 45 y 46.

El balance hídrico obtenido para estas condiciones tan negativas (figura 47) muestra un incremento de más del doble del caudal de entrada de agua de mar (3.2 hm³/a) obtenido en el balance del escenario I para las condiciones medias de recarga y bombeo, además se observa que estas entradas afectan a la zona costera central y sur del acuífero (círculos de color rojo) desde Punta Prima hasta río Seco. Notamos que al incrementar el caudal a 6 hm³/a, la zona central se ve también afectada por la intrusión marina, como aconteció en 1989 (ver tabla 8), además se observa que la mayor entrada de agua salada se concentra en la zona sur, entre río Nacimiento y río Seco (círculos rojos de mayor diámetro). Sin embargo los sondeos de la zona norte no presentan un riesgo importante de

salinización, como consecuencia de la importante recarga de agua subterránea en dicha zona.

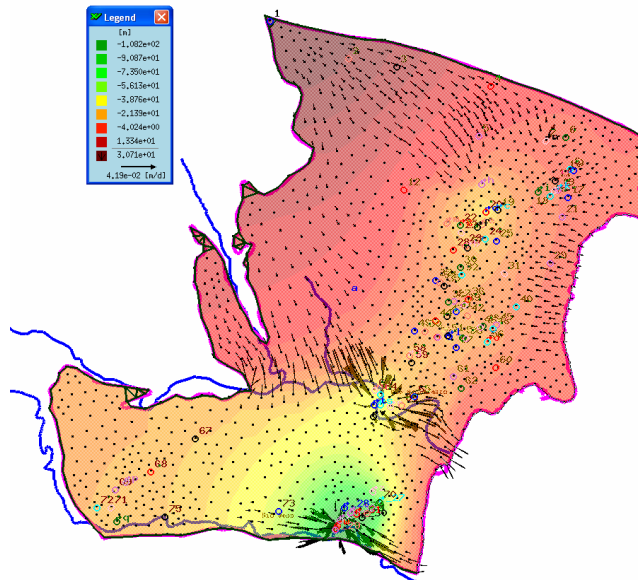


Figura 45. Niveles piezométricos simulados para el escenario II en octubre del 2010.

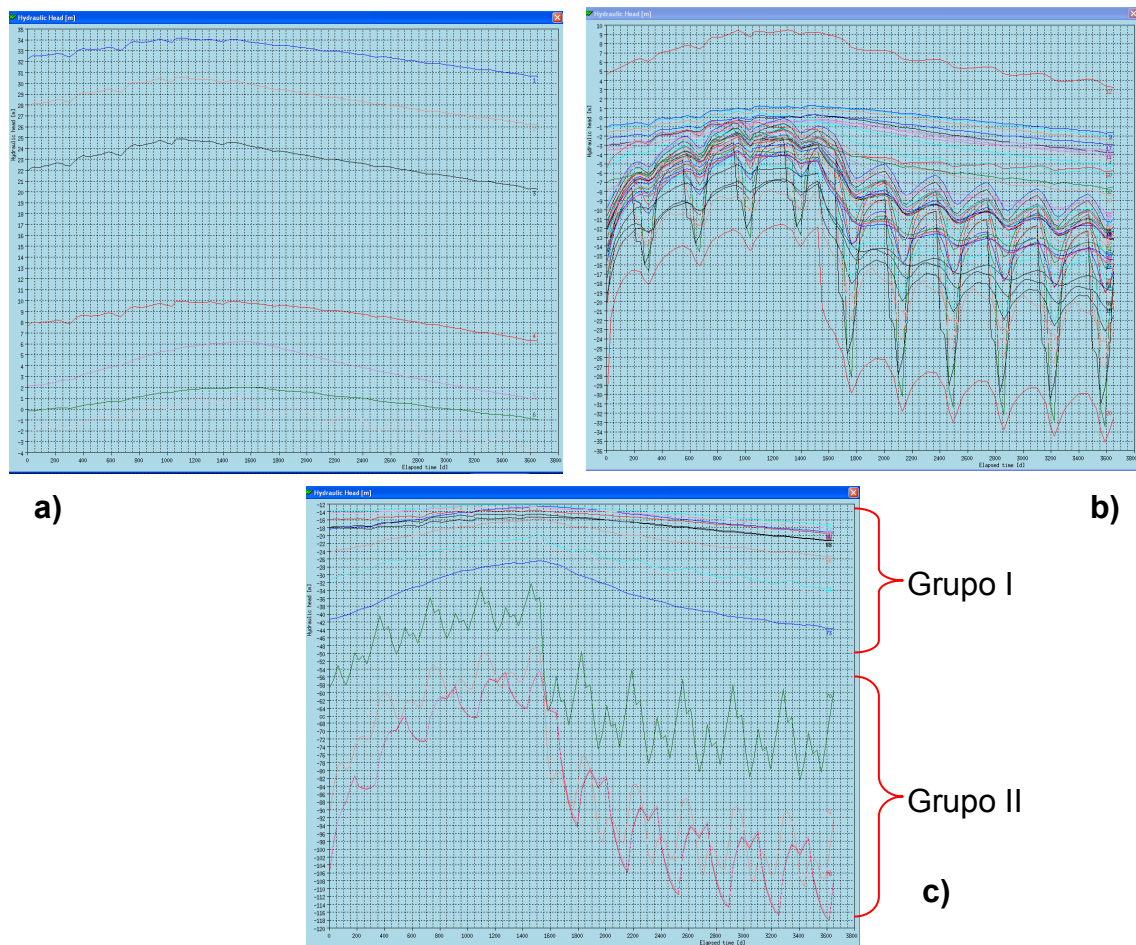


Figura 46. Niveles piezométricos simulados para el escenario II, desde octubre del 2000 a octubre del 2010. a) zona norte, b) zona central, c) zona sur

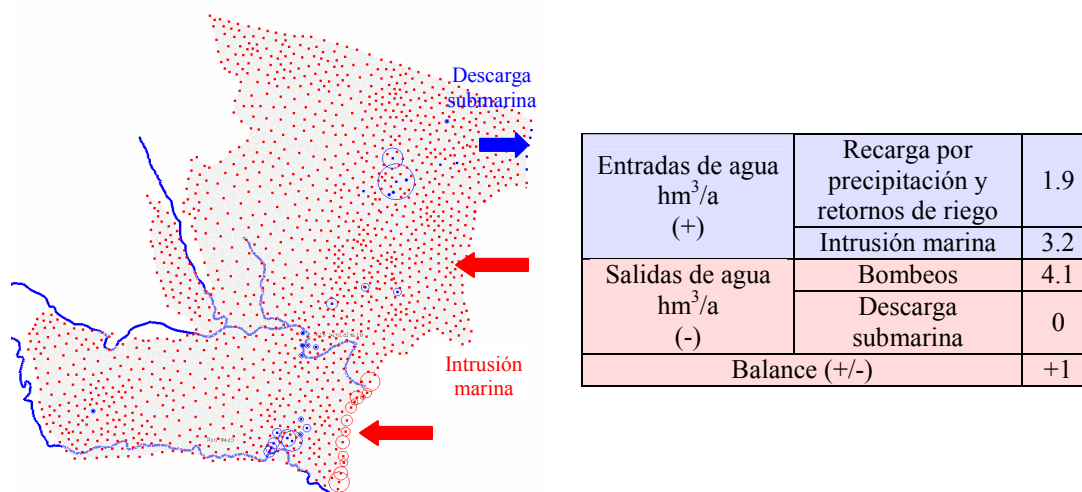


Figura 47. Balance hídrico obtenido para octubre del 2010 del escenario II.

5.4.1.3. Escenario III: Implantación de una planta desaladora (31.5 hm³/a), extracciones medias (3 hm³/a) y recarga media (2.6 hm³/a) para el periodo 2006-2010

En el escenario III para el periodo de 2006 al 2010, se desarrolla una propuesta de gestión recomendada por el Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) en el *“Informe final sobre los sondeos y pozos de investigación, par 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”*. (UPCT, 2002), la cual consiste en la construcción de 12 pozos de explotación que capten 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 estarán muy cerca del borde costero, a una distancia inferior a 100 m del mar y se extraerá un volumen total de agua salobre de 1000 l/s (31.5 hm³/a), ver figura 48.

La finalidad de esta propuesta, por parte de la UPCT es: 1) incrementar el recurso agua en la zona, mediante la desalación por osmosis inversa de los 31.5 hm³/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 entrante de agua salada.

Como parte de la simulación de este escenario II además de considerar la extracción de 31.5 hm³/a para abastecer a la desaladora, se consideró la extracción ya existente de 3 hm³/a y una recarga media estimada de 2.4 hm³/a.

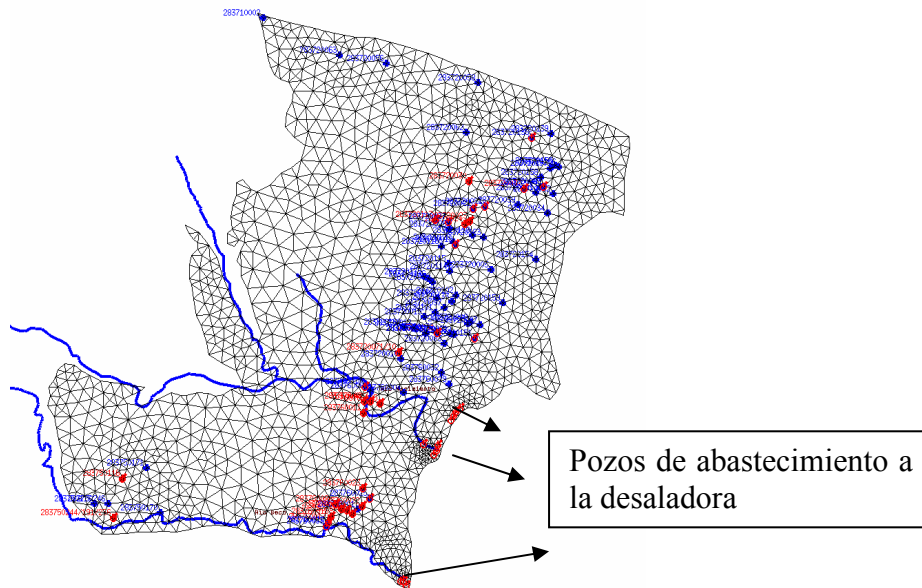


Figura 48. Ubicación de los sondeos que abastecerán la planta desaladora.

En la gráfica 50 se observa un ascenso de los niveles en los primeros años del 2000 al 2006 debido a que durante este periodo no se consideran los pozos de abastecimiento para la planta desaladora pero a partir del 2006 se observa que los niveles de agua en la zona norte y central se mantienen constantes o presentan una ligera disminución, mientras que el nivel piezométrico en la zona sur desciende considerablemente aproximadamente 40 m (figura 49). A pesar del incremento del bombeo no se observan descensos importantes en los sondeos de la zona norte y central, esto no indica que el sistema acuífero no está siendo afectado en estas zonas, sino que los niveles se mantienen constantes porque el agua dulce ha sido reemplazada por la gran entrada de agua del mar, como se puede ver en el balance hidrológico, la intrusión marina en el borde costero ha sido calculada en $33 \text{ hm}^3/\text{a}$ (figura 51), esto indica más de 10 veces la entrada de agua de mar obtenida bajo las peores condiciones de explotación y recarga (escenario II) (figura 47).

Este incremento importante de la componente de la intrusión marina se produce por la extracción de agua salobre en los 12 sondeos ubicados en la zona costera, los cuales extraen, principalmente, agua de mar, como se puede ver en el balance (figura 51). A pesar de que la entrada de agua de mar en este escenario sea mayor que en el escenario II (condiciones más desfavorables), esto no demuestra que produzca un mayor incremento de la salinidad del agua del acuífero para este caso; aunque esto solo podrá evaluarse de forma rigurosa con el modelo con densidad variable, donde se discutirá su repercusión en la calidad del agua (apartado 5.4.2.2).

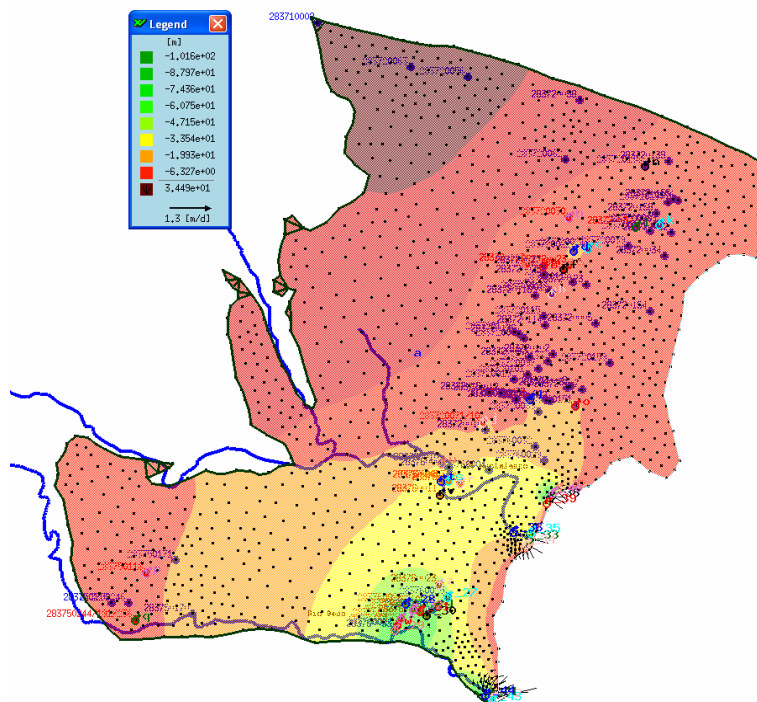


Figura 49. Niveles piezométricos simulados para el escenario III en octubre del 2010.

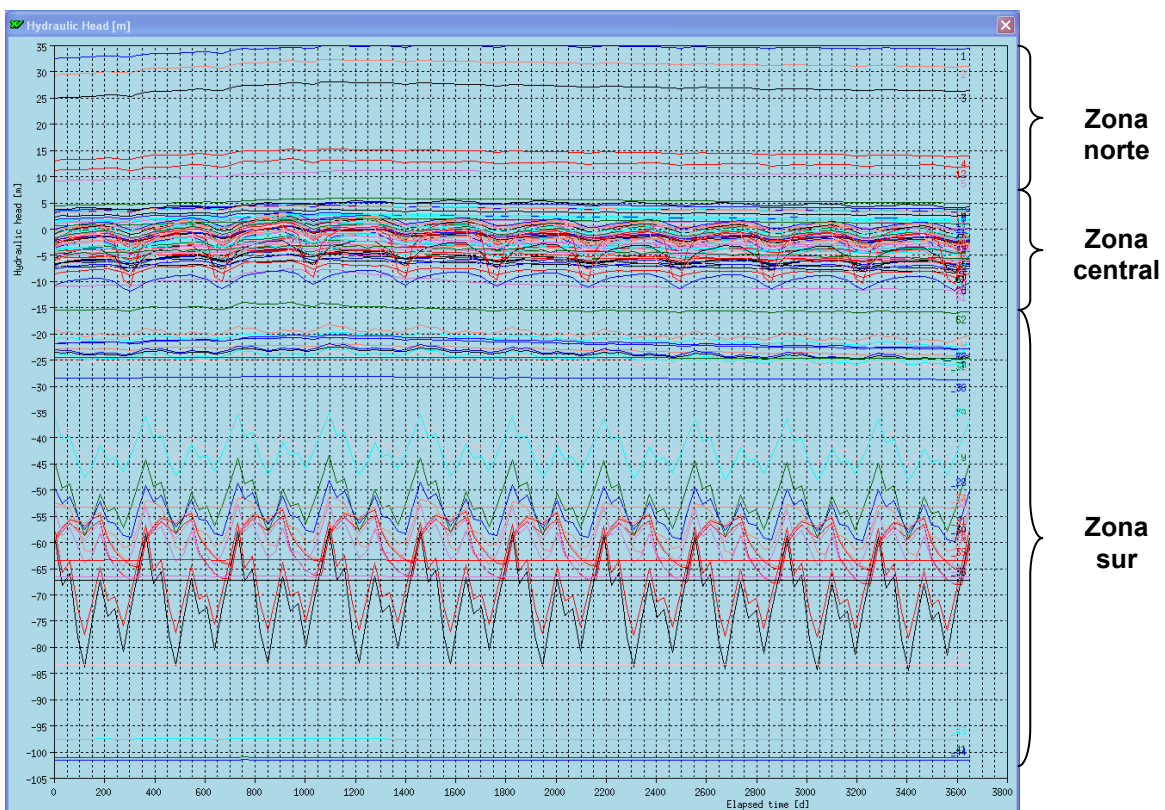


Figura 50. Niveles piezométricos simulados para el escenario III, desde octubre del 2000 a octubre del 2010.

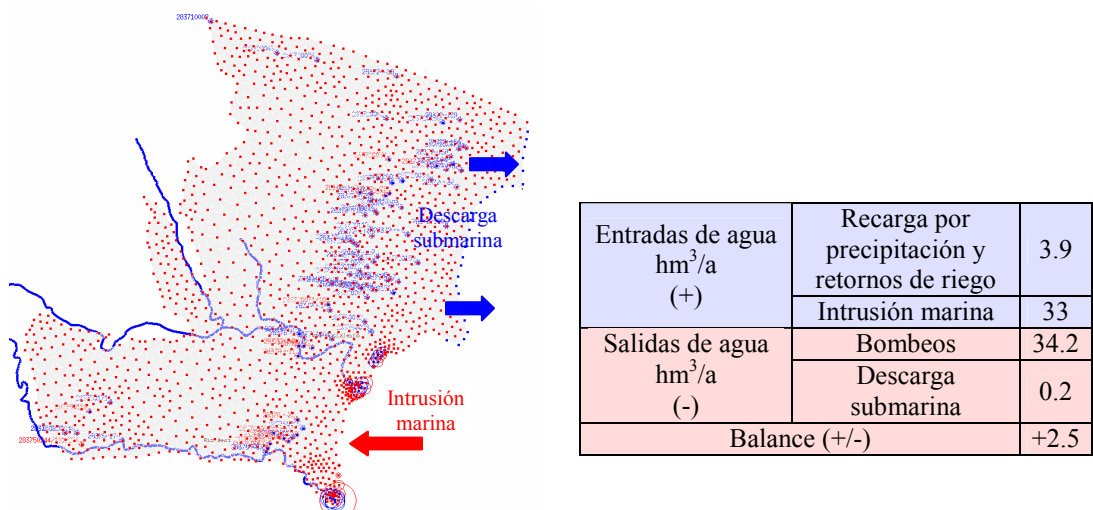


Figura 51. Balance hídrico obtenido para octubre del 2010 del escenario III.

5.4.2. Modelo de flujo y transporte en estado estacionario (densidad variable). Desarrollado para el dominio ampliado del acuífero (dominio terrestre y dominio marino del acuífero)

5.4.2.1. Escenario II: Extracciones máximas registradas (6 hm³/a) y recarga mínima

Este escenario consiste en simular las peores condiciones posibles a las que puede estar expuesto el sistema acuífero, para lo cual se emplearon valores bajos de recarga y el máximo bombeo registrado (6 hm³/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. Además, estos resultados se han contrastado con los del escenario II y el modelo de flujo con densidad constante en estado transitorio (presentados en 5.4.1.2).

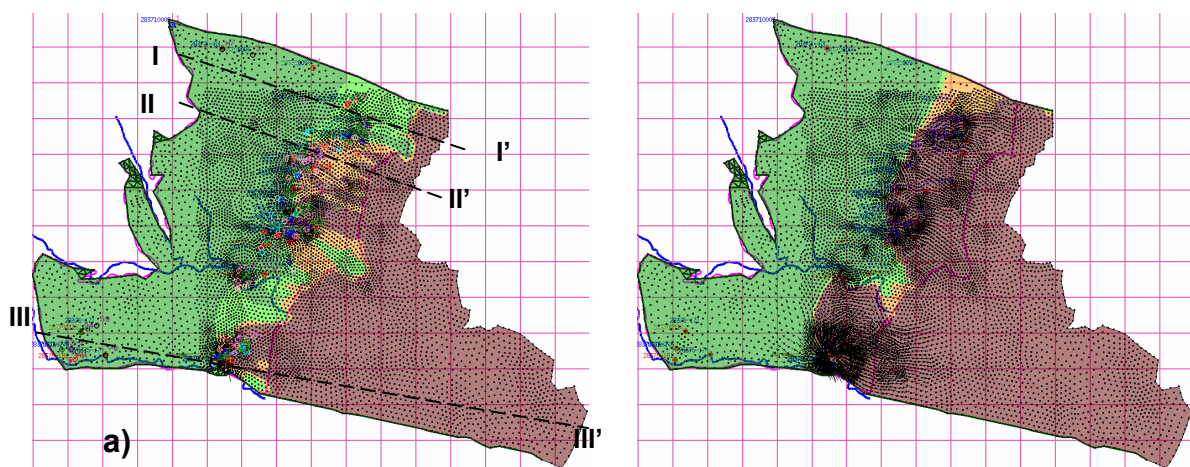


Figura 52. Simulación de la distribución de la salinidad en la capa confinante a) y en el muro b) de la capa acuífera para las condiciones del escenario II.

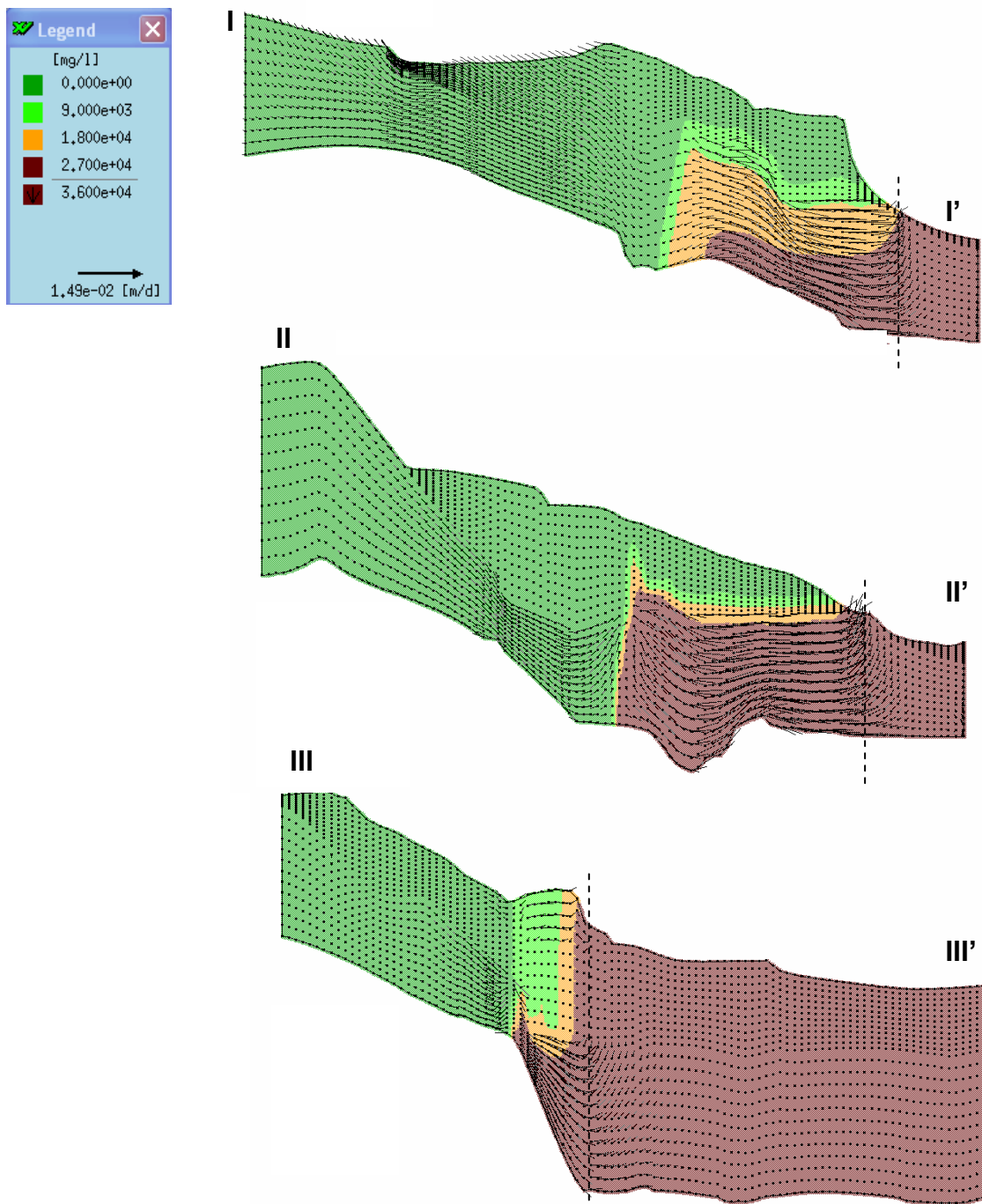


Figura 53. Comportamiento de la intrusión marina en la zona norte (corte I-I'), central (corte II-II') y sur (corte III-III') en las condiciones del escenario II.

En la figura 52 se puede observar la distribución de la salinidad en el muro de la capa confinante y en el muro del acuífero; estos resultados muestran un incremento general de la salinidad en todo el acuífero con referencia a las condiciones del 2001 (comparar con figura 29). Presentando un mayor avance de la cuña salina en la zona norte y central, mientras en la zona sur se produce un avance poco significativo; además la zona de mezcla presenta una disminución significativa en las zonas central y sur, mientras que en la zona norte se presenta un considerable aumento de dicha zona de mezcla (figura 53).

En el escenario II con el modelo de flujo con densidad constante en estado transitorio se presentó ya una disminución significativa de los niveles piezométricos en todas las zonas del acuífero, lo cual favorecerá el incremento de la salinidad debido a la intrusión marina, esto se pudo corroborar y precisar mediante este escenario con densidad variable.

Además se ha realizado el balance de agua para este escenario (figura 54), en el cual vemos que los valores anuales de la intrusión marina (28.6 hm³/a) y de la descarga submarina (24.5 hm³/a) son muy superiores a los obtenidos en el escenario II con densidad constante en transitorio y que las entradas de agua de mar se producen realmente a lo largo de toda la línea de costa, mientras que para el otro escenario (apartado 5.4.1.2) estas entradas solo se presentaban en la zona central y sur (figura 47).

Entradas de agua hm ³ /a (+)	Recarga por precipitación y retornos de riego	2.4
	Intrusión marina	28.6
Salidas de agua hm ³ /a (-)	Bombeos	6.2
	Descarga submarina	24.5
Balance (+/-)		0

Figura 54. Balance hídrico para el modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario para las condiciones del escenario II (dominio ampliado)

5.4.2.2. Escenario III: Implantación de una planta desaladora (31.5 hm³/a), extracciones medias (3 hm³/a) y recarga media (2.6 hm³/a)

Para este escenario se realizaron las siguientes consideraciones: una extracción de agua salobre de 31 hm³/a para abastecer a la desaladora, una extracción ya existente de 3 hm³/a y una recarga media estimada de 2.4 hm³/a. La descripción de este escenario puede ser revisada con más detalle en el apartado 5.4.1.3.

Los resultados de la simulación de este escenario serán contrastados con los resultados del escenario III del modelo de flujo con densidad constante (transitorio).

En la figura la 55a) podemos ver que este escenario provocaría un incremento de salinidad en el muro de la capa confinante en las zonas central y sur, encontrándose a menor profundidad el agua salada. En la figura 55 b) notamos un mayor avance de la cuña salina en las zonas norte y central, con respecto a las condiciones del 2001, mientras que la zona sur no presenta un avance significativo; además en las zonas central y sur se produce una disminución del espesor de la zona de mezcla, mientras que en la zona norte ocurre un aumento significativo de dicha zona de mezcla. Este aumento de la entrada de agua de mar en la zona norte y central se vio también reflejado en el escenario III del modelo de flujo en estado transitorio con densidad constante, donde se observó

que los niveles no disminuyen significativamente en estas zonas, como consecuencia del aporte externo del agua de mar (figura 50)

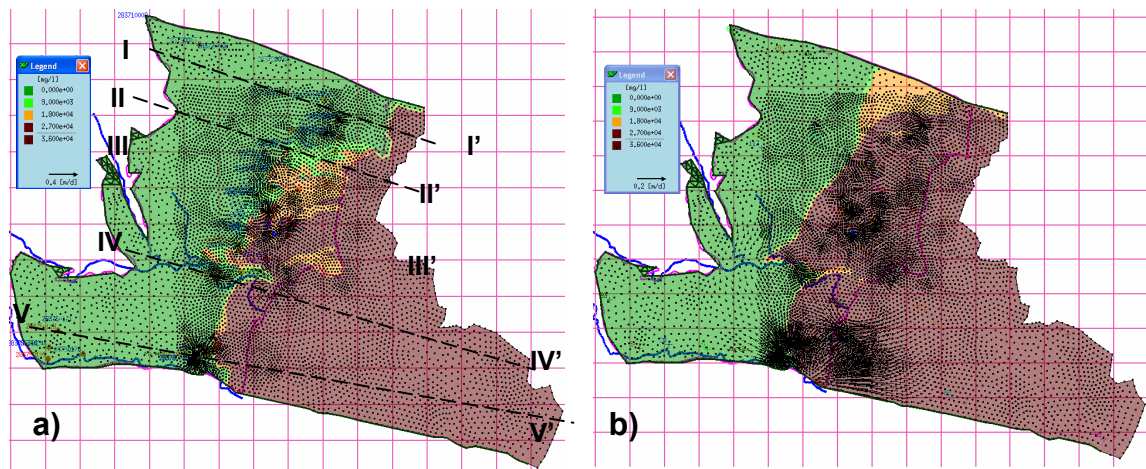


Figura 55. Simulación de la distribución de la salinidad en la capa confinante a) y en el muro b) de la capa acuífera para las condiciones del escenario III.

Para presentar en detalle la distribución vertical de la salinidad se han empleado cinco cortes (ver su localización en la figura 55 a) que permiten describir en cada zona del acuífero, la variabilidad de la cuña salina y de la zona de mezcla. En estas descripciones se considerará como agua dulce a valores menores a 1000 mg/l, agua salobre (zona de mezcla) a valores entre 1000 a 10000 mg/l TSD y agua salada a valores mayores de 10000 mg/l TSD.

En la zona norte bajo las condiciones del escenario III (figura 56) se produce un mayor avance de la cuña salina, más de 3500 m tierra adentro, es decir 2000 m más que en las condiciones medias del 2001, aumentando además de manera notable el espesor de la zona de mezcla.

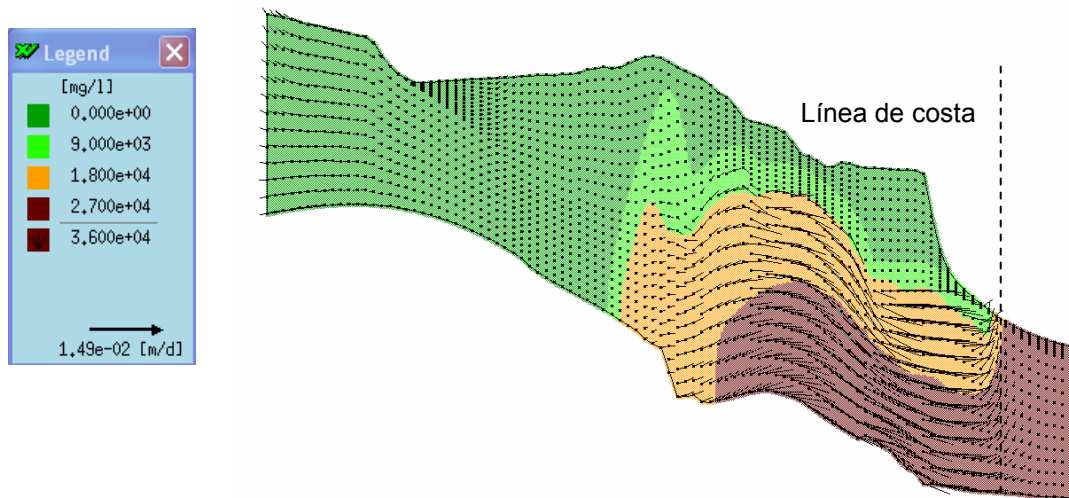


Figura 56. Comportamiento de la intrusión marina en la zona norte (corte I-I') en las condiciones del escenario III.

En los cortes de la zona central para este escenario, se observa que la cuña de intrusión marina se adentra unos 1000 a 1500 m más de la ubicación inicial del pie de la cuña, como consecuencia del aumento de las entradas de agua marina, provocando un aumento de la velocidad del flujo de entrada en la línea de costa, ver figuras 57 a 58. Además se observa el ascenso de la cuña salada, disminuyendo el espesor de la zona de mezcla en todo este sector central.

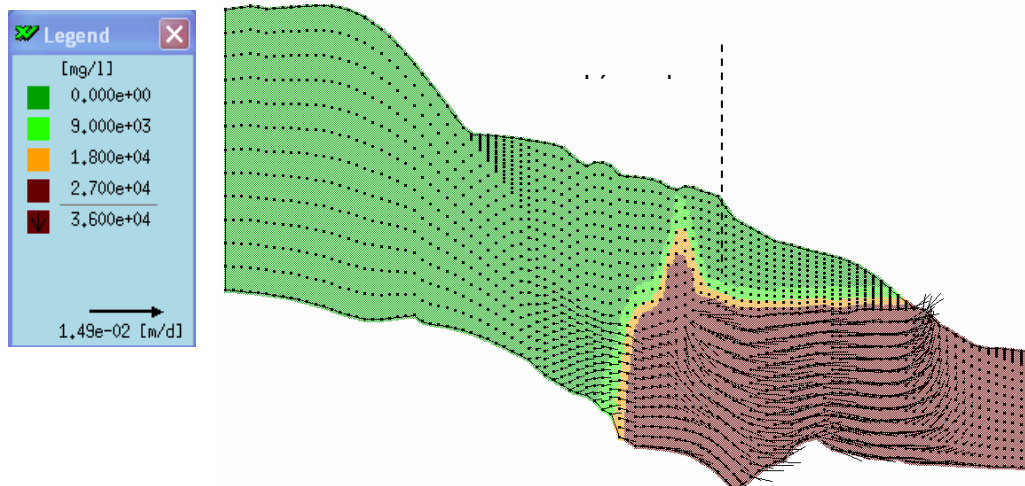


Figura 57. Comportamiento de la intrusión marina en la zona central (corte II-II') en las condiciones del escenario III.

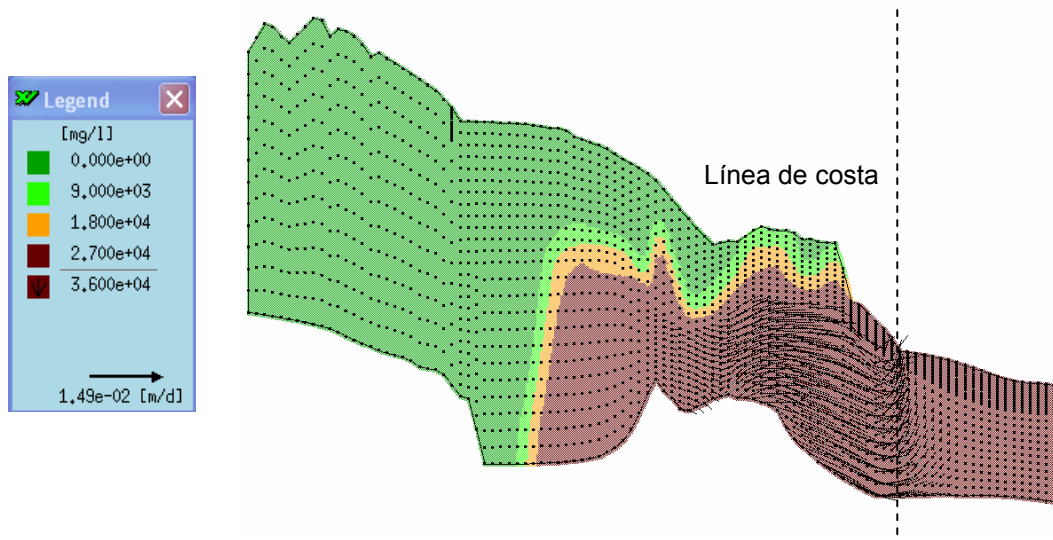


Figura 58. Comportamiento de la intrusión marina en la zona central (corte III-III') en las condiciones del escenario III.

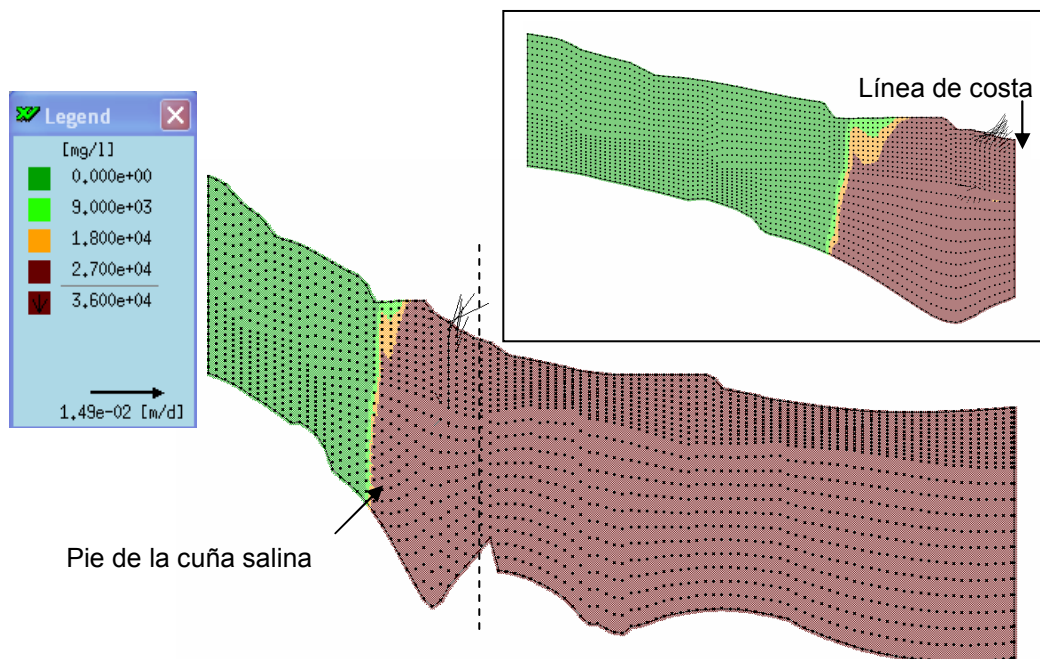


Figura 59. Comportamiento de la intrusión marina en la zona sur-río Nacimiento (corte IV-IV'). Escenario III.

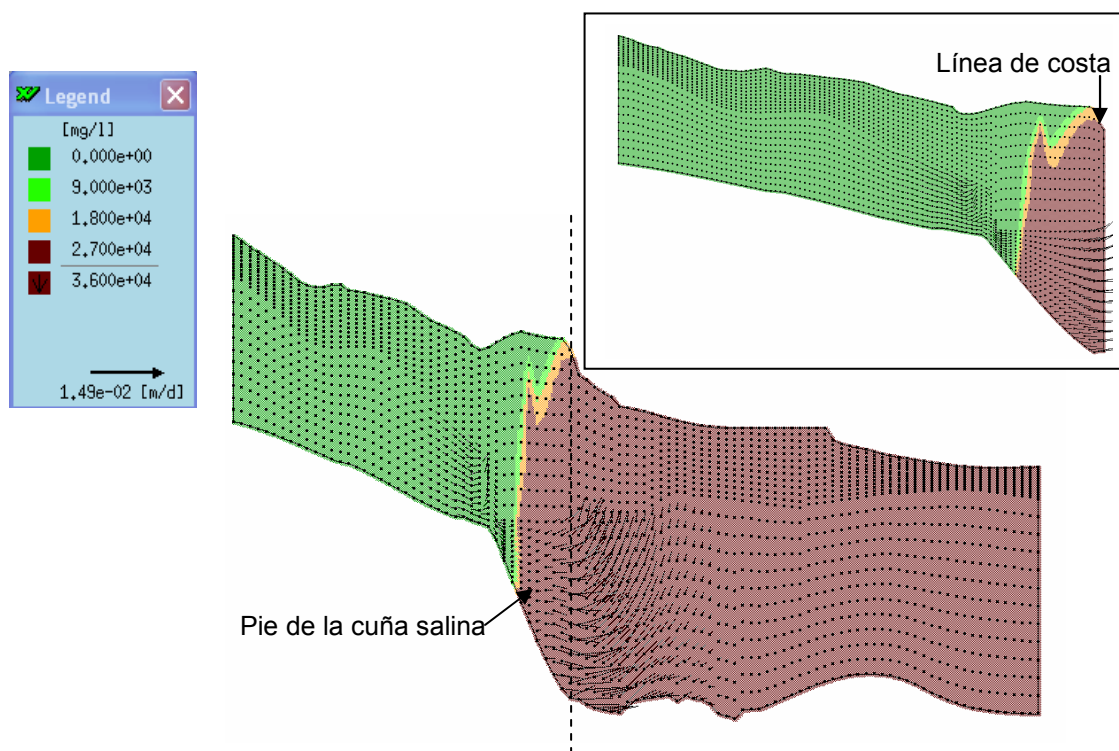


Figura 60. Comportamiento de la intrusión marina en la zona sur-río Seco (corte V-V'). Escenario III.

En las figuras 59 y 60 observamos el comportamiento de la cuña salina en la zona sur durante la simulación de este escenario, donde se puede apreciar la desaparición de la extensa zona de mezcla que existía entre río Nacimiento y río Seco, como consecuencia de los sondeos que abastecerían a la planta desaladora, los cuales estarían explotando agua salobre proveniente de dicha zona de mezcla, formada principalmente por agua de mar, pero también por agua dulce, producto de la circulación y la conexión hidráulica entre el agua dulce y salada en el acuífero; por lo cual la explotación de agua salada afectará también parcialmente al agua dulce. Para este caso, la cuña salina se encontraría a menor profundidad con relación a las condiciones del 2001, pero, a pesar de esto, no se puede apreciar un avance significativo del pie de la cuña salina en esta zona.

A continuación se discutirá y comparará la influencia de los escenarios II y III en la calidad del agua y en el avance de la intrusión marina; en el caso de que se llegue a incrementar el bombeo a $6 \text{ hm}^3/\text{a}$, como lo sucedió en 1989 (escenario II), y en el caso de ponerse en funcionamiento la captación de agua salobre en la zona costera sur para abastecer la planta desaladora (escenario III). Se puede observar que se provoca un avance de la interfaz agua dulce/agua salada y un comportamiento de la zona de mezcla, muy similar para ambos escenarios, lo cual nos hace pensar que la explotación de agua salobre se puede considerar como un recurso alternativo para el abastecimiento de agua en Cabo Roig, siempre que se consideren y valoren todas las repercusiones positivas y negativas en el sistema.

De manera general podemos decir que al ponerse en funcionamiento la desaladora se provocará un incremento de la salinidad del acuífero similar al producido al incrementar la explotación, como sucedió en años anteriores, pero con la ventaja de incrementar sustancialmente ($31.5 \text{ hm}^3/\text{a}$) los recursos disponibles para el abastecimiento de agua en la zona.

Antes de discutir sobre los efectos de la depresión por bombeo en el acuífero, comentaremos con más detalle en que consiste esta alternativa de gestión, la cual es considerada una medida de prevención y control de la intrusión marina, que consiste en la limitación de la penetración del agua salada estableciendo una línea de bombeo dentro de la cuña salina a lo largo de la costa, tal que intercepte todo el flujo de agua salada hacia el interior (UPCT, 2002). Para lo cual se plantea la construcción de 12 sondeos ubicados en la zona costera sur que tendrían como función extraer agua de la cuña salina y a su vez abastecerían a la planta desaladora. A continuación comentaremos algunas otras consideraciones deducidas del análisis de este escenario.

- Hay que tener en cuenta que la depresión por bombeo en la costa no disminuye, ni frena totalmente el proceso natural de intrusión marina existente; el avance de la cuña salina se incrementará con respecto a su situación inicial en el 2001, lo que se conseguirá es un avance hacia una nueva posición de equilibrio, consiguiendo tras ello estabilizar la cuña salina, lo cual quizá ayudará a proteger alguna de las zonas más interiores del acuífero.

- Es importante mencionar que existe la posibilidad tecnológica de combinar la depresión por bombeo en la costa con pozos de inyección que ayuden a incrementar la carga hidráulica del agua para ayudar a frenar el avance de la intrusión marina, de lo contrario, a largo plazo, lo que ocasionaríamos es una pérdida del agua dulce producto de la extracción de agua salobre.
- Esta alternativa presenta la ventaja de incrementar el recurso de manera sustancial para el abastecimiento de agua. Actualmente la cantidad de desaladoras en España es superior a 900, de las cuales el 50.9 % se abastecen de agua salobre y un 49,1 % de agua de mar (www.aedyr.com); en función de la salinidad del agua y la composición del agua (calidad química y bioquímica).
- Esta alternativa de gestión debe ir acompañada de un monitoreo frecuente de los sondeos de abastecimiento a la planta desaladora y de los sondeos ubicados dentro de la zona identificada como de máximo riesgo a la intrusión marina.

En el balance hídrico de la figura 61 vemos que en este escenario, la entrada de agua de mar ($70 \text{ hm}^3/\text{a}$) es significativamente superior a la entrada en el escenario II ($28.6 \text{ hm}^3/\text{a}$), sin embargo el incremento de la salinidad y el avance de la intrusión marina es muy similar para ambos escenarios. Este aumento de la componente de la intrusión marina en el escenario III con respecto al escenario II, también se vio reflejado en los balances de agua del modelo de flujo en transitorio, como consecuencia de la extracción en la cuña salina de los pozos de captación de la desaladora, pero hasta este momento no se podía determinar con precisión cual sería su repercusión en la salinidad del agua.

Entradas de agua hm^3/a (+)	Recarga por precipitación y retornos de riego	2.4
	Intrusión marina	70
Salidas de agua hm^3/a (-)	Bombeos	34
	Descarga submarina	38.6
Balance (+/-)		0

Figura 61. Balance hídrico para el modelo de flujo con densidad variable en estado estacionario para las condiciones del escenario III (dominio ampliado)

5.4.3. Comparación entre los balances de agua de los distintos escenarios desarrollados

Por último se resume en la tabla 11 los principales resultados de los balances hídricos obtenidos para los distintos escenarios planteados, en ella podemos ver y comparar con más claridad la influencia de las diferentes condiciones de recarga y bombeo en la cuantificación de la intrusión salina y la descarga submarina de agua subterránea.

En los escenarios II y II del modelo con densidad variable (estacionario), la estimación de los valores de la intrusión marina y la descarga submarina son mayores que los obtenidos en los escenarios del modelo con densidad constante (transitorio). Esto se debe a que el primero incluye hipótesis más realistas, donde se considera la influencia de la densidad en el movimiento del agua y la influencia de los flujos entrantes y salientes a través de la conexión submarina del acuífero con el mar.

Para el modelo con densidad constante en régimen transitorio, se ha simulado 3 posibles escenarios, a pesar de que estos modelos presenten una subestimación de los valores reales de la intrusión marina y descarga submarina, han sido necesarios para tener una primera valoración de la influencia de dichos escenarios.

En el escenario III observamos un incremento significativo de las componentes de la intrusión marina y la descarga submarina, con respecto al escenario II, sin embargo el comportamiento y avance de la cuña salina es similar para ambos escenarios, lo cual pudo determinarse con precisión a través del modelo con densidad variable.

		ESCENARIOS				
Balance hídrico		Escenario I + Modelo Transitorio con densidad constante Dominio terrestre del acuifero	Escenario II + Modelo Transitorio con densidad constante Dominio terrestre del acuifero	Escenario III + Modelo Transitorio con densidad constante Dominio terrestre del acuifero	Escenario II + Modelo Estacionario con densidad variable Dominio terrestre y marino del acuifero	Escenario III + Modelo Estacionario con densidad variable Dominio terrestre y marino del acuifero
Entradas de agua (+) hm³/a	Recarga por precipitación y retornos de riego	3.9	1.9	3.9	2.4	2.4
	Intrusión marina	1.2	3.2	33	28.6	70
Salidas de agua (+) hm³/a	Bombeos	2	4.1	34.2	6.2	34
	Descarga submarina	0.2	0	0.2	24.5	38.6
Balance (+/-)		+ 2.9	+1	+2.5	0	0

Tabla 11. Balances de agua de los distintos escenarios analizados para el acuífero de Cabo Roig.

6. CONCLUSIONES Y DISCUSION

- Para la calibración del modelo de flujo subterráneo con densidad variable en estado estacionario (condiciones medias del año 2001), se utilizaron 67 puntos de medición de nivel piezométrico y 37 registros de salinidad. Los valores de piezometría obtenidos en este modelo presentan una buena coherencia con los valores medidos medios en el 2001. La distribución de los valores simulados de la salinidad tanto en superficie como en profundidad, han presentado un buen ajuste, consiguiéndose representar adecuadamente la posición variable de la interfaz agua dulce/ agua salada en las tres zonas del acuífero (norte, central y sur).
- La calibración de los valores de salinidad presentó una mayor dificultad, debido fundamentalmente a la mayor sensibilidad del problema de transporte, y a algunos parámetros hidrogeológicos y geométricos como: la distribución de los valores de permeabilidad, recarga, dispersividades, forma del muro del acuífero y del fondo marino, etc.
- En todos los casos, los modelos con densidad constante subestiman los volúmenes de agua de intrusión marina y de descarga submarina. Esto se debe básicamente a que los modelos con densidad variable son más realistas al considerar que el movimiento del líquido, no solo se produce por el gradiente piezométrico, sino también por un gradiente de concentraciones. Es por esto, que si observamos los balances hídricos con densidad variable se considera una nueva componente producida por las fuerzas de flotabilidad del agua dulce sobre el agua salada, como efecto de la densidad, incrementándose así el flujo de entrada (intrusión marina) y salida del sistema hidrogeológico (descarga submarina de agua subterránea).
- El modelo con densidad variable del dominio terrestre del acuífero, presenta unos valores inferiores, de intrusión marina y de descarga submarina, con respecto al modelo con densidad variable del dominio ampliado del acuífero. Esto se produce al considerar la continuidad del estrato acuífero en el ambiente marino y a que en algunas zonas del acuífero el contacto agua dulce/ agua salada se produce mar adentro (zona sur entre río Nacimiento y río Seco); por todo lo cual fue imprescindible incluir en el modelo el dominio marino, definido a partir de la batimetría de la zona, para reproducir la entrada de agua de mar y la descarga submarina a través del fondo marino.
- En el balance hídrico del modelo con densidad variable para el dominio ampliado del acuífero (condiciones medias del 2001), tenemos que el caudal de la intrusión marina es de $31,8 \text{ hm}^3/\text{a}$ ($87123 \text{ m}^3/\text{d}$) y el de la descarga submarina de agua subterránea es de $31,1 \text{ hm}^3/\text{a}$ ($85205 \text{ m}^3/\text{d}$). Donde el mayor porcentaje de intrusión marina y de descarga submarina de agua subterránea se produce en la zona sur, para mantener el equilibrio

hidrodinámico como efecto de la continuidad de la capa acuífera en la zona marina. La cuantificación de estas componentes del balance ha sido importante, dado que los registros actuales muestran valores bajos de salinidad en la zona sur (río Seco), lo cual podría hacer pensar que no existen entradas significativas de agua de mar en la zona. Sin embargo, esta presencia significativa de la entrada de agua de mar en la zona sur queda evidenciada en los registros del 2001, 2003 y 2004 en río Nacimiento (figura 53), donde se observa un incremento de la salinidad.

- Para este trabajo ha sido muy importante la caracterización y topografía del fondo marino costero para el establecimiento del modelo tridimensional de la intrusión marina del acuífero de Cabo Roig, debido a que al incluir el fondo marino en el modelo se mejoró de manera considerable el resultado de la simulación de la distribución de la salinidad.
- Si realizamos una comparación del avance de la intrusión marina, entre los escenarios II y III, se puede observar que existe un avance de la interfaz agua dulce/agua salada y un comportamiento de la zona de mezcla, muy similar para ambos escenarios, lo cual nos hace pensar que la explotación de agua salobre por depresión por bombeo se puede considerar como un recurso alternativo para el abastecimiento de agua en Cabo Roig, siempre que se considere y valore las otras repercusiones positivas y negativas en el sistema (ver pag. 64 y 65).

De manera general podemos decir que al ponerse en funcionamiento la desaladora (escenario III) se provocará un incremento de la salinidad similar al incrementarse la explotación ($6 \text{ hm}^3/\text{a}$), como sucedió en años anteriores (escenario II), con la ventaja de incrementar sustancialmente los recursos para el abastecimiento de agua ($31.5 \text{ hm}^3/\text{a}$). Si bien es cierto que actualmente existe una explotación de solo $3 \text{ hm}^3/\text{a}$, pero hay que considerar que las extracciones de agua subterránea son muy difíciles de controlar y son muy variables con el tiempo, ya que están supeditadas a las necesidades de los distintos sectores, por lo cual si se incrementase la explotación a $6 \text{ hm}^3/\text{a}$, como lo sucedido en 1989 (escenario II), se produciría un similar deterioro de la calidad de agua a la que se realizaría al bombear para la desaladora, con la diferencia que el recurso extraído sería mucho menor.

- Hay que tener claro que la depresión por bombeo no disminuye, ni frena, el progreso natural de la intrusión marina existente; el avance de la cuña salina se incrementará con respecto a su situación inicial en el 2001; lo que si se conseguirá a largo plazo es estabilizar la cuña salina hasta un punto donde no existirá un mayor progreso tierra adentro, lo cual ayudará a proteger las zonas mas interiores del acuífero. Además, esta alternativa de gestión podría ir acompañada con pozos de inyección y con un control frecuente de los sondeos de abastecimiento a la planta desaladora y de los sondeos ubicados dentro de la zona identificada de mayor riesgo a la intrusión marina.

- A pesar de la recuperación actual (2001) de los niveles piezométricos en la zona central con relación a los niveles de agua en 1989, no ha existido una recuperación de la calidad de su agua, resultando ser el sector más afectado por la intrusión marina, por lo cual muchos sondeos han sido abandonados. Estos resultados son coherentes con el modelo, porque el retroceso de la cuña salina es muy difícil que se de bajo condiciones de recarga natural tan bajas como las existentes en esta zona. Además, la zona sur en el 2001 ha presentado una disminución importante del nivel piezométrico con respecto a los datos de 1989, por la intensa explotación que se da actualmente.
- Es importante señalar algunas de las limitaciones encontradas en el proceso de modelización, por ejemplo: los modelos con densidad variable son más complejos de desarrollar, porque tienen más posibles errores numéricos asociados que los modelos con densidad constante; algunas simplificaciones y asunciones pueden no ser completamente válidas, como, por ejemplo, la definición del modelo geológico y conceptual en la zona sur oeste, la heterogeneidad del medio con relación a la distribución de los parámetros, las condiciones de contorno y las condiciones iniciales empleadas, etc. Por último, mientras no se tenga finalizado el modelo con densidad variable en estado transitorio, no se podrá predecir con fiabilidad la evolución en el tiempo de la intrusión marina.
- La realización de este modelo ha servido también para identificar ciertas inconsistencias en los resultados de la simulación, lo cual nos ha ayudado a detectar las limitaciones antes comentadas, a partir de las cuales surgieron algunas interrogantes que deberán ser analizadas en un futuro próximo, como:

¿Los valores estimados de intrusión salina y descarga submarina presentan una buena aproximación con los valores reales de estas componentes?

A pesar de que se obtuvo una buena representación de niveles y salinidad en el ajuste del modelo, es importante también poder contrastar estos resultados con otros métodos de estimación que cuantifiquen dichas componentes, por lo cual se proseguirá en la validación de este modelo.

¿De dónde proviene el agua que explotan los sondeos ubicados en la zona sur oeste?

En relación a los 3 nuevos sondeos realizados en la zona sur oeste, se pudo comprobar que el estrato acuífero está desaturado en dicha zona y que el agua extraída en aquella zona no proviene del acuífero del Plioceno, por lo cual los sondeos de la zona sur oeste no han sido incluidos en la calibración.

El agua extraída en esta zona proviene principalmente del acuífero inferior del Messiniense (Andaluciense), esto explica la existencia de pozos

profundos en la zona, donde la profundidad del pozo es mucho mayor que la profundidad del muro del acuífero del Plioceno. Existen otros aportes secundarios de agua, provenientes de entradas laterales del nivel acuífero superior del Plioceno, además se plantea la siguiente hipótesis:

Probablemente no existe una completa desconexión hidráulica con los acuíferos adyacentes, esta duda surge porque esta zona coincide con el área cercana al anticlinal de Los Gracias de Abajo y las Casas de Río Seco, el cual se comportaría en principio como un umbral hidrogeológico, pero esto está en discusión, debido a que por la desaturación del acuífero del Plioceno, se pudo ocasionar un cambio en la dirección del flujo, permitiendo la entrada de agua del Campo de Cartagena.

- Hasta el momento la principal aplicación del modelo desarrollado ha sido reproducir las condiciones de piezometría y salinidad para las condiciones medias del año 2001, sin embargo a partir de la calibración de este modelo se pueden reproducir diversos escenarios de recarga y bombeo para ver su influencia en los niveles y la calidad del agua, lo cual ayudará a una mejora en la utilización de los bombeos y en el planteamiento de medidas preventivas y correctivas.

7. REFERENCIAS

- Agencia catalana del agua, Cataluña, 11/12/06, http://mediambient.gencat.net/aca/es//actuacions/dessalinitzadores/motivacio_rep/ercusio_dessalinitzadora.jsp
- Annandale JG., Jovanovic NZ., Hodgson FDI., Usher BH., Aken ME., Bristow KL., Steyn JM. (2006). Prediction of the environmental impact and sustainability of large-scale irrigation with gypsiferous mine-water on groundwater resources. Water SA Vol. 32 , ISSN 0378-4738
- Asociación Española de Desalación y Reutilización, Madrid, 11/12/06, <http://www.aedyr.com>.
- Barron, O. (2006). Desalination options and their possible implementation in Western Australia. Scientific reports CSIRO.
- 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 Torre Vieja y del acuífero 07.31.145 Cabo Roig.
- Diersch, H. J. (2002). FEFLOW User's manual versión 5.0. WASY Institute for water resources planning and systems research Ltd. Berlin.
- Dimakis P., Colleuille H., Wong W.K., (2005). Pollution Impacts on Norwegian Groundwater Bodies. NVE report 3-2005.

- Faye, S., Niang-Diop, I., Cisse-Faye, S., Evans, D.G., Pfister, M., Maloszewski, P., Seiler, K.P. (2001). Seawater intrusion in the Dakar (Senegal) confined aquifer: calibration and testing of a 3D finite element model. In : Seiler, K.P. and Wohnlich, S. (eds) "New Approaches Characterizing Groundwater Flow. Proceedings of the XXXI IAH Congress, Munich, 10-14 sept. 2001", A.A.Balkema, Lisse/Abingdon, Vol. 2, 1183-1186.
- Gingerich, S.; Voss C. (2002). Three-dimensional variable density flow simulation of a coastal aquifer in southern Oahu, Hawaii, USA. 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2004). Estimación de la recarga en el acuífero de Cabo Roig (Alicante). Informe del centro de documentación del IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2003). Actualización del Conocimiento hidrogeológico en el acuífero de Cabo Roig con vistas a la realización de un modelo matemático de densidad variable. Informe del centro de documentación del IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España. (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.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2000). Cartografía de Cultivos y áreas urbanas correspondientes a los acuíferos del Terciario de Torrevieja y Cabo Roig (Alicante) mediante técnicas de teledetección.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1990 a). Estudio de la intrusión marina en acuíferos costeros de Murcia y Alicante. Informe del centro de documentación del IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1990 b). Mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes. Escala 1:200.000, Murcia.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1977). Mapa Geológico de España, hoja 935, Torrevieja. Escala 1:50.000.
- Kessels W, Kaiser R, Graesle W (2004) Hydraulic Test Interpretation with Pressure Dependent Permeability - Results from the Continental Deep Crystalline Drilling in Germany. 2nd Intl Symp Dynamics of Fluids in Fractured Rock, Berkeley
- Kohout, F. A. (1960). Cyclic flow of salt water in the Biscayne aquifer of southeast Florida, J. Geophys. Res., 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. and Cheng T.S. (1974). On seawater encroachment in coastal aquifers, Water Resour. Res., 10, 1039-1043.
- Paniconi, C.; Khlaifi, I.; Lecca, G.; Giacomelli, A. and Tarhouni, J. (2001). Modeling and analysis of seawater intrusion in the coastal aquifer of eastern Cap-Bon, Tunisia. Transport in porous media 43:3-28. Kluwer academic publishers.

- 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.
- Qahman, K. and Larabi, A. (2006). Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the Gaza aquifer (Palestine). *Hydrogeology journal* 14:713-728. DOI 10.1007/s10040-005-003-2.
- 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. Y García Vera, M.A. (1999): Manual del usuario del programa Visual BALAN v.1.0. ENRESA. Madrid.
- Sarwar, A. (1999). Development of a conjunctive use model, an integrated approach of surface and groundwater modelling using a GIS. Phd-thesis, University of Bonn, Germany, 135 pp.
- Smith, A. J. (2004). Mixed convection and density-dependent seawater circulation in coastal aquifers. *Water Resources Res.*, 40.W08309, doi:10.1029/2003WR002977.
- Smith, A. J. and Turner J.V. (2001).Density-dependent surface water-groundwater interaction and nutrient discharge in the Swan-Canning Estuary, *Hydrol. Processes*, 15, 2595-2616.
- Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. (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).
- Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. (2002). Informe final sobre los sondeos y pozos de investigación, par 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".
- Wilson, A. (2005) Fresh and saline groundwater discharge to the ocean: A regional perspective. *Water Resources Research*, 41.W02016, doi:10.1029/2004WR003399.
- Zhang, Q.; Volker, R. and Lockington, D. (2004). Numerical investigation of seawater intrusion at gooburrum, Bundaberg, Queensland, Australia. *Hydrogeology journal* 12:674-687. DOI 10.1007/s10040-004-0333-5.

ANEXO I: UBICACIÓN DE LOS SONDEOS Y ASIGNACIÓN DEL ID PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO DE FLUJO EN ESTADO TRANSITORIO.

ID	N° de registro	Coordenadas			Zona del acuífero
		X	Y	Z	
11	283710002	694863	4205895	69	Norte
12	283720063	696434	4204973	49	Norte
13	283720056	697314	4204816	46	Norte
14	283720058	699036	4204456	30	Norte
15	283720062	698821	4203521	64	Norte
16	283720139	700397	4203497	38	Norte
17	283720138	700042	4203438	51	Norte
21	283720155	700475	4202900	38	Norte
22	283720156	700550	4202880	36	Norte
23	283720157	700394	4202850	33	Central
24	283720158	700211	4202679	41	Central
25	283720141	697444	4202522	69	Central
26	283720089	700257	4202516	38	Central
27	283720088	700195	4202504	38	Central
28	283720090	700195	4202504	35	Central
29	283720091	700115	4202404	35	Central
210	283720092	700447	4202380	32	Central
211	283720039	699781	4202174	40	Central
212	283720021	699160	4202136	49	Central
213	283720022	698948	4202109	50	Central
214	283720034	700343	4202015	30	Central
215	283720027	698478	4201856	51	Central
216	283720025	698490	4201722	52	Central
217	283720118	698927	4201603	38	Central
218	283720123	699136	4201562	37	Central
219	283720128	698565	4201466	41	Central
220	283720019	698607	4201426	48	Central
221	283720116	698344	4201387	50	Central
222	283720154	700117	4201144	20	Central
223	283720115	698482	4201066	49	Central
224	283720005	699281	4200956	24	Central
225	283720114	698500	4200926	46	Central
226	283720135	698029	4200819	60	Central
227	283720136	698101	4200790	56	Central
228	283720099	698178	4200718	45	Central
229	283720102	698622	4200476	41	Central
230	283720085	698360	4200431	43	Central
231	283720087	698260	4200426	46	Central
232	283720133	698545	4200364	40	Central

233	283720159	699497	4200338	22	Central
234	283720097	698401	4200246	40	Central
235	283720130	698605	4200170	29	Central
236	283720101	698234	4200157	45	Central
237	283720015	698026	4200076	51	Central
238	283720093	699135	4200004	28	Central
239	283720009	698892	4199969	25	Central
240	283720008	698842	4199948	23	Central
241	283720007	699072	4199917	24	Central
242	283720160	697642	4199881	61	Central
243	283720012	697830	4199864	56	Central
244	283720076	698243	4199791	50	Central
245	283720013	698056	4199771	50	Central
246	283720072	698061	4199760	50	Central
247	283720081	698518	4199748	41	Central
248	283720082	698581	4199739	41	Central
249	283720151	698973	4199674	36	Central
250	283720083	698398	4199566	44	Central
251	283720071	697551	4199413	61	Central
252	283720010	697584	4199294	62	Central
253	283720002	699126	4199198	29	Central
254	283760032	698351	4199029	43	Central
255	283760029	698486	4198812	40	Central
31	283760010	696910	4198776	20	Sur-río Nacimiento
32	283760009	697020	4198700	20	Sur-río Nacimiento
33	283760004	697645	4198660	17	Sur-río Nacimiento
34	283760006	697402	4198484	20	Sur-río Nacimiento
35	283750178	693632	4197866	101	Sur-oeste
36	283750171	692824	4197251	95	Sur-oeste
37	283750190	692172	4196914	95	Sur-oeste
38	283760025	697006	4196674	22	Sur-este
39	283750246	692102	4196580	76	Sur-oeste
310	283750116	691837	4196578	86	Sur-oeste
311	283750181	695160	4196515	38	Sur-este
312	283760001	696780	4196475	25	Sur-este
313	283750170	693081	4196412	50	Sur-oeste
314	283760016	696211	4196186	20	Sur-este
315	283760033	696191	4196166	19	Sur-este