

Modelación numérica de los acuíferos potencialmente afectados por la rotura de la balsa de Aznalcóllar

Coordinador: Jesús Carrera

Autores: O. Bernet⁽¹⁾, J. Bolzicco⁽¹⁾, J. Carrera⁽¹⁾, A. Castro⁽¹⁾, M. Jaén⁽¹⁾, F. Padilla⁽²⁾, J. M. Salvany⁽¹⁾, E. Vázquez-Suñé⁽¹⁾ y M. Vázquez⁽³⁾

(1) Grupo de Hidrología Subterránea Unidad Asociada al CSIC, Dept. Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, c/ Jordi Girona, 1-3, Edif. D-2, 08034 Barcelona.

(2) ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de La Coruña, Campus de Elviña, 15192 La Coruña.

(3) Instituto Geológico y Minero de España, Plaza de España s/n, 41013 Sevilla.

RESUMEN

Se han realizado varios modelos numéricos con el fin de probar conjeturas o integrar los datos que se han ido recogiendo en relación con los trabajos hidrogeológicos asociados a la rotura de la balsa de residuos mineros. Las escalas de los modelos son muy variables y abarcan desde los 30 cm de las columnas de laboratorio hasta los casi 100 km del acuífero regional. En este capítulo se recogen cuatro modelos. El mayor es el del acuífero de Almonte-Marismas, que ha permitido representar con gran precisión el funcionamiento del acuífero durante 30 años. Los resultados confirman que la posible contaminación quedará en todo caso confinada al acuífero aluvial del Guadiamar y que sólo puede descargar al sector del acuífero Almonte-Marismas confinado bajo las marismas. Por ello, se ha simulado en detalle la conexión entre estos dos acuíferos, mediante un modelo 3D que incorpora la geología con un gran nivel de detalle. Este segundo modelo muestra que, suponiendo que la contaminación llegue a la zona de las marismas, el tiempo de tránsito hasta los pozos de bombeo no será inferior a cuatro años. Se ha realizado un modelo detallado del balance de masas y de la interacción entre río y acuífero que ha permitido obtener un balance de masas global de la cuenca del Guadiamar y que pone de manifiesto la intensa interacción entre río y acuífero. Este hecho también se ha detectado en el modelo de detalle del aluvial del Agrío, donde el río es drenante. En este tramo, la mayor parte del flujo tiene lugar a través de la terraza central (T1), lo que apoya la construcción de la barrera reactiva en esta zona.

Palabras clave: Modelación, Acuífero aluvial, Acuífero regional, Flujo, Transporte.

Numerical modelling of the aquifers that might be affected by the tailings accident of Aznalcóllar

ABSTRACT

Several models have been prepared to test hypotheses and integrate data collected in various groundwater flow and contamination survey associated with the tailings accident of Aznalcóllar. These models range in scale from 30 cm (laboratory column experiments) to nearly 100 km (regional flow modeling). Four models are summarized in this chapter. The largest one is that of the Almonte-Marismas aquifer. It has allowed us to simulate rather accurately the last 30 years of aquifer evolution. Results are consistent with the hypothesis that pollution will remain confined within the Guadiamar aquifer and discharge to the river or to the Almonte-Marismas sands under the marismas. This motivated the need for a detailed 3D model of the connection between these two aquifers. This second model shows that it will take at least four years for a hypothetical conservative pollutant that enters groundwater of the Marismas to reach production wells. A detailed model of mass balance and aquifer-river interaction has been prepared. Results show that this interaction is indeed intense. Such is also the case in the Agrío alluvial aquifer, which is the subject of the fourth model. Most of the groundwater flow in this area takes place through the central portion of the alluvial deposits. This motivated the location of the reactive barrier that is discussed in next chapter.

Key words: Modelling, Alluvial aquifer, Regional aquifer, Flow, Transport, Doñana, Guadiamar.

INTRODUCCIÓN

J. Carrera

En el contexto del seguimiento del accidente de la presa de lodos mineros de Aznalcóllar se han realizado numerosos estudios hidrogeológicos. Una característica común a los que se presentan en este capítulo ha sido su naturaleza esencialmente cuantitativa. Se ha modelado el flujo desde la escala regional, en la que el modelo tiene una dimensión próxima a los 10 000 km², hasta una escala de pocos centenares de metros de cara a la modelación de los efectos hidrogeológicos de una barrera geoquímica. Incluso se ha modelado el transporte reactivo a las escalas de dicha barrera (1 m) y de las columnas de labora-

torio (30 cm). Todos ellos se han realizado con el objetivo de integrar datos y probar conjeturas sobre el funcionamiento hidrogeológico. Sin embargo, su diversidad hace difícil una síntesis. Por ello, en este capítulo sólo se presenta un resumen de cada uno de ellos, cuyos dominios vienen representados en la Figura 9.1

La gran escala queda representada por el modelo regional de flujo de las unidades Almonte-Marismas, Aljarafe y aluvial del río Guadamar (A en Fig. 9.1). El objetivo de este modelo ha sido actualizar el conocimiento de este acuífero, integrando los datos más recientes, de cara a identificar qué zonas podrían llegar a recibir contaminación y definir condiciones de contorno para los

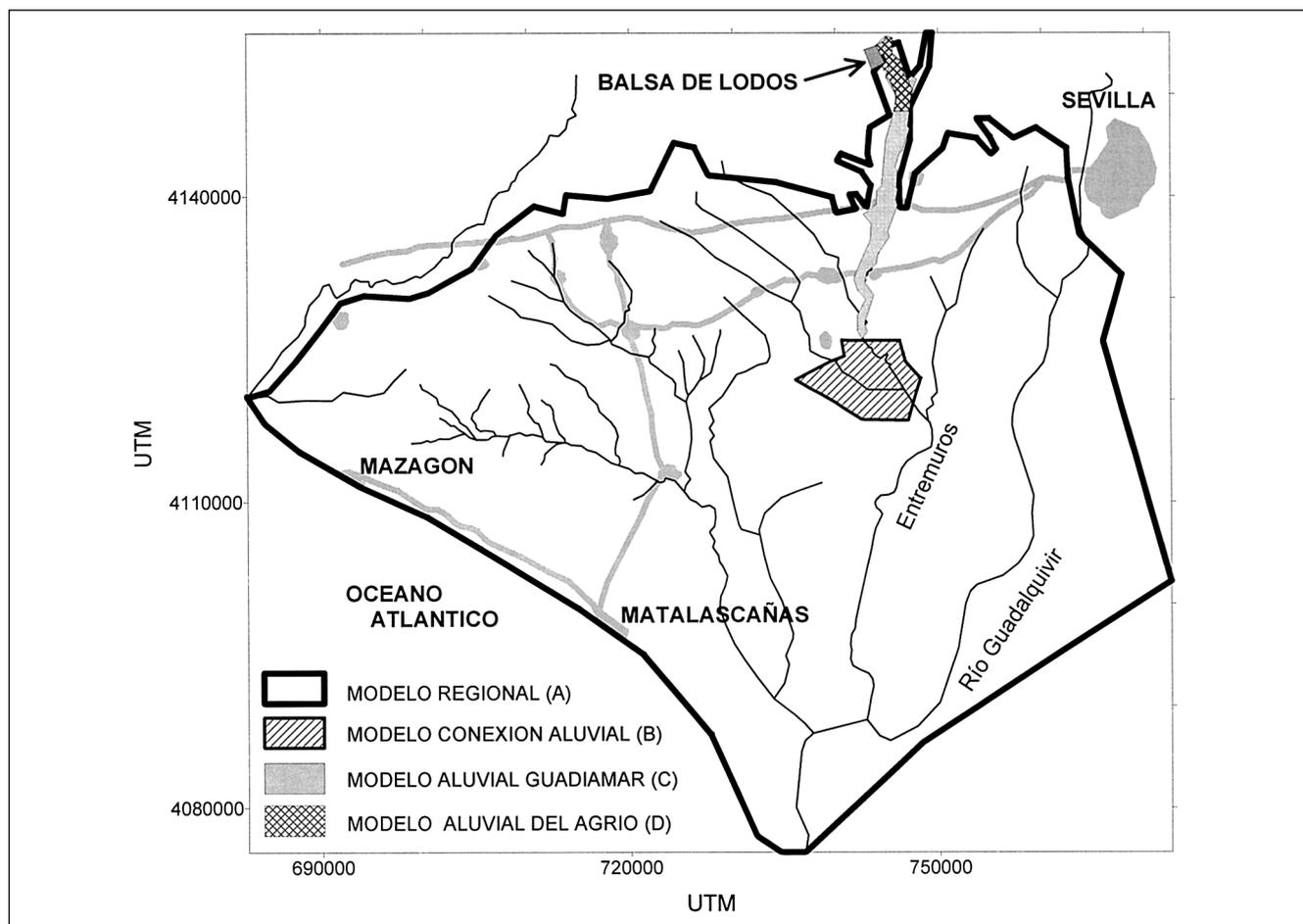


Fig 9.1. Dominios de los cuatro modelos numéricos que se presentan en este capítulo: A) modelo regional, unidades Almonte-Marismas-Aljarafe y aluvial del Guadamar; B) zona de conexión del acuífero aluvial del río Guadamar con el de Almonte-Marismas; C) acuífero aluvial del río Guadamar; D) acuífero aluvial del río Agrio.

modelos del aluvial del Guadiamar. Como consecuencia de este primer modelo se concluyó que, si bien la contaminación del acuífero aluvial del Guadiamar quedaría confinada hidráulicamente en el mismo, podría existir un flujo importante de esta contaminación hacia el acuífero Almonte-Marismas subyacente.

El segundo modelo que se presenta en este capítulo abarca la zona de contacto del acuífero aluvial del Guadiamar con el de Almonte-Marismas. Este modelo local ha permitido acotar los tiempos de tránsito de una posible contaminación desde el acuífero aluvial hasta los pozos de riego que extraen el agua del acuífero Almonte-Marismas.

En tercer lugar se presenta el modelo del acuífero aluvial del Guadiamar, cuyo principal objetivo ha sido determinar la interacción entre río y acuífero y su cuantificación.

Por último se presenta el modelo local del acuífero aluvial del río Agrío, donde la contaminación ha sido más importante y donde se ubica el proyecto de la barrera hidrogeológica.

Debe decirse que todos estos modelos se hicieron en momentos distintos y representan la conceptualización del sistema en dichos momentos. La información posterior y el conocimiento que se ha ido adquiriendo a medida que se realizaron los trabajos han permitido validar, a veces, o falsear, otras veces, dichos modelos, pero en general han permitido ir mejorando el modelo conceptual de funcionamiento de los acuíferos que se ha presentado en el Capítulo 4.

9.1. Modelo regional de la unidad Almonte-Marismas

E. Vázquez-Suñe, A. Castro, M. Jaén, J. Carrera, J. M. Salvany y M. Vázquez

Dominio del modelo

Este modelo abarca una amplia extensión (Fig. 9.1, A), que va desde la balsa de lodos mineros de Aznalcóllar, al Norte, hasta el océano Atlántico, al Sur, y desde el Guadalquivir, al Este, hasta las poblaciones de Moguer y Palos, al

Oeste. El modelo integra conjuntamente los acuíferos Almonte-Marismas, Aljarafe y Abalarío, así como los acuíferos aluviales, en especial el del Guadiamar.

Desde un punto de vista geológico, los acuíferos Almonte-Marismas y Aljarafe corresponden a las formaciones plio-cuaternarias Limos Basales y Arenas Basales (ver Capítulo 3), que forman una alternancia de capas de limos, arenas y gravas, de hasta 150 m de potencia, con un buzamiento hacia el Sur de 3 a 4 grados. El acuífero del Abalarío equivale a una formación de gravas y arenas fluviales y eólicas cuaternarias (dunas y manto eólico), con una potencia de hasta 100 m, desarrollada en la franja litoral, que recubre parte de las Arenas Basales. Los acuíferos aluviales están formados por las terrazas cuaternarias de los ríos asociados. Se componen de capas de cantos y gravas de hasta 20 m de potencia, discordantes sobre los Limos y Arenas Basales. En el sector oriental del acuífero, las marismas del Guadalquivir constituyen una potente y uniforme formación arcillosa, también cuaternaria, de hasta 70 m de potencia, que se extiende por el SE de la zona modelada. Recubre a las Arenas Basales y, a su vez, en la franja litoral es recubierta por las arenas eólicas. Este conjunto sedimentario queda limitado a muro por una formación margosa-limosa continua, de características mal conocidas, que se extiende hasta las Margas Azules miocenas, que afloran en el margen septentrional del modelo.

Modelo conceptual

Este acuífero ha sido estudiado extensamente (ITGE, 1992, Custodio y Palancar, 1994, Salvany y Custodio, 1995, De Haro et al., 1998, Manzano et al., 1991, Iglesias et al., 1996, 1998 y 1999, Trick, 1998). Lo que sigue es una síntesis de todos estos trabajos. Las características más relevantes del modelo conceptual son las siguientes:

- (1) Se trata de un sistema sedimentario complejo, formado por capas de arenas, limos y gravas, con diferentes grados de permeabilidad. Hidráulicamente puede definirse como un acuífero libre en el sector norte y confinado por la marisma en el sector SE. El substrato de baja conductividad hidráulica, y a efectos prácticos

impermeable, lo constituyen las margas basales (formación margosa-limosa de tránsito a las Margas Azules).

- (2) Los ríos actúan como elementos drenantes de los acuíferos, condicionando fuertemente la piezometría (Figura 9.2), sobre todo en el sector norte donde muestran un fuerte encajamiento, y en la zona del arroyo de La Rocina y de los ecotonos de La Vera y La Retuerta.
- (3) La recarga se produce en los sectores donde el acuífero se comporta como libre, es decir, en los Limos y Arenas Basales del norte, y en el manto eólico por el sur y sudoeste. Las descargas se producen a los ríos y arroyos, por extracciones, por flujo vertical hacia la marisma, salidas por los ecotonos y salidas al mar.
- (4) La evolución de las extracciones a partir de la segunda mitad de la década de los 70 ha ido causando un sistemático descenso de los niveles con la aparición de conos de bombeo considerables. Esto ha motivado el desecamiento del ecotono Norte y la inversión del flujo en las zonas de marisma expuestas a este efecto (en condiciones naturales el flujo sería ascendente).
- (5) El tipo de datos piezométricos de que se dispone no ha facilitado un tratamiento tridimensional del modelo a nivel general ya que muchas de las medidas piezométricas corresponden a pozos ranurados en todos los tramos permeables, lo cual no permite hacer consideraciones sobre los flujos verticales. Por ello se decidió hacer un modelo bidimensional, aunque bicapa en la zona de El Abalarío, dada la estructura geológica, la disponibilidad de datos de los acuíferos y la existencia de modelos numéricos previos (Ponceta, 1993). En esta zona, existen varios paquetes de limos que separan un acuífero freático de otro confinado. Se han llegado a medir diferencias de nivel del orden de uno a varios metros (Trick, 1998).

Discretización espacial y parametrización

Para la confección de este modelo de elementos finitos se ha usado el programa TRANSIN III

(Galarza et al., 1996). Para ello se ha dividido la superficie del dominio en 1804 nudos y 3671 elementos triangulares. Estos elementos son más pequeños, del orden de 300 m de lado, en la zona de contacto entre el río Guadamar y las marismas, con el fin de acotar una zona con un margen de error moderado, ya que los resultados en esta zona se han utilizado como condiciones de contorno para el modelo de detalle 3D que se presenta en el próximo apartado. El tamaño de los elementos es mayor hacia el oeste (área de Moguer, Palos), llegándose a unos 3000 m. En la zona de El Abalarío, donde el modelo se ha hecho bicapa, cada capa corresponde a un acuífero y los elementos unidimensionales que las unen corresponden a un acuitardo.

Como tiempo inicial se ha tomado 1970, ya que en esa época empieza a disponerse de una buena red de medidas piezométricas en todo el dominio modelado y la explotación en los acuíferos es muy incipiente, por lo que puede asumirse que la superficie piezométrica corresponde prácticamente a la situación natural. La elevada cantidad de medidas piezométricas que el IGME ha puesto a nuestra disposición (más de 65 000 en unos 350 pozos) ha permitido realizar una discretización temporal con tiempos de observación mensuales y tiempos de cálculo semanales. Se inicia en enero de 1970 y finaliza en diciembre de 1997.

En el contexto del programa TRANSIN III, la variabilidad espacial de un determinado parámetro hidrogeológico P_i se introduce dividiendo el área del modelo en subdominios llamados zonas. El parámetro físico P_i , que en general se considera variable en el espacio y el tiempo, se expresa como:

$$P_i(\underline{x}, t) = P_z \cdot f_e(\underline{x}) \cdot f_z(t)$$

donde P_z es un parámetro de zona a estimar (normalmente asociado a formaciones geológicas); $f_e(\underline{x})$ es un coeficiente de elemento (o de nudo) que permite representar la variabilidad conocida y $f_z(t)$ es una función de tiempo.

En el modelo se han utilizado cuatro funciones de tiempo para la recarga, calculadas mediante un balance de agua en el suelo para las cuatro formaciones geológicas básicas: Limos Basales, Arenas Basales, manto eólico y depósitos aluvia-

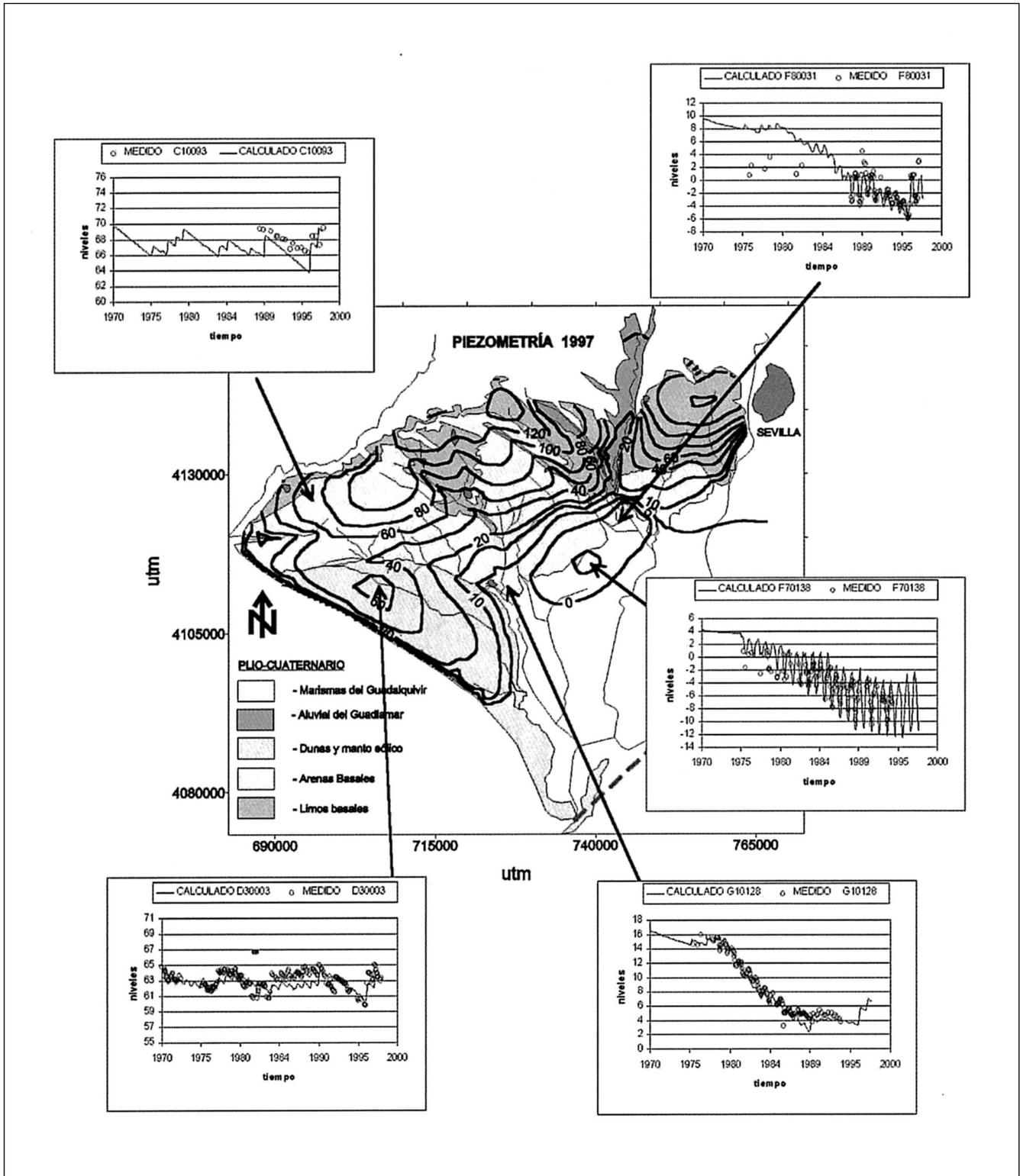


Fig 9.2. Niveles piezométricos medios calculados en los tres acuíferos del modelo regional, junto con hidrogramas (medidos y calculados) en algunos puntos. Obsérvese que los ríos van encajados. Se observa claramente las fluctuaciones anuales y un incremento del descenso acumulado interanual desde comienzos de la década de 1980.

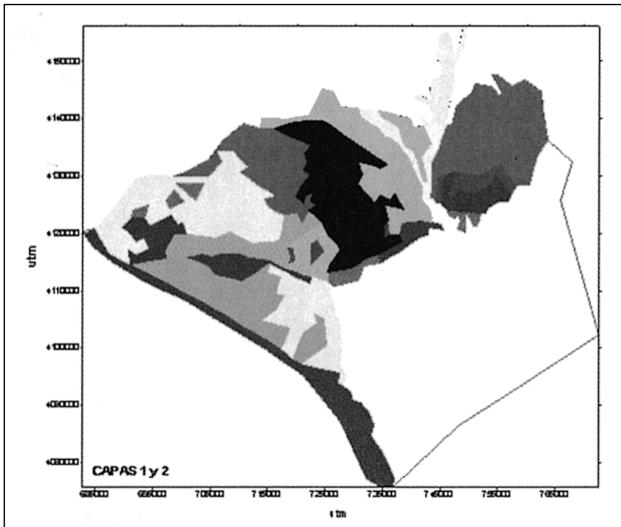


Fig 9.3. Zonas de recarga del modelo regional. La recarga es homogénea en cada zona, aunque variable en el tiempo. La geometría de las zonas se ha seleccionado en función de la geología y los usos del suelo.

les. Estas cuatro funciones de tiempo se asignaron a las 25 zonas de recarga (Figura 9.3) condicionadas por la propia formación geológica y los diferentes usos del suelo. Las particularidades de cada zona han venido dadas por el factor multiplicador P_z , a calibrar.

Las extracciones han recibido un tratamiento similar. La zonificación (Figura 9.4) se ha hecho de acuerdo a la información previa. En algunos casos se conocía el caudal medio extraído en toda un área y en otros se conocía explícitamente la localización y el caudal de las extracciones. En el primer caso la extracción se ha asignado de forma areal (distribuida), mientras que en el segundo caso la extracción se ha asignado de forma puntual.

Resultados de la modelación

a) Parámetros calculados

El programa TRANSIN III resuelve el problema inverso con calibración automática de los parámetros basándose en el ajuste de los hidrogramas de niveles observados y en la estimación previa del valor del parámetro. En la Figura 9.5 se

presentan los valores de transmisividad calculados por el programa y su estimación previa. A pesar de algunas diferencias es innegable la coherencia general de los parámetros, sobre todo teniendo en cuenta que se trata de un modelo de magnitud regional, donde se están promediando características generales de las unidades. Con todo ello, hay que destacar que la distribución de zonas de transmisividad, su número y densidad obedecen de forma muy ajustada a los datos previos. Lo mismo se puede decir de los valores previos y calibrados referentes al coeficiente de almacenamiento.

b) Niveles

Los niveles calculados se muestran en la Figura 9.2. En la Figura 9.6 se presenta el mapa de errores medios (diferencia entre nivel medido y calculado) del modelo. Ambas figuras ponen de manifiesto que en general el ajuste es bueno en el área de interés potencialmente afectada por el vertido minero (contacto del aluvial del Guadiamar con la marisma) y en las zonas de El Abalarío y de regadíos.

c) Recarga y extracciones

El balance de masas se muestra en la Figura 9.7. La recarga media en el período de calibración es de 87 mm/año, algo inferior al valor resultante de los balances hidrometeorológicos (entre 100 y 120 mm/año). Sin embargo, hay variaciones espaciales importantes. La recarga media calculada es de 154 mm/año en las arenas eólicas del Abalarío. En el acuífero aluvial del Guadiamar se ha estimado una recarga de 113 mm/año. En la zona norte, donde afloran los Limos Basales, la recarga calculada ha sido de unos 34 mm/año, y donde afloran las Arenas Basales la recarga calculada ha sido de 64 mm/año. Este último valor parece algo bajo comparado con el resto y puede reflejar las incertidumbres respecto a las extracciones. Es decir, es posible que se haya ignorado o infravalorado alguna extracción y que el modelo reaccione reduciendo la recarga en la zona. De hecho, el bombeo total se supuso inicialmente de 37 hm³/año y se ha aumentado a 60 hm³/año durante la calibración. Otros estudios confirman este aumento.

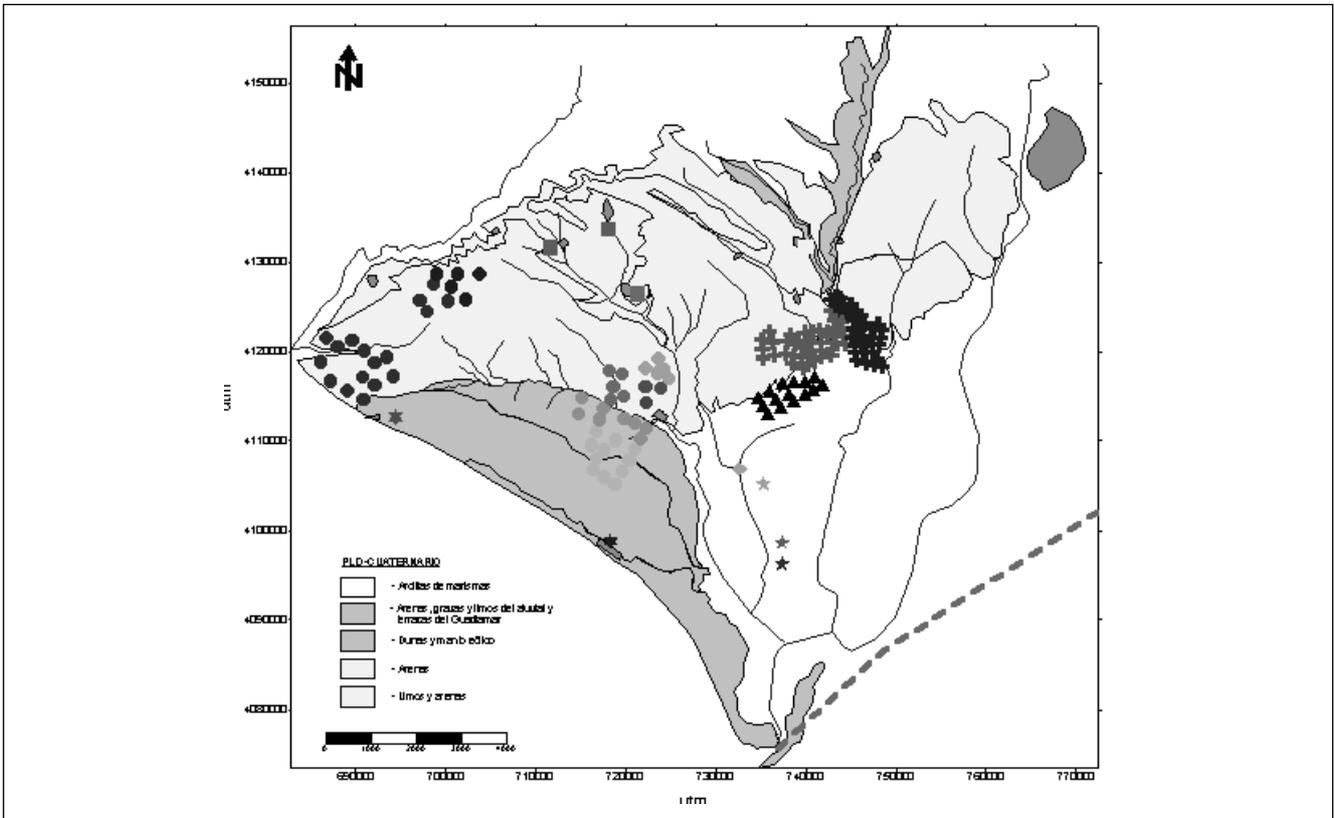


Fig 9.4. Áreas de extracción del modelo regional. Cada símbolo representa un nudo en el que se simula una extracción. Las extracciones están agrupadas en áreas con regímenes de bombeo similares (cada símbolo representa una de éstas agrupaciones).

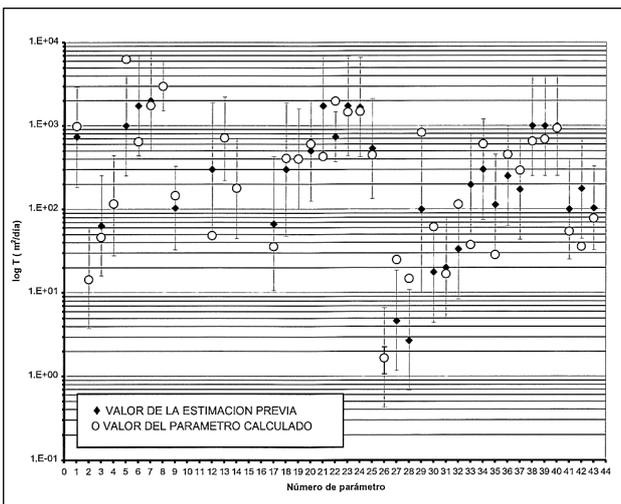


Fig 9.5. Comparación entre los valores de T (transmisividad) del modelo regional calibrados y la información previa. La coherencia es buena (los valores calculados tienden a quedar dentro del intervalo de confianza de la estimación previa). Los valores más altos de transmisividad corresponden a zonas de marisma. Los valores más bajos corresponden a los niveles de limos y arcillas de las marismas y El Abalarío.

Conclusiones

Se ha logrado ajustar bien tanto la variación espacial como la temporal de niveles, habiéndose conseguido este objetivo con parámetros coherentes con las características hidrogeológicas de las formaciones y ajustados a la información previa. Todo ello valida el modelo conceptual existente.

La calibración de los parámetros del modelo y el ajuste de niveles mejora aumentando y extendiendo en el tiempo el caudal de algunas extracciones. Como conclusión de lo expuesto, se puede decir que la calibración del modelo mediante el problema inverso ha permitido la detección de errores en los datos de partida, sobre todo en la infravaloración de los caudales de explotación de los acuíferos y de la estimación de la magnitud de ese error.

A lo largo de los casi 30 años modelados se ha

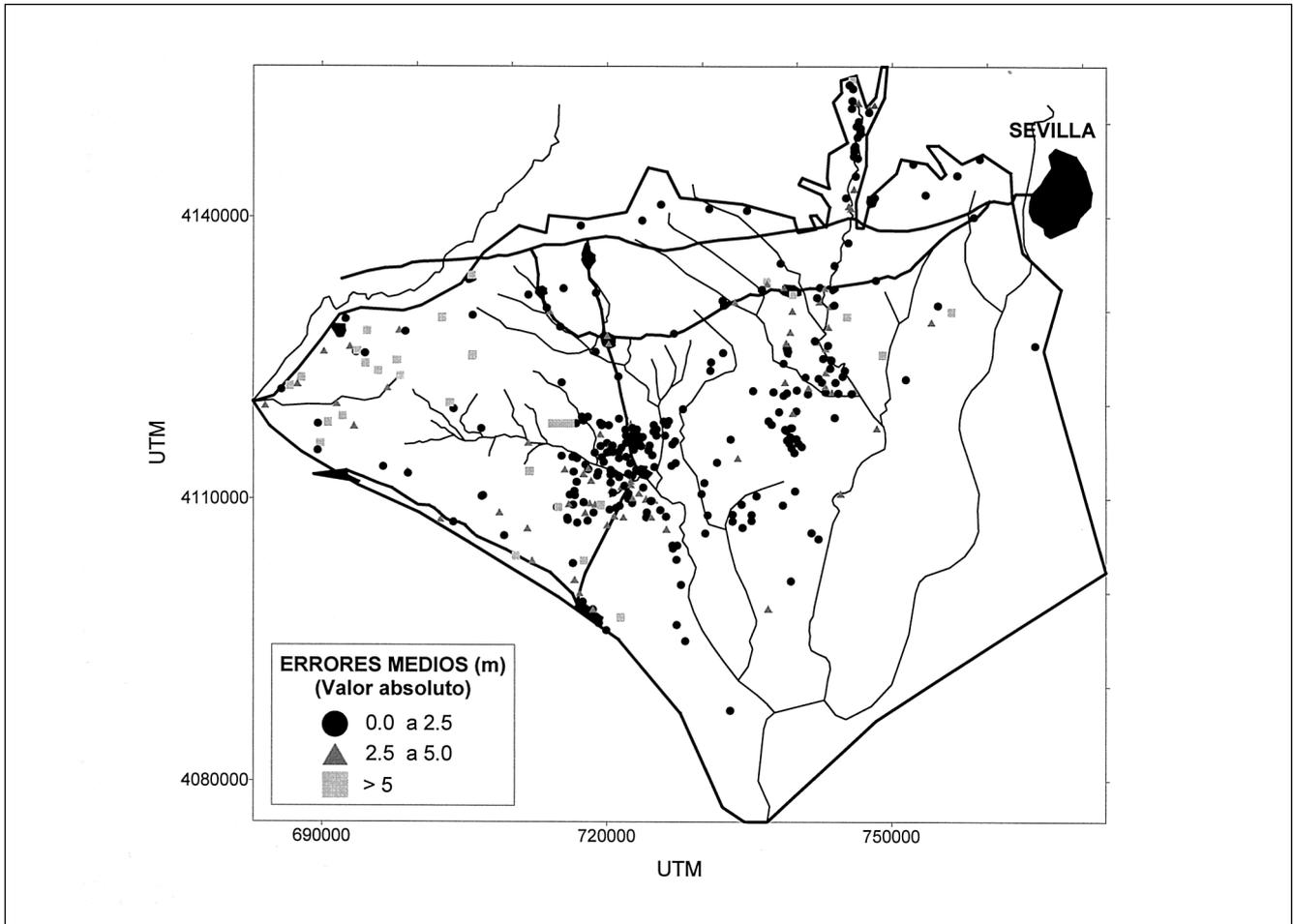


Fig 9.6. Mapa de errores medios de la calibración de niveles en el modelo regional. Obsérvese que, en la zona de interés, la mayoría son menores de 2,5 m que puede considerarse pequeño para un modelo de estas características.

calculado una clara disminución del almacenamiento en los acuíferos debido básicamente a las extracciones de aguas subterráneas.

9.2. Modelo de la conexión del acuífero aluvial del Guadiamar con el de Almonte-Marismas

M. Jaén, E. Vázquez, J. M. Salvany y J. Carrera

Dominio del modelo

El acuífero aluvial del Guadiamar se pone en contacto con el de Almonte-Marismas en la parte baja del valle de este río y por debajo de las

marismas del Guadalquivir. En esta zona y gracias a los numerosos sondeos hidrogeológicos existentes (sondeos del Sector I y sector Marismas del Plan Regable Almonte-Marismas), se ha podido establecer una geología de detalle donde se reconocen tres unidades litológicas principales: por un lado, la formación Arenas Basales (acuífero Almonte-Marismas), subdividida en cinco capas con diferente conductividad hidráulica. De base a techo son: A1 (arenas), G1 (gravas), A2 (arenas), L1 (limos) y A3 (arenas) (Figura 9.8). Estas capas tienen un buzamiento hacia el sur de unos pocos grados y una potencia creciente hacia el SO de hasta 80 m en conjunto. En segundo lugar están los depósitos aluviales

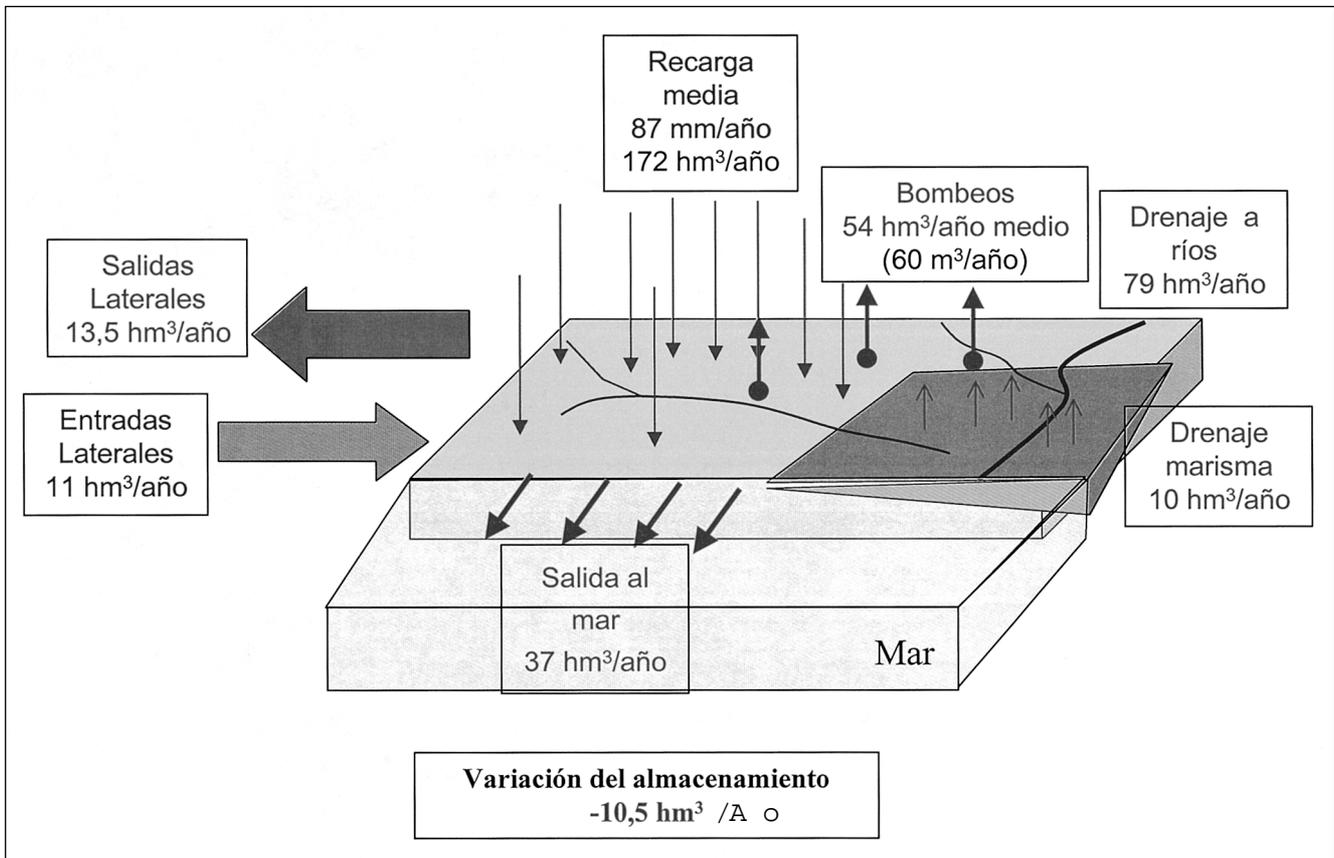


Fig 9.7. Balance global medio para los 29 años modelados en el modelo regional. La cifra de 60 hm³/año para los bombeos corresponde al promedio de los 26 años en que efectivamente se ha bombeado.

del Guadiamar (cantos, gravas y arenas), de estructura prácticamente horizontal y una potencia máxima de 20 m (niveles Gm y Am1). El contacto entre ambas formaciones constituye una superficie erosiva en forma de paleovalle que se extiende por debajo de la marisma hasta más allá del dominio modelado. En tercer lugar están los depósitos arcillosos de las marismas (nivel Am2), también prácticamente horizontales, con una potencia de 10 a 30 m, que en parte recubren concordantemente a los depósitos aluviales del Guadiamar y en parte discordantemente a los de las Arenas Basales. En el modelo se ha denominado Gm a los depósitos aluviales por debajo de las marismas y Am2 a las arcillas de la formación Marismas por encima de estos depósitos aluviales. Lateralmente, los niveles Gm y Am se extienden por el sur más allá de los límites del modelo.

Un último aspecto a comentar es que hacia el interior de las marismas las gravas Gm llegan a despegarse de las Arenas Basales y quedan englobadas entre las arcillas Am2 (a techo) y los depósitos Am1 (por debajo).

Modelo conceptual

En la conceptualización del funcionamiento hidrogeológico se ha tenido en cuenta la compleja geometría y distribución de los depósitos sedimentarios que integran el dominio del modelo. El funcionamiento hidrogeológico viene determinado por los diversos contrastes de permeabilidad entre las capas y por sus relaciones laterales. Así, se establece que el acuífero aluvial del Guadiamar, al quedar confinado bajo las arci-

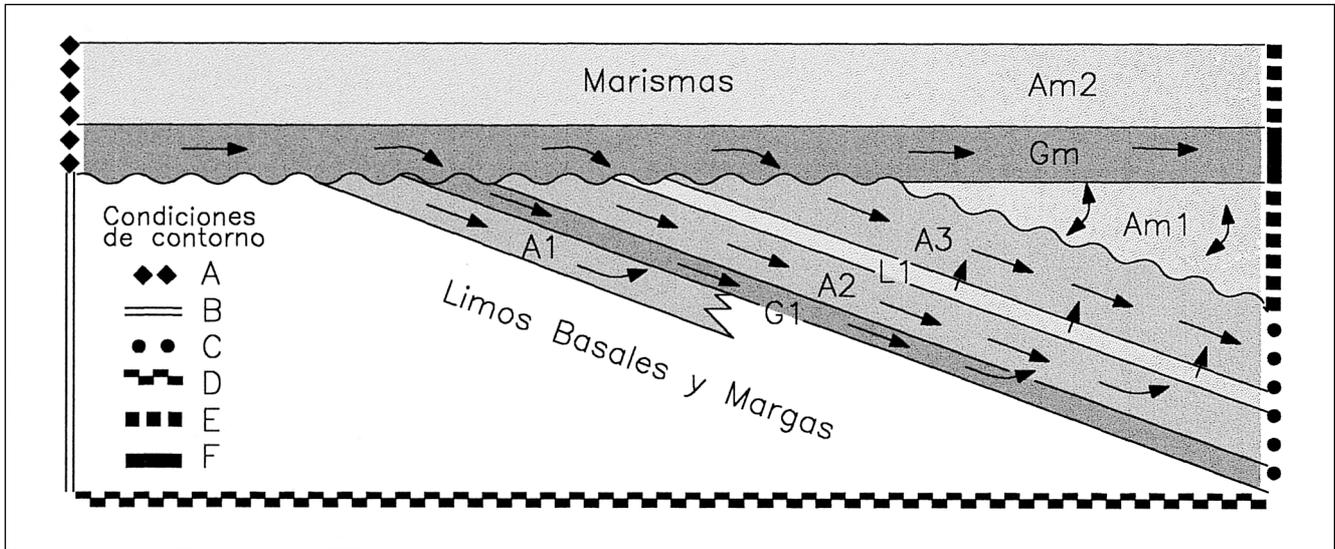


Fig 9.8. Modelo local de la conexión aluvial del río Guadiamar/Almonte-Marismas. Corte geológico esquemático, aproximadamente norte-sur, con indicación de las capas consideradas, en el modelo (A1, A2 y A3 son arenas; G1 y GM gravas; L1, limos, Am1 y Am2 son paquetes mixtos poco permeables), flujo del agua y condiciones de contorno (ver texto para la explicación detallada de cada tipo de contorno).

Las zonas agrícolas próximas que explotan las aguas subterráneas del acuífero Almonte-Marismas condicionan unos niveles piezométricos que muestran un cono de bombeo centrado en las explotaciones de los Hatos y que, por el Este, alcanza la traza del río Guadiamar. En la zona modelada, la alimentación de este acuífero se produce en parte por recarga directa, pero en gran medida también por el aporte lateral del acuífero aluvial del Guadiamar. En este contexto es fácil deducir que una posible contaminación del acuífero aluvial podría llegar al acuífero Almonte-Marismas y, en consecuencia, a los pozos de bombeo que en él se ubican.

Dada la heterogeneidad de los parámetros hidráulicos de los diferentes materiales de las formaciones, se han reinterpretado los ensayos de bombeo realizados por el IRYDA (1976) y, con ello, se han podido obtener las permeabilidades

de cada uno de los niveles. También se han podido calcular las permeabilidades verticales. A nivel detallado, las direcciones del flujo y por tanto de los posibles contaminantes estarán condicionadas por los contrastes de permeabilidad y las relaciones laterales entre las distintas capas.

Discretización y parametrización

Para la modelación de flujo y transporte de contaminantes se ha adoptado el criterio de representar la estructura sedimentaria mediante una discretización del dominio en 3D, representando todas sus singularidades. Para ello se han empleado tetraedros y prismas triangulares. Se han tenido que construir dos mallas tridimensionales que se corresponden respectivamente con las Arenas Basales y la formación aluvial del Guadiamar más la Formación Marismas, discordantes entre sí (es decir, las capas de los dos conjuntos de materiales no guardan paralelismo). Ambos conjuntos están en contacto mediante la superficie de erosión (paleovalle) a la que antes nos hemos referido. En la malla inferior se han representado las capas A1, G1, A2, L1 y A3. En la

En la malla superior las capas Gm, Am1 y Am2. Una vez realizadas y con la topografía de la superficie de erosión como nexo común (Figura 9.9), estas dos mallas han sido acopladas nudo a nudo de manera que resulte una malla única.

Hay que destacar que todas las capas se han representado con su geometría tridimensional excepto la capa de gravas G1, de gran transmisividad y pequeño espesor, que se ha tratado como una capa en elementos 2D entre las capas adyacentes A1 y A2. La malla resultante consta de 6387 nudos y 13693 elementos. La simulación de flujo y transporte se ha realizado con el programa TRANSIN III (Galarza et al., 1996).

A cada una de las capas definidas en la malla se les han asignado los parámetros hidráulicos obtenidos mediante la reinterpretación de los ensayos de bombeo o según los resultados de la calibración del modelo regional descrito anteriormente.

Metodología: hipótesis de flujo y transporte

El objetivo del modelo ha sido esencialmente cualitativo y no se ha pretendido una calibración

detallada. Las simulaciones se han realizado en régimen estacionario. Por el mismo motivo, se han considerado dos situaciones extremas: una situación de régimen de flujo natural (hipótesis 0) y una situación de régimen de flujo perturbado por extracciones intensas (hipótesis 1). La hipótesis 0 es representativa del período anterior a 1974. La hipótesis 1 lo es del período 1987-97 (Figura 9.10). Para esta última hipótesis se ha simulado la extracción total estimada, que es de 9.9 hm³/año.

Se ha tenido en cuenta la situación en los contornos de los niveles piezométricos medios correspondientes a cada uno de los períodos comprendidos por las hipótesis. Estos niveles se han obtenido como resultado del modelo regional presentado en el apartado anterior. La asignación ha sido la siguiente (Figura 9.8):

- A) Condición de nivel fijo. El nivel piezométrico se asigna como un nivel medio que integra en vertical los niveles de cada capa que intersecta el contorno del modelo.
- B) Se asigna condición de nivel fijo a los contornos en los que la formación Marismas se dispone discordante sobre las Arenas Basales.

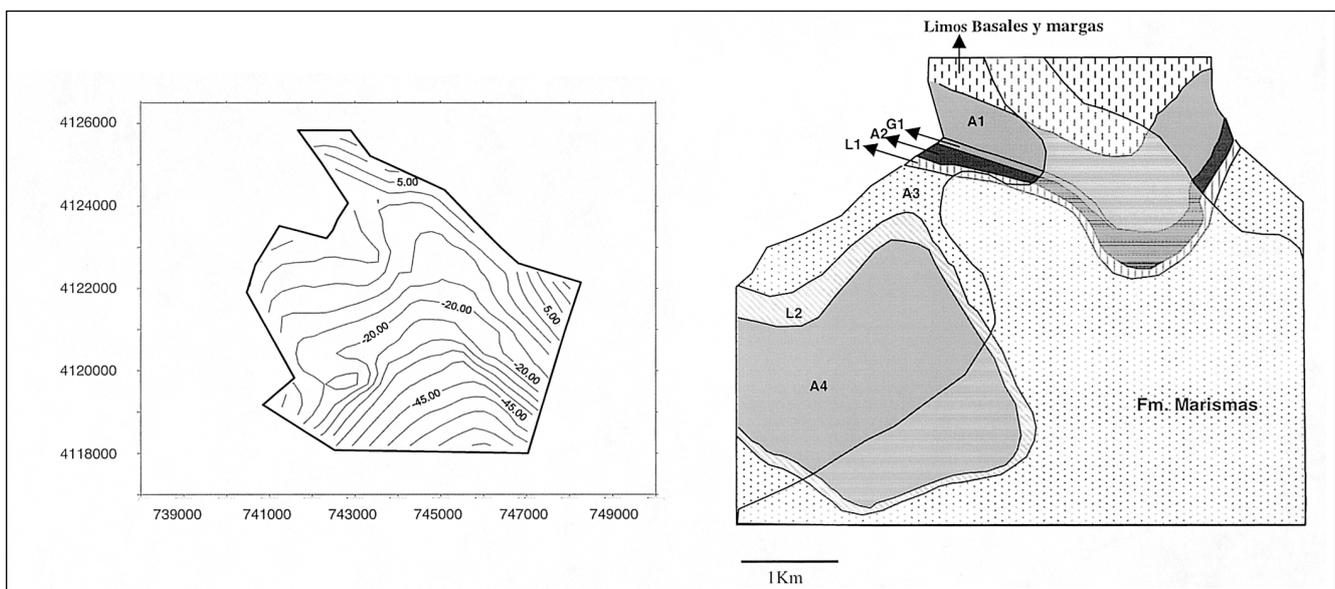


Fig 9.9. Modelo local de la conexión aluvial del río Guadiamar/Almonte-Marismas. a) Elevación de la superficie erosiva del contacto entre la formación Arenas Basales y los depósitos aluviales del Guadiamar bajo las marismas. b) Cartografía de las capas de la formación Arenas Basales aflorantes bajo la superficie de erosión antes representada. Para la situación, véase la Fig 9.1.

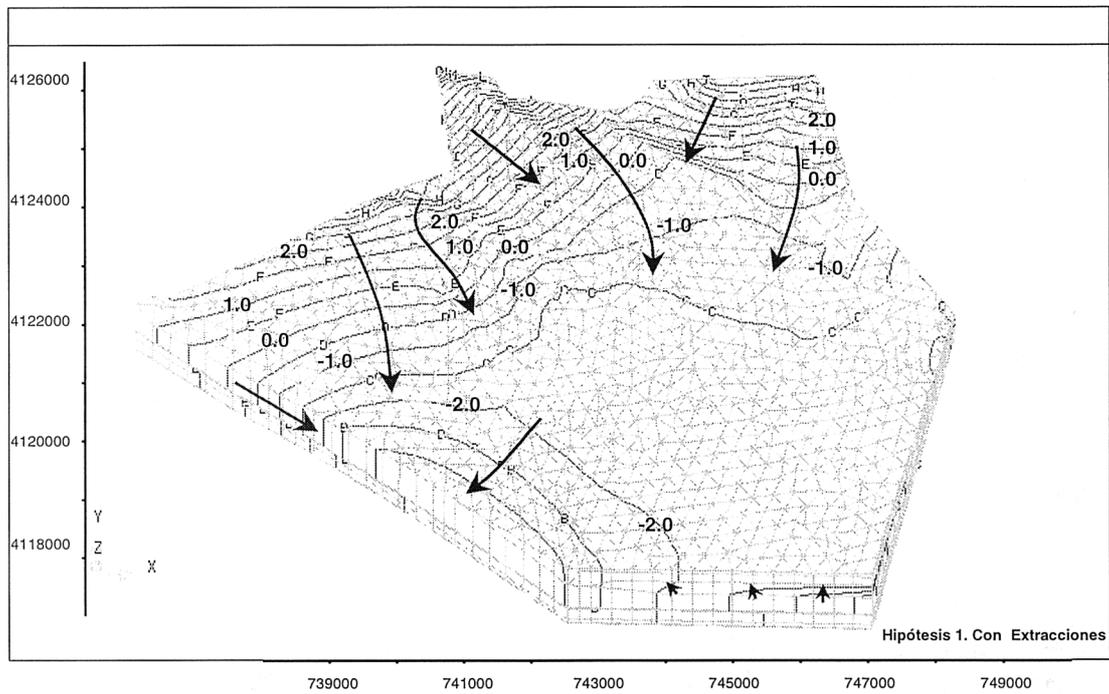
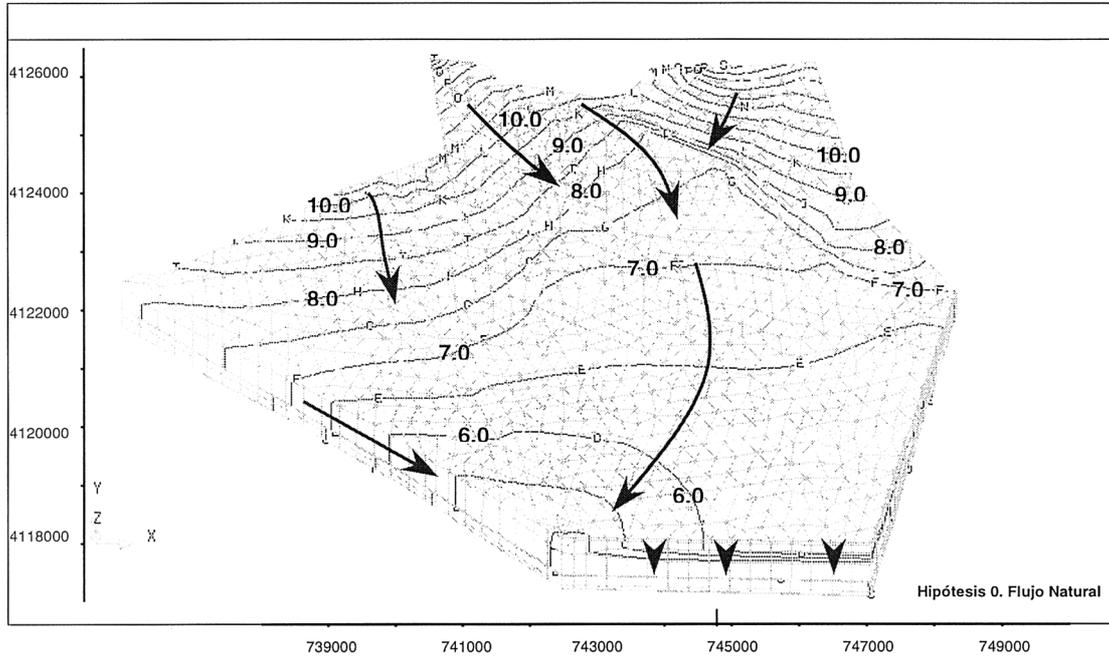


Fig 9.10. Modelo local de la conexión aluvial del río Guadiamar/Almonte-Marismas. Niveles calculados para la hipótesis 0 (flujo natural) y para la hipótesis 1 (con extracciones).

Dado los límites de este modelo, este contacto tiene lugar con el nivel de arenas A₃.

- C) Nivel fijo o caudal nulo. El caudal nulo se asigna a los contornos verticales de las capas de las Arenas Basales en las que, coincidiendo con los límites del modelo, cambian lateralmente a las margas basales. En el resto se asigna el nivel fijo deducido del modelo regional.
- D) Se asigna caudal nulo o muy bajo a los contornos horizontales basales de las capas de las Arenas Basales sobre las margas basales.
- E) Se asigna caudal nulo o muy bajo a los contornos verticales de las arcillas de la Formación Marismas, dado que se considera que los flujos horizontales son despreciables frente a los restantes.
- F) Se asigna caudal nulo o muy bajo a los contornos verticales de las capas de gravas aluviales (Gm) por debajo de la Formación Marismas, dado que se considera que éstas se acuñan llegando a quedar confinadas por las arcillas.

Modelo de transporte.

El nivel de gravas Gm situado debajo de las marismas se considera como la posible entrada de una hipotética contaminación de las aguas subterráneas del aluvial del Guadiamar hacia el acuífero Almonte-Marismas. Se ha simulado una entrada continua de contaminante a lo largo del tiempo, en situación de flujo estacionario y en régimen transitorio de transporte. El tiempo total de simulación ha sido de 20 años. Los intervalos de cálculo han sido de 1 día durante el primer mes y mensuales hasta el final (Figura 9.11).

En cuanto a los procesos de transporte, se ha supuesto que el posible contaminante se comporta de manera conservativa. Se ha adoptado una porosidad cinemática de 0,2 para las arenas y de 0,1 para los limos. Como dispersividad es habitual adoptar un 10% del tamaño del dominio, lo que equivaldría a un valor de casi 1 km. Dado el nivel de detalle de este modelo, se ha adop-

tado un valor de 300 m. La dispersividad transversal es igual a la mitad de dicho valor.

Resultados de la modelación.

a) Hipótesis 0 de flujo estacionario.

La piezometría en planta (Figura 9.10) muestra un gradiente hacia el sur. Se observa un aporte de agua desde la Formación Marismas hacia las capas inferiores dado por la inflexión de las curvas piezométricas en los contactos de las dos formaciones. Este hecho se pone de manifiesto en las piezometrías en sección. En la figura 9.8, se muestra cualitativamente que todas las capas aportan a la capa A3, que es la que tiene continuidad, dado que las inferiores se acuñan lateralmente con las margas basales por su extremo suroeste. El balance de masas del modelo demuestra que las entradas al sistema se realizan por recarga y por los contornos del norte, mientras que las salidas se producen por el sur, hacia las marismas.

El balance de masas (Tabla 9.1) muestra el caudal de agua que entra o sale por cada contorno. Todos los contornos, aportan agua excepto el Sur.

b) Hipótesis 1 de flujo estacionario.

La piezometría en planta (Figura 9.10) refleja un marcado cono de bombeo en la zona de extracciones para el regadío. En esta situación, las entradas al sistema se producen desde todos los contornos, incluso desde el sur.

c) Régimen transitorio de transporte.

Los resultados de la simulación durante los 20 años considerados se presentan en los gráficos de la Figura 9.11. Se observa el avance del penacho de contaminante que tiene lugar a través de la capa Gm como camino preferente de avance durante los primeros meses. Para un tiempo de 2 años de avance se observa que el penacho se introduce en el acuífero Almonte-Marismas a través de las arenas de la capa A₁, situándose el

Puntos de Observación	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	Capa
F80031b	743394.5	4123909.3	-10.8	A1
F80031c	743394.5	4123909.3	-3.5	Gm
F80031d	743394.5	4123909.3	4.9	Gm
F80031e	743394.5	4123909.3	8.0	Arcillas
F80059b	743951.0	4122370.0	-35.6	A1
F80059c	743951.0	4122370.0	-17.7	G1
F80059d	743951.0	4122370.0	-10.0	A2
F80059e	743951.0	4122370.0	2.5	Gm
F80059f	743951.0	4122370.0	6.5	Arcillas

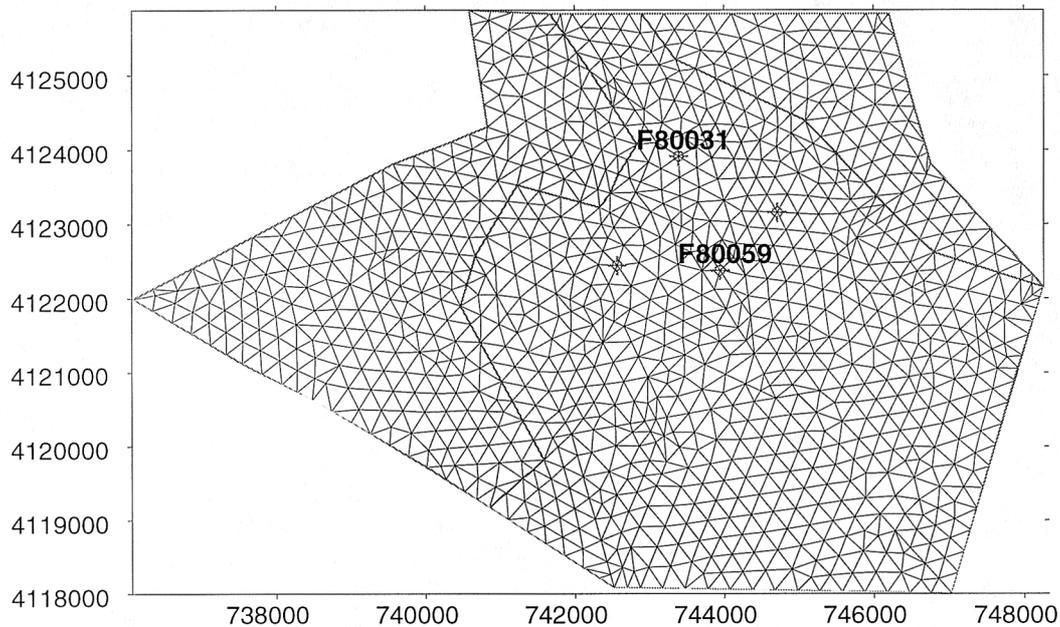


Fig 9.11a. Puntos de observación del modelo de transporte conservativo. Situación en planta y número de muestreo correspondiente a cada capa.

frente de avance aproximadamente a 3 km de la sección de inyección. En la situación final, pasados los 20 años de simulación, se observa que el frente de avance a través de las gravas Gm tiene una tendencia a frenarse. Esto se corresponde con el modelo conceptual de flujo, que considera que las gravas están situadas entre los niveles de arcillas de marismas, por lo que se les aplica una

condición de caudal nulo. Esto hace que el flujo se dirija hacia las arenas y gravas del acuífero Almonte-Marismas. Este efecto se aprecia en las secciones verticales. Así mismo, se observa cómo el frente de contaminación avanza por los diferentes niveles arenosos y de gravas a una velocidad diferente, dependiendo de la permeabilidad de cada uno de ellos.

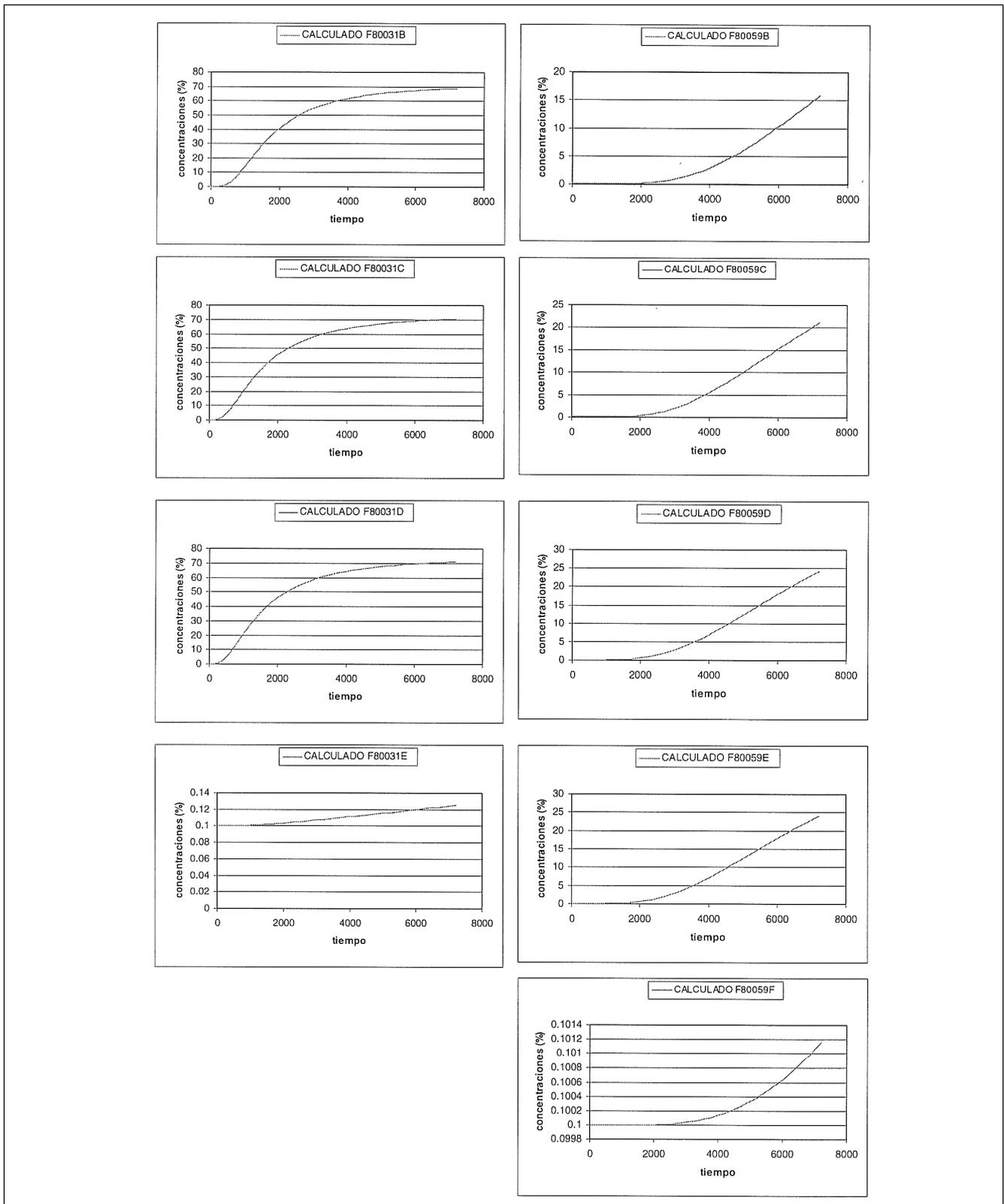


Fig 9.11b. Curvas de llegada de un contaminante conservativo en los dos puntos de observación de la figura 9.11a. (tiempo en días).

Recarga	1.18
Contorno Norte	0.45
Contorno Sur	-6.78
Contorno Este	3.57
Contorno Oeste	1.55
Río Cigüeña	0.03

Tabla 9.1. Balance de masas ($\text{hm}^3/\text{año}$) del modelo tridimensional de flujo de la conexión del acuífero aluvial del río Guadamar con el acuífero Almonte-Marismas. Se trata de valores medios, los positivos representan entradas y los negativos salidas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos validan el modelo conceptual utilizado para esta hipótesis de flujo. Este modelo se podría utilizar como herramienta de control y gestión de los acuíferos aquí tratados, pudiendo ser capaz de determinar el alcance del vertido en un intervalo de tiempo determinado. En todo caso se puede concluir que el tiempo de tránsito desde la salida del aluvial hasta los bombeos no es inferior a cuatro años.

9.3. Relaciones río-acuífero y balance de masas global en el aluvial del Guadamar

F. Padilla

Modelo conceptual de las relaciones río-acuífero

El modelo conceptual del aluvial del río Guadamar se ha descrito en el Capítulo 4. En este apartado se considera en primera aproximación la modelación numérica del flujo conjunto de las aguas subterráneas y superficiales en el aluvial comprendido aproximadamente entre Gerena y el Cortijo del Quema. La modelación conjunta de las aguas subterráneas y superficiales tiene en este caso el particular interés de tratar de determinar las interacciones río-acuífero en el aluvial del río Guadamar.

Para alcanzar dicho objetivo se ha empleado el modelo de simulación MELEF (Padilla et al., 1997; Padilla, 1999), el cual requiere evaluar las aportaciones totales de agua al sistema. Estas aporta-

ciones corresponden esencialmente a los caudales procedentes de los cursos de agua superficial, las recargas laterales subterráneas, la precipitación sobre la superficie del aluvial y el retorno de las explotaciones y los usos del agua. Los flujos de salida se deben principalmente a los usos consuntivos del agua (explotaciones), así como a las salidas de agua desconocidas, tales como la evapotranspiración sobre el aluvial y las transferencias o descargas de agua hacia la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas.

Se pretende que con las actuales condiciones de simulación del modelo conceptual del aluvial del río Guadamar, los resultados permitan conocer los niveles freáticos y la localización y extensión de los cuerpos de agua superficial (calados de agua superficial, red de drenaje activa, zonas húmedas), así como la descarga debida a la evapotranspiración en el sector y la debida a los caudales de agua subterránea y superficial (en particular los caudales de descarga del aluvial en su conexión con la unidad Almonte-Marismas). De especial interés para el estudio de la contaminación es conocer los caudales de interacción río-acuífero a lo largo de todo el cauce.

Para la modelación es preciso conocer, en primer lugar, la topografía de la superficie y del fondo del acuífero. Las sucesivas manipulaciones de la información topográfica disponible (OTR-CMAJA, 1999) han permitido la obtención de la topografía definitiva, la cual ha sido interpolada en los nudos de la malla del modelo discreto. Una vez corregidas las altitudes del substrato (Salvany et al., 1999), se ha constituido la base para la interpolación, mediante krigeado, en los nudos del modelo discreto del aluvial del río Guadamar.

Como valor medio de la conductividad hidráulica se ha tomado $0,001 \text{ m/s}$ ($86 \text{ m}^2/\text{d}$). Este valor es coherente con lo que se deduce de los ensayos de bombeo que se muestran en el Capítulo 4.

Balances hídricos conocidos en el aluvial del Guadamar

El aluvial del río Guadamar recibe aportaciones procedentes de toda la cuenca hidrográfica. La descarga del aluvial se ha situado en el Vado del

Quema. Las aportaciones incluyen la precipitación propia sobre el aluvial y las contribuciones laterales de las aguas subterráneas y superficiales procedentes de las subcuencas colindantes.

La cuenca hidrográfica del río Guadiamar, o cuenca vertiente tiene una superficie aproximada de 1072,5 km², parte de la cual, 45,5 km², corresponde a la superficie de aluvial comprendida en el modelo discreto. Se subdivide en siete subcuencas principales.

a) Aportaciones laterales

Como resultado de los estudios hidrológicos realizados (CHG, 1998; BOLIDEN, 1998) se puede estimar que la lluvia útil puede representar aproximadamente el 25 % de la precipitación total en las siete subcuencas que drenan sus aguas al aluvial. Esta lluvia útil (precipitación total menos evapotranspiración) correspondería a los recursos hídricos de dichas subcuencas y constituirían las aportaciones laterales al aluvial en concepto de aguas superficiales y de aguas subterráneas.

Se ha estimado que para años hidrológicos húmedos, medios y secos, las aportaciones laterales al aluvial del Guadiamar totalizan 300, 200 y 100 hm³/año, respectivamente. De estas cantidades, el 10 % correspondería a las aguas subterráneas (30, 20 y 10 hm³/año) y el resto se distribuye entre los nueve ríos que concentran y drenan las aguas superficiales de las siete subcuencas hacia el aluvial, totalizando 270, 180 y 90 hm³/año, respectivamente.

b) Precipitación, evaporación y usos del agua

De los estudios hidrológicos realizados se estima que la precipitación anual sobre la superficie del aluvial podría ser de 880 mm, 660 mm ó 440 mm, según se trate de un año húmedo, medio o seco. Estas precipitaciones supondrían, respectivamente, unas aportaciones sobre el aluvial de 40, 30 ó 20 hm³/año (Tabla 9.2).

El modelo MELEF requiere también una estimación de la evaporación potencial con el fin de poder evaluar la evapotranspiración que se produce en el aluvial. Dadas las características y la

latitud de la cuenca vertiente del Guadiamar, se estima que la evaporación potencial podría estar próxima a los 1500 mm/año.

Las dotaciones de riego, unido al inventario de fincas afectadas, permite realizar una estimación aproximada del agua utilizada anualmente para regadío en el aluvial del río Guadiamar. Se estima que en la región se utilizan aproximadamente 20 hm³/año para regadío. Las aportaciones procedentes de los retornos de riego podrían suponer aproximadamente el 25 % del agua utilizada para regadío. Ello equivale a considerar los retornos de riego como una recarga o aportación adicional de 5 hm³/año. A partir de los datos recogidos por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, se ha estimado que los consumos anuales en el aluvial por otros conceptos (industrial y urbano) podrían situarse alrededor de los 5 hm³/año.

c) Condiciones de los balances hídricos conocidos

El modelo de simulación conjunta de las aguas subterráneas y superficiales MELEF ha sido adaptado a las características hidrológicas del aluvial del modelo discreto del río Guadiamar para los parámetros hidrológicos del mismo. Se han establecido asimismo las condiciones de simulación para las aportaciones internas conocidas del modelo discreto del aluvial. Entre las aportaciones internas conocidas cabe destacar la precipitación anual sobre la superficie del aluvial. En este sentido, siguiendo el análisis hidrológico precedente, se han planteado tres alternativas de simulación, con precipitaciones anuales de 40, 30 y 20 hm³/año. Una parte también integrante de las aportaciones internas del aluvial corresponde a los usos medios del agua, que totalizan 20 hm³/año (20 de regadío menos 5 de retorno más 5 de otros usos).

Las condiciones de simulación del modelo se han adaptado igualmente para tener en cuenta las aportaciones laterales de las diferentes subcuencas que drenan sus aguas al aluvial del modelo discreto del río Guadiamar. La distribución de estas aportaciones anuales se realiza igualmente por subcuencas, según queda reflejado en la Tabla 9.2.

Aportaciones (hm ³ /año)	Año húmedo	Año medio	Año seco
Guadiamar	75	50	25
Agrio	64	43	21
Frailles	30	20	10
Charcos de Tizón, Valdegallinas	29	19	10
Ardachón	52	35	17
San Cristóbal, Las Carianas	24	16	8
Alcarayón	26	17	9
Total Aportaciones laterales	300	200	100
Precipitación directa	40	30	20
Usos del agua	-20	-20	-20
Total Aportaciones internas	20	10	0
Aportaciones medias	320	210	100

Tabla 9.2. Modelo de la interacción río Guadiamar acuífero aluvial. Aportaciones al aluvial del río Guadiamar. Los valores negativos son salidas del sistema y los positivos entradas.

Como resultado del conjunto de condiciones de simulación precedentes, las simulaciones se realizan para unas aportaciones medias conocidas de 320, 210 y 100 hm³/año, las cuales serían características de años húmedos, medios y secos en el aluvial del río Guadiamar.

Simulación de las relaciones río-acuífero

Las condiciones de simulación del modelo MELEF se han adaptado a las precipitaciones, a los usos del agua y a las aportaciones procedentes de otras cuencas, de modo que los balances hídricos medios en el aluvial del río Guadiamar son característicos de años húmedos, medios y secos. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 9.12.

De acuerdo con los objetivos de este proyecto, los resultados presentados corresponden a simulaciones en régimen estacionario para los parámetros hidrológicos estimados y las condiciones de simulación planteadas. No ha existido pues ningún proceso previo de ajuste o calibración de los resultados.

a) Verificación de las simulaciones

Con el fin de verificar la verosimilitud de las descargas de agua superficial calculadas por el modelo, se comparan con las medidas en las estaciones de aforo con registros de aportaciones (CHG, 1999). Las estaciones de aforo que disponen de registros con posterioridad al accidente de la balsa de lodos mineros son las estaciones de El Guijo, Aznalcázar y Vado del Quema (Figura 9.13).

Se han realizado pues comparaciones entre los caudales de agua superficial calculados y los caudales aforados durante el año 1998 en las estaciones de El Guijo, Aznalcázar y Vado del Quema. Conviene resaltar, sin embargo, que los datos de aforo no son especialmente abundantes y que se estaba actuando sobre el cauce. Con estas consideraciones, las comparaciones parecen aceptables para las estaciones de El Guijo y Vado del Quema. Sin embargo la estación de Aznalcázar ha presentado diferencias importantes. Los caudales de agua superficial medidos no son bastantes frecuentes como para establecer criterios definitivos ya que, por ejemplo, la avenida del

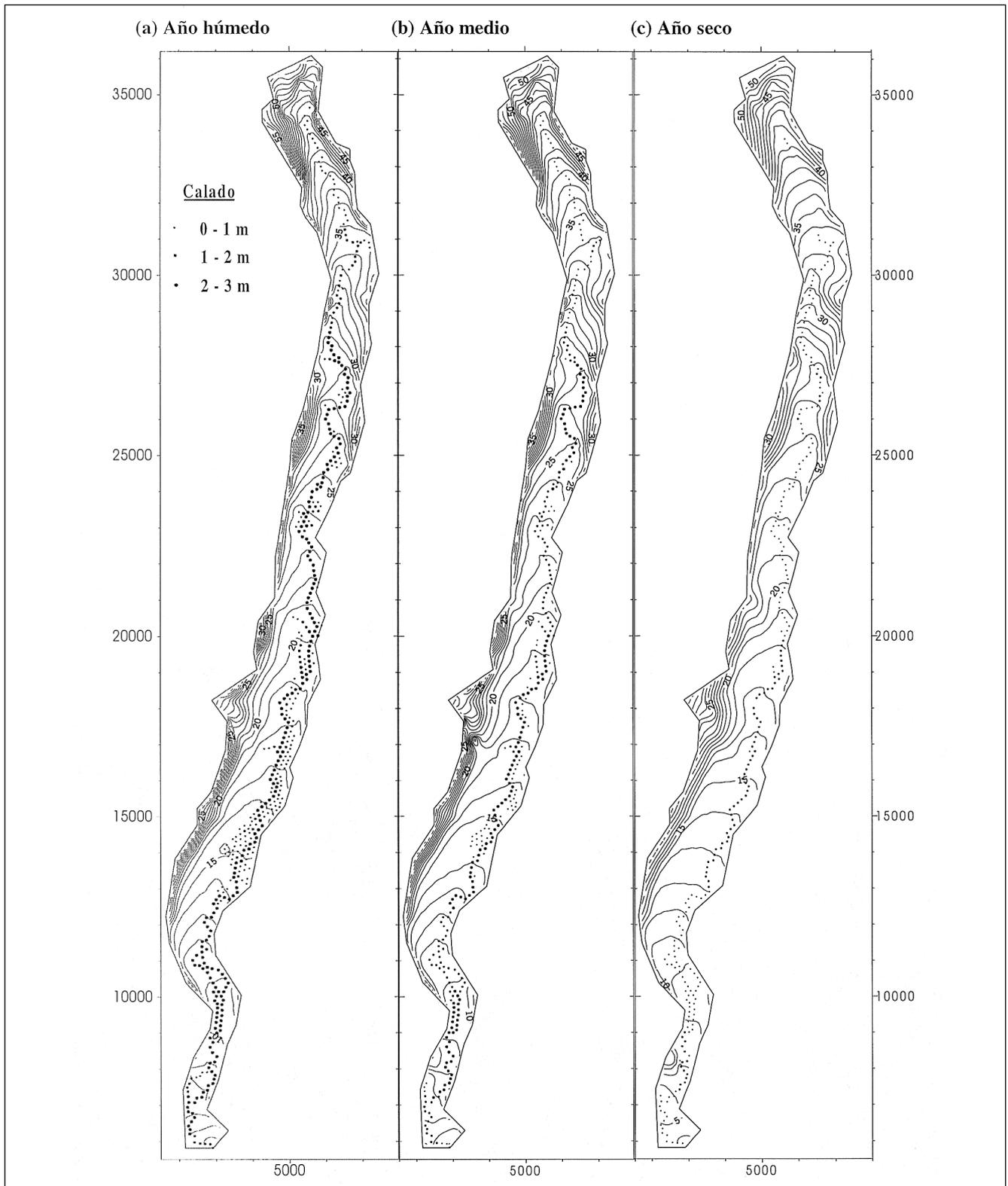


Fig 9.12. Modelo de la interacción río Guadiamar-acuífero aluvial. Resultados de la simulación de niveles (cotas absolutas) para unas aportaciones de año húmedo (izquierda), medio (centro) y seco (derecha).

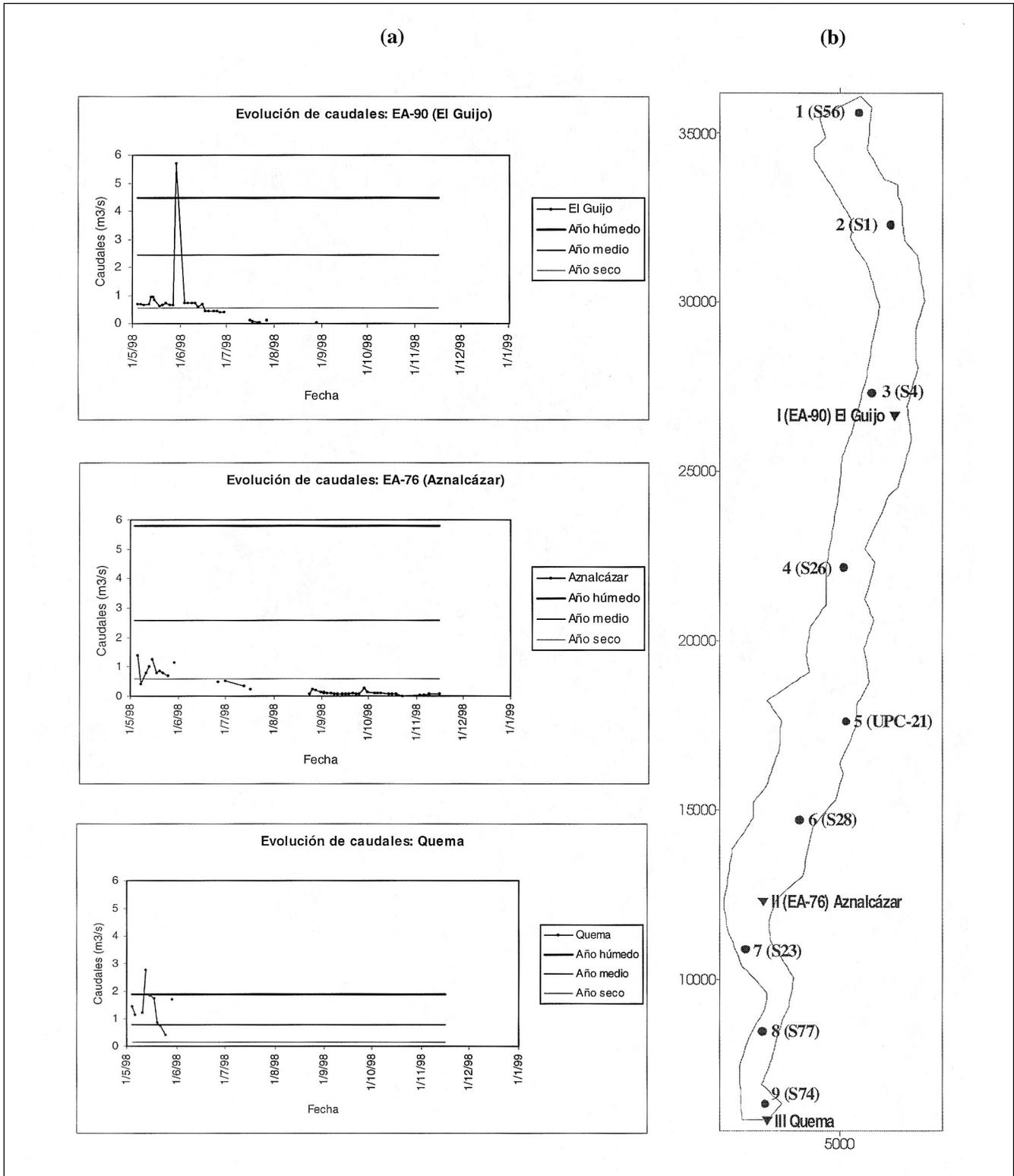


Fig 9.13. Modelo de la interacción río Guadimar-acuífero aluvial. (a) Comparación entre caudales superficiales calculados y observados en las estaciones de aforo de El Guijo, Azalcázar y Vado del Quema (según la CHG). (b) Ubicación de piezómetros y estaciones de aforo usados para la verificación de los resultados de las simulaciones.

1.6.98 no es registrada por todas las estaciones de aforo. Es probable que las evaluaciones de los caudales de agua superficial mejorasen después de una definición más precisa de la sección topográfica del Guadiamar en las proximidades de Aznalcázar.

Con el fin de verificar igualmente la verosimilitud de las simulaciones realizadas se han seleccionado 9 pozos (CGS, 1998b; CGS, 1999) a lo largo del aluvial comprendido en el modelo discreto del Guadiamar (Figura 9.14).

Los niveles freáticos calculados han sido a su vez verificados mediante comparación con los niveles freáticos medidos en los pozos seleccionados, desde abril de 1998 hasta diciembre de 1999. Lo que se pretende pues es verificar que los niveles piezométricos calculados en régimen estacionario para años húmedo, medio y seco adquieren valores razonables, en comparación con los valores de los niveles piezométricos medidos, y para las características hidrológicas de los períodos en los que se han realizado los registros.

De las comparaciones entre los niveles freáticos calculados y observados se pueden sacar algunas conclusiones relevantes. Así pues, las discrepancias más importantes corresponden al pozo situado en el extremo norte del aluvial (Sondeo 56). Estas discrepancias entre los niveles observados y calculados tienen en este sector una explicación justificada. De hecho no se dispone de datos sobre la posición del substrato impermeable en el extremo norte del aluvial, puesto

que el perfil geológico más cercano, de los realizados por Salvany et al. (1999), se encuentra próximo a la confluencia entre el río Agrio y el río Guadiamar. En efecto, la interpolación realizada estima que la posición del substrato impermeable en este sector se encuentra a aproximadamente 50 metros de altitud, por lo que los niveles freáticos calculados tienen grandes dificultades para descender por debajo esa cota. Se deduce pues la necesidad de mejorar en el futuro la posición del substrato impermeable en este sector norte del aluvial, sobre todo en la proximidad de la confluencia entre el arroyo de los Frailes y el río Agrio.

b) Balances hídricos globales

Los recursos hídricos totales correspondientes a las descargas laterales hacia otras cuencas, en este caso la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas, equivalen a 296, 190 y 86 hm³/año para las tres alternativas planteadas. Estas descargas laterales totales se dividen entre las descargas de las aguas superficiales, las cuales son 293, 185 y 80 hm³/año, y las descargas de las aguas subterráneas, las cuales son 3, 5 y 6 hm³/año, respectivamente, para años húmedos, medios y secos (Tabla 9.3).

En este sentido, uno de los resultados de las simulaciones corresponde a los caudales de descarga que se producen debido a evapotranspiración existente en el aluvial. Así, las evapotranspiraciones totales obtenidas para todo el aluvial

Recursos hídricos (hm ³ /año)	Año húmedo	Año medio	Año seco
Evapotranspiración	-24	-20	-14
Descargas superficiales	293	185	80
Descargas subterráneas	3	5	6
Descargas laterales	-296	-190	-86
Descargas medias	-320	-210	-100
Recursos hídricos	-296	190	86

Tabla 9.3. Modelo de la interacción río Guadiamar-acuífero aluvial. Componentes del balance en el aluvial. Los valores positivos son entradas y los negativos salidas del sistema.

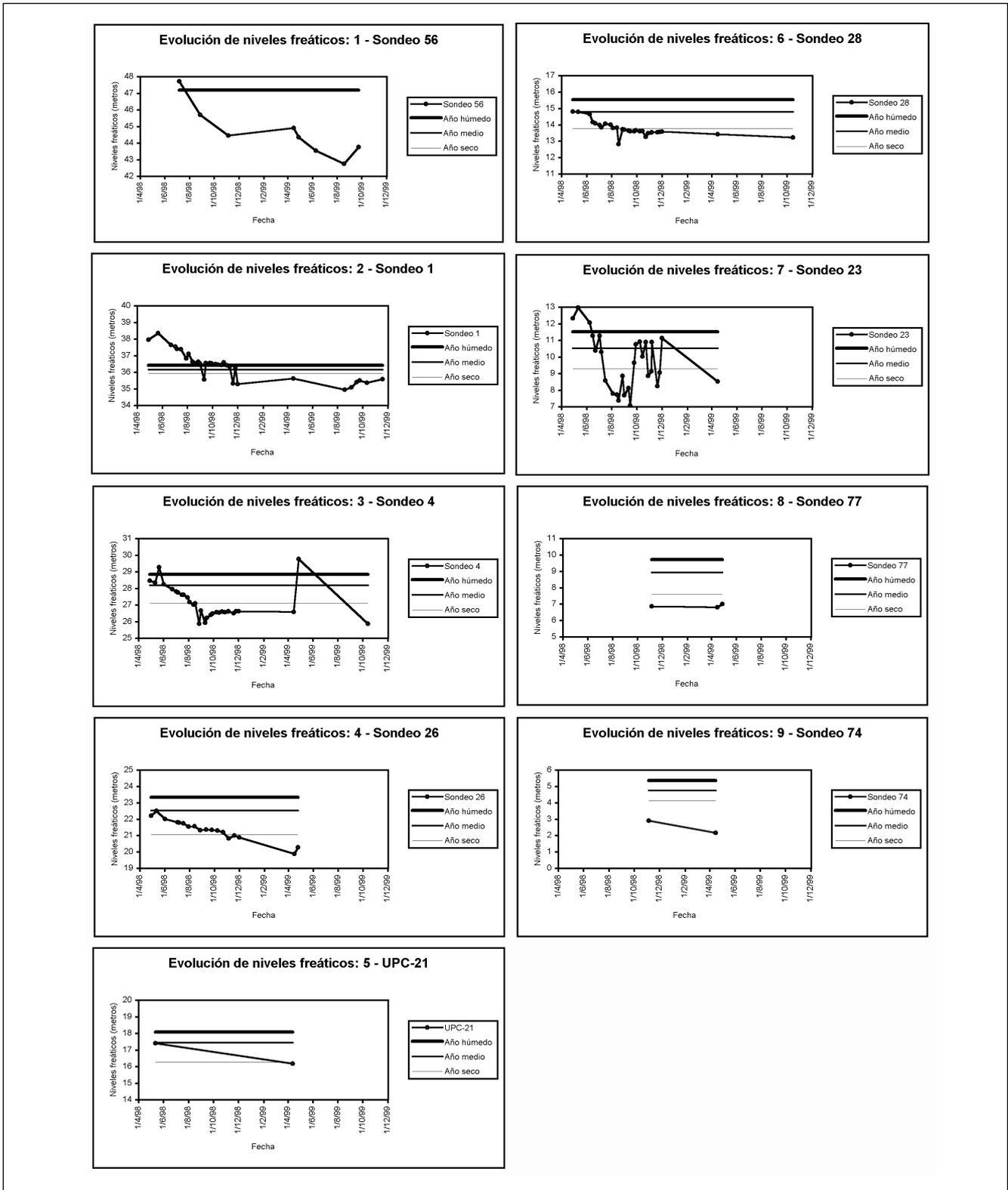


Fig 9.14. Modelo de la interacción río Guadiamar-acuífero aluvial. Comparación entre niveles freáticos calculados y observados en piezómetros del aluvial del río Guadiamar (cotas absolutas).

son 24, 20 y 14 hm³/año para años característicos húmedo, medio y seco, respectivamente (Tabla 9.3).

Las simulaciones permiten igualmente conocer las reservas de agua para las tres alternativas planteadas. De este modo, las reservas de agua superficial y subterránea almacenadas en el sector del aluvial que corresponde al modelo discreto equivalen a 27, 24 y 21 hm³ para un año característico húmedo, medio y seco, respectivamente.

Así mismo, los resultados permiten conocer el sector de contacto a través del cual se produce la descarga del aluvial del río Guadiamar hacia la unidad Almonte-Marismas. Este sector se sitúa pues en el extremo sur del aluvial correspondiente al modelo discreto, tiene una orientación este-oeste y se extiende sobre una longitud aproximada de 800 metros.

9.4. Modelo local de flujo en acuífero aluvial del Agrío

O. Bernet, J. M. Salvany, J. Bolzicco y J. Carrera

Dominio del modelo

El dominio modelado se localiza en el entorno de la balsa de lodos accidentada. Por el Norte limita con los materiales paleozoicos donde se sitúa la mina de Aznalcóllar y por el sur con el corte B de la finca La Soberbina (ver figura 3.2 del Capítulo 3). Los límites laterales los determina el substrato formado por las Margas Azules.

Los depósitos aluviales modelados del río Agrío constituyen dos terrazas compuestas por cantos y gravas, con niveles subordinados de arena. La terraza inferior (T1) tiene una posición central y sobre ella discurre el cauce actual del río. La terraza superior (T2) tiene una posición lateral a ambos márgenes de la T1, aunque está principalmente desarrollada en la margen derecha. La base de la primera terraza constituye una superficie en forma de canal (paleovalle), excavado en las Margas Azules, y situado siempre a una cota más profunda que la base de la terraza T2. La base de esta segunda terraza es relativamente plana y se sitúa a una cota similar a la del techo

de la T1. El espesor máximo de sedimentos es de 7 y 5 m respectivamente para las terrazas T1 y T2.

Modelo conceptual

El objetivo de este modelo ha sido integrar la información disponible sobre el acuífero aluvial del Agrío y representar cualitativamente su comportamiento hidrogeológico. La simulación se realizó con el código TRANSIN IV, resolviendo la ecuación de flujo no lineal en régimen transitorio.

El modelo desarrollado contempla la existencia de diferentes direcciones de flujo en la vertical. Por una parte, el flujo que tiene lugar a través de los materiales de la terraza T1 que rellenan el paleovalle, de dirección básicamente N-S y, por la otra, el que se da por la terraza T2, con una notable componente E-O originada por el efecto de drenaje que ejerce el río Agrío sobre el acuífero.

Para poder representar estas diferentes componentes del flujo se ha optado por un modelo multicapa o cuasi-3D, compuesto por dos capas bidimensionales conectadas mediante elementos 1D (Figura 9.15). La capa inferior simula el flujo existente a través de la parte más profunda de la terraza T1 (la que rellena el paleovalle). La capa superior representa la terraza T2 y los materiales más superficiales de la T1. Los elementos 1D actúan únicamente como conexión entre capas.

En la parte del acuífero representada por la capa superior se producen oscilaciones apreciables. Al tratarse de un acuífero libre, los cambios de espesor saturado influyen en la transmisividad, por lo que ésta depende de la posición del nivel piezométrico en cada tiempo y el problema a resolver pasa a ser no lineal.

Para la utilización de la función no lineal de transmisividad es necesario que se conozca la topografía de la base de la capa. Conceptualmente, ésta coincidirá con las margas en las zonas de acuífero somero. El paleovalle, representado por la capa inferior, se considera siempre saturado en todo su espesor. Es decir, la capa inferior se ha tratado con transmisividad constante. El goteo a través de los ríos y arroyos es otra variable que se ha simulado con el uso de funciones no lineales.

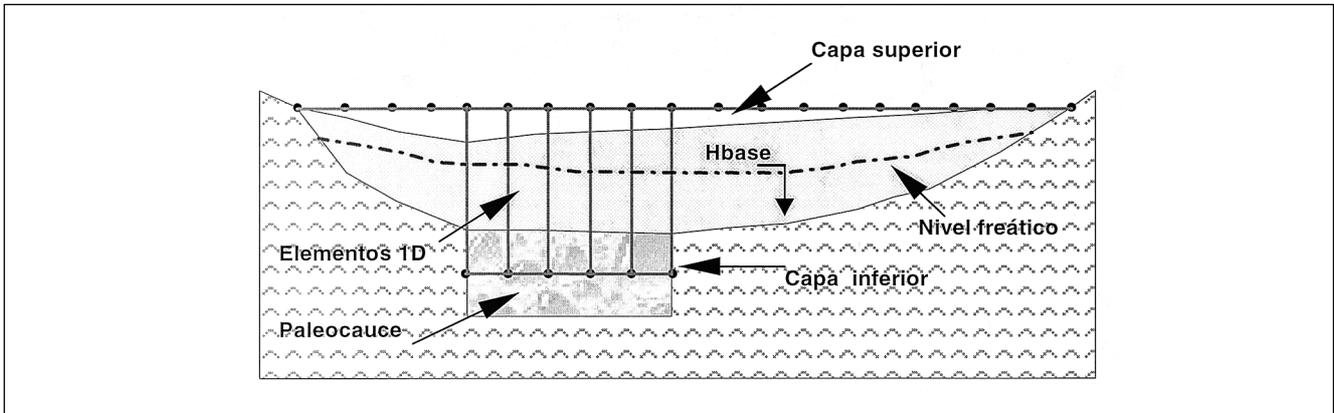


Fig 9.15. Modelo local del aluvial del río Agrio. Esquema conceptual del tratamiento del aluvial. El modelo es bicapa. La capa inferior representa el paleocauce formado por la terraza T1 y la superior representa la terraza T2 y la parte de la T1 que está sobre el paleovalle (ver geología en Capítulo 3).

les. Así, el agua que entra en el acuífero proveniente de los ríos en las épocas en que los niveles piezométricos estén por debajo del nivel del río, y viceversa, es directamente proporcional a la diferencia de niveles. Sin embargo, a partir de una cierta diferencia de nivel se produce una desconexión hidráulica entre río y acuífero, y el caudal pasa a ser un valor constante.

Zonificación del modelo

Para representar los parámetros hidráulicos se ha dividido el modelo en zonas donde el parámetro sea constante. Se han diferenciado ocho zonas distintas de conductividad hidráulica, seis para los elementos 2D y dos para los 1D (Figura 9.16). La capa superior ha sido dividida en cuatro zonas y la inferior y los elementos 1D en dos. En la capa superior la transmisividad se obtiene como el producto de la conductividad por el espesor saturado, es decir, que será variable dentro de cada zona en el espacio y en el tiempo. En cambio, en la capa inferior ésta se obtiene como producto de la conductividad por el espesor de capa, constante en el espacio y en el tiempo dentro de cada zona. El almacenamiento ha sido considerado constante dentro de todas las zonas.

La recarga, que se ha tratado como homogénea en todo el modelo, sólo tiene lugar en la capa superior. Su estimación inicial se ha obtenido a partir del balance de agua en el suelo.

La única zona que se ha tratado de forma diferente es el área cubierta por la balsa. En ella, la lluvia no cae directamente sobre el aluvial. Si se considera la balsa como una capa saturada de baja conductividad y con nivel piezométrico superior al del acuífero, la infiltración que se produzca a través de ella puede tratarse como una recarga constante en el tiempo.

Al igual que con la recarga, los tramos de interacción río-acuífero (goteos) sólo se han diferenciado en la capa superior. Esta diferenciación se ha basado en criterios litológicos y del tamaño de la sección de los ríos. Así, en las zonas por donde los ríos discurren sobre materiales más conductivos se han tomado coeficientes de goteo mayores. Por otra parte, a los ríos de mayor sección también se les ha dado coeficientes mayores. En total se han diferenciado cinco zonas.

Las condiciones de contorno aplicadas en el modelo han sido de dos tipos: de caudal fijo y mixta. En la condición mixta se impone un flujo de agua en función de la diferencia entre un nivel prescrito y el calculado. En los contornos donde el modelo limita con formaciones geológicas de baja conductividad hidráulica se puede suponer que los caudales que se producen a través de ellos son constantes en el tiempo, por lo que se les ha impuesto condiciones de caudal prescrito constante en el tiempo. En las zonas donde los límites se dan con materiales aluviales o arroyos, el flujo de agua a través de ellos dependerá de la

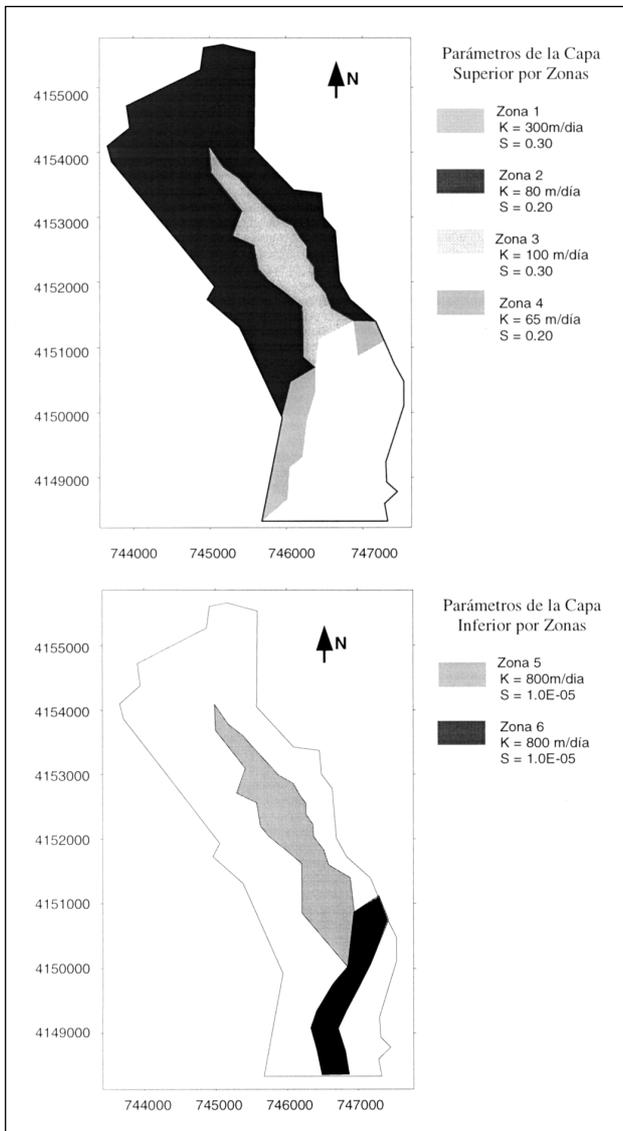


Fig 9.16. Modelo local del aluvial del río Agrio. Zonas de almacenamiento y conductividad hidráulica de las capas (a) superior y (b) inferior.

situación de los niveles en cada tiempo. Para simular este comportamiento ha sido necesario recurrir al uso de las condiciones mixtas. Cuando el límite es con un arroyo, esta condición funciona como el goteo de cualquier río o arroyo, pero cuando es con materiales aluviales su comportamiento e implementación han sido más complejos.

En la capa superior se han utilizado cinco zonas de condición de contorno. En la capa inferior se

han utilizado el mismo tipo de condiciones, haciendo la diferenciación de zonas siguiendo los mismos criterios que en la superior.

Resultados de la modelación de flujo.

Como resultado de las simulaciones realizadas se han obtenido las piezometrías para diversos tiempos del intervalo de simulación. Dado que el modelo es de flujo transitorio, de estas piezometrías se deduce que la componente mayoritaria del flujo a través de la terraza T2 se da en dirección aproximadamente perpendicular al valle, debido al efecto drenante de los ríos y de la mayor transmisividad de la terraza T1.

El funcionamiento hidráulico de la terraza T1 está condicionado a la posición de los niveles. En época de niveles bajos, el gradiente tiene una dirección paralela al valle, siendo despreciable su componente perpendicular a éste. De este modo, en los perfiles de niveles transversales al valle el nivel freático en esta terraza es subhorizontal.

En las zonas marginales al paleovalle el gradiente de niveles adquiere una cierta componente E-O, con el flujo dirigido hacia los ríos o las zonas de mayor transmisividad, es decir, hacia el paleovalle. Durante los períodos de niveles bajos el flujo a través de este paleovalle es paralelo a su dirección. En períodos de niveles altos, el gradiente de niveles en la terraza T1 toma dirección NE-SW en toda su extensión, acentuándose el efecto drenante de los ríos.

El flujo en el aluvial que se encuentra por debajo de la balsa mantiene siempre una componente E-O, excepto en su extremo norte. Durante las épocas de niveles bajos el flujo se dirige desde la balsa hacia el Agrio, mientras que en las de niveles altos existe un cierto flujo desde el aluvial no cubierto por la balsa hacia el que está cubierto.

El comportamiento de los niveles a lo largo del tiempo es parecido en todos los puntos de observación, aunque existen algunas diferencias en función de la posición respecto a ríos y arroyos, y la transmisividad existente en su entorno.

Cuando se produce la recarga existe una respuesta inmediata del acuífero, produciéndose

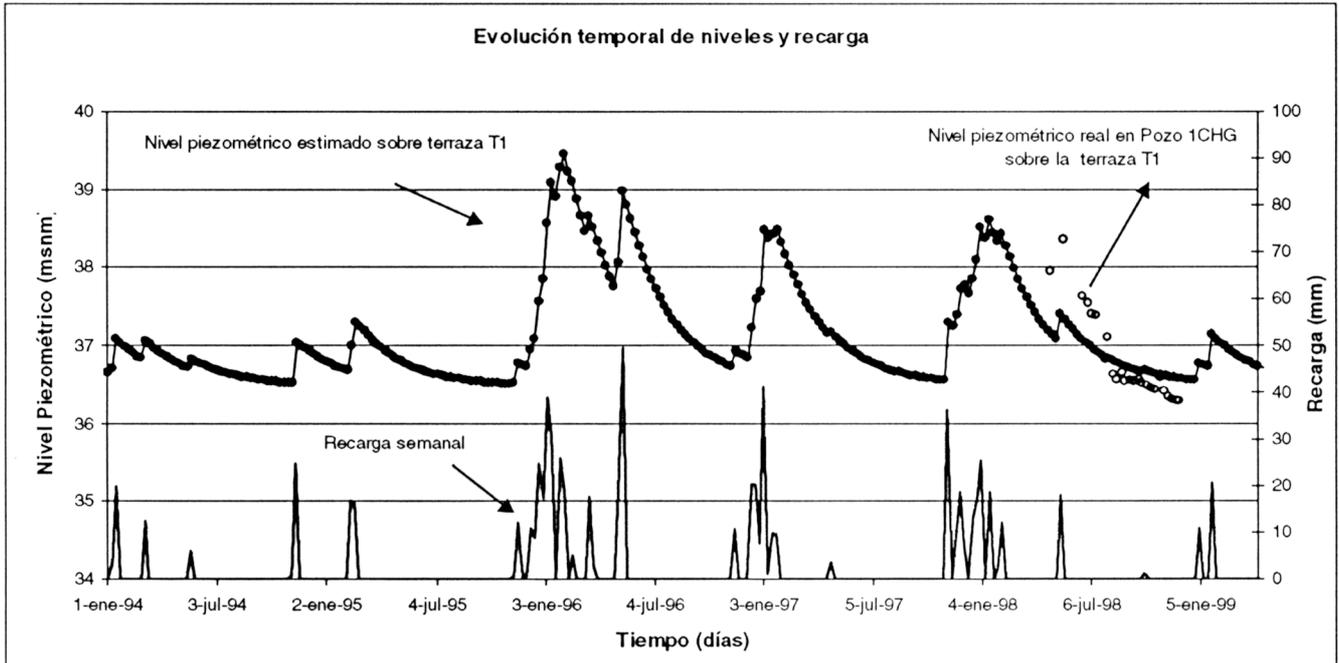


Fig 9.17. Modelo local del aluvial del río Agrio. Evolución temporal de niveles y recarga.

casi instantáneamente una subida en los niveles (Figura 9.17). La recuperación de los niveles es más lenta y está condicionada por la transmisividad, es decir, por la posición de los niveles freáticos en cada tiempo. Por lo tanto, en períodos de niveles altos (mayores transmisividades) la recuperación es más rápida que en los períodos de niveles bajos (menores transmisividades). Este efecto es tanto mayor cuanto menor sea el espesor saturado en el entorno del punto de observación.

En los largos períodos sin lluvia, como los años 1995 y 1997, se puede observar una disminución progresiva en la velocidad de descenso de los niveles, asociado a la correspondiente pérdida de transmisividad. En las zonas donde el nivel se aproxima a la base del acuífero, la velocidad de descenso disminuye mucho.

Componentes del balance de masas

De los componentes del balance de masas global obtenido a partir de la simulación se ha obser-

vado que el error relativo obtenido es menor al 0,5 %, lo que garantiza una adecuada resolución numérica de las ecuaciones. El signo de las diferentes componentes del balance (positivo para las entradas y negativo para las salidas) no cambia en los tiempos de observación establecidos (Figura 9.18).

El 93 % de las entradas al acuífero se da por recarga y entradas laterales a través de los contornos donde el aluvial limita con las margas. Las entradas en el contorno con el aluvial del Guadiamar aguas arriba de la confluencia representan el 7 % restante.

Las salidas del sistema se producen principalmente a través de los ríos y arroyos por goteo (87 %) y, en menor medida, como flujo de agua subterránea a lo largo del contorno sur (11 %). Otras componentes minoritarias son las extracciones de los pozos de la barrera hidráulica de la balsa (1,5 %).

El caudal unitario obtenido en la capa superior es aproximadamente un orden de magnitud inferior

BALANCE DE MASAS

	Area (Ha)	Longitud (km)	Nro. de Pozos	Caudal (Hm ³ /año)		Media anual (mm/año)	Caudal unitario (m ² /día)
				Parcial	Total		
Recarga							
- Infiltración Balsa (RB)	137.02			0.24		33.38	
- Recarga por lluvia	1108.46			8.13	8.37	134.85	
Flujos a través de contornos							
- Caudal prescrito C1 (F1)		10.81		1.53			0.39
- Caudal prescrito C2		15.93		2.25	3.78		0.39
Entradas contorno Guadamar							
- Entrada C1 (E1)		0.85		0.21			0.69
- Entrada C2		0.37		0.71	0.93		5.27
Salidas Contorno Sur							
- Salida C1 (S1)		1.50		-0.28			-0.50
- Salida C2		0.40		-1.22	-1.49		-8.38
Goteo							
- Arroyo Dehesa (G1)		2.29		-0.96			-1.15
- Ríos T2 norte (G2)		3.39		-1.55			-1.25
- Río Agrio y Balsa (G3)		3.39		-4.11			-3.32
- Ríos Agrio y Guadamar (G4)		3.97		-4.82			-3.32
- Arroyo Valdegallinas (G5)		1.33		0.02	-11.41		0.05
Extracciones			15	-0.21	-0.21		-26.93 (l/min)
Almacenamiento	1546.32			-0.05	-0.05		
Error						-0.06	
Error relativo						0.00	

C1 = Capa Superior C2 = Capa Inferior

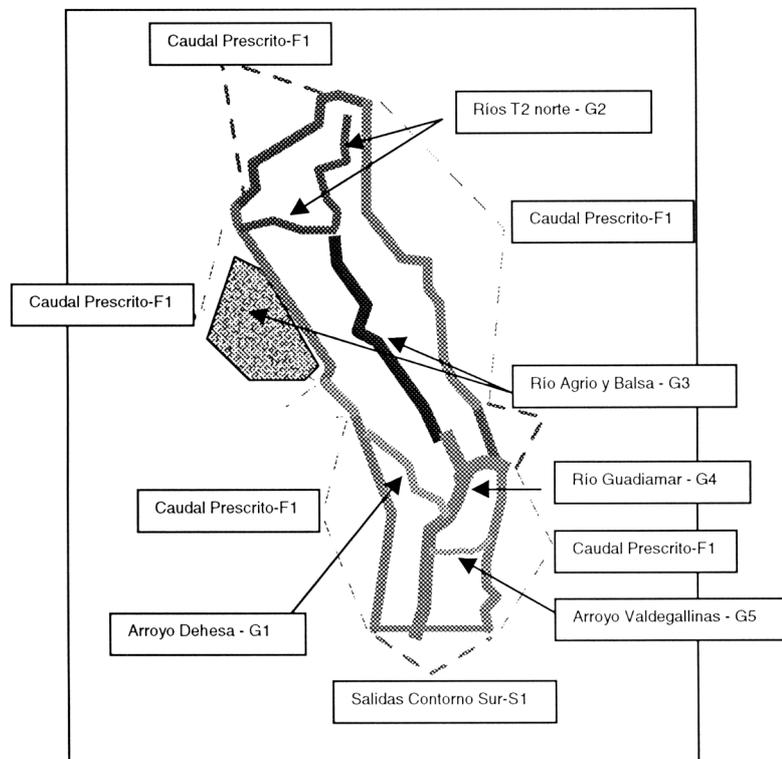


Figura 9.18. Modelo local del aluvial del río Agrio. Balance de masas.

al obtenido para la capa inferior. El caudal que circula por la capa superior es aproximadamente 4 veces menor al de la capa inferior.

El 78 % de las salidas por goteo tienen lugar a través de los ríos Agrío y Guadamar, sobre la terraza T1. Las salidas por goteo en la zona de la terraza T2, al norte de la confluencia de los dos ríos, representan el 13 % del total, con caudales unitarios tres veces menores a los obtenidos en el Guadamar y Agrío (en la terraza T1). El 9 % restante sale a través del Arroyo de la Dehesa, con caudal unitario similar al de la última zona.

Conclusiones

Del modelo del acuífero aluvial del Agrío se concluye que el flujo responde al esquema presentado en la Figura 9.15. En esencia, la mayor parte del agua proviene de entradas laterales. La mayor parte de la salida tiene lugar hacia el río. La interacción entre río y terraza T1 es muy activa. Es decir, el nivel en dicha terraza se mantiene prácticamente igual al del río. Es importante destacar que, en las condiciones de simulación, el río se ha mantenido como drenante.

REFERENCIAS

- Bernet, O., 1999. Estudio hidrogeológico del acuífero del entorno de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar. Modelo de flujo no lineal en medio poroso saturado. Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cataluña, 114 pp.
- BOLIDEN, 1998. Programa de restauración. Informe de GolderAssociates-Aurensa para Boliden Apirsa s.l., v.1.
- Castro, A., 1998. Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su Entorno. Tesina de Master. Universidad Politécnica de Cataluña. 134 + Anejos pp.
- Custodio, E. y Palancar, M., 1994. Las aguas subterráneas en Doñana. Revista de Obras Públicas, Madrid. 142 (3340):31-53.
- CHG, 1998. Estudio hidrológico del río Guadamar. Proyecto Doñana 2005. Actuación n.º 8. Proyecto de control y permeabilización de la marisma de Doñana frente al río Guadalquivir, al brazo de la Torre y a Entremuros (Ref. 06/98).
- CGS, 1998a. Inventario de fincas afectadas. Informe final de la Compañía General de Sondeos para la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir CHG.
- CGS, 1998b. Piezometría en el valle del río Guadamar y entorno de los acuíferos Almonte-Marismas y Aljarafe.
- CGS, 1999. Resumen de resultados de las campañas piezométricas realizadas durante 1998 y 1999.
- CHG, 1999. Datos de aforo del Guadamar. Alturas/caudales a lo largo del Guadamar.
- De Haro, J.M., Giráldez, J.V., Ordóñez, R., Custodio, E., Iglesias, M., Manzano, M. y López, J., 1998. Variación temporal de la recarga en el Parque Natural de Doñana. En prensa.
- Iglesias, M., Custodio, E., Giráldez, J.V., Manzano, M., Ordóñez, R., 1996. Caracterización química de la lluvia y estimación de la recarga en el área de El Abalarío, Doñana, Huelva. 4TM SIAGA, Almería, 1996, pp. 99-121.
- Iglesias, M., Trick, T., Custodio, E., Manzano, M. y Giráldez, J.V., 1998. Estado actual de conocimiento de la recarga en el acuífero de Doñana. 1TM Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería, 25 pp.
- Iglesias, M., 1999. Características hidrogeoquímicas del flujo del agua subterránea en El Abalarío, Doñana, Huelva. Tesis Doctoral, UPC.
- ITGE, 1992. Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Publ. Instituto Tecnológico Geominero de España, Col. Informes aguas subterráneas y geotecnia, 64 pp., 2 mapas.
- Galarza, G., Medina, A. y Carrera, J., 1996. TRANSIN III - Fortran code for solving the coupled non-linear flow and transport inverse problem. ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña: 182 pp.
- IRYDA, 1976. Informe final de los sondeos del Plan Regable Almonte-Marismas y síntesis hidrogeológica, Tomo I, 110 pp.
- Jaén, M., 1999. Caso Aznalcóllar: Modelo tridimensional de flujo y transporte subterráneo de contaminantes en el enlace del acuífero aluvial del río Guadamar con el acuífero Almonte-Marismas. Tesina de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cataluña, 127 +Anejos.
- Manzano, M., Custodio, E., Poncela, R., 1991. Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de la hidrodinámica de los acuíferos en el área de Doñana. El agua en Andalucía - ITGE.
- OTR-CMAJA, 1999. Topografía digital del aluvial del Guadamar-Agrío. Oficina Técnica del Corredor Verde del Guadamar, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Padilla, F., 1999. Una nueva metodología para la modelización conjunta de las aguas subterráneas y superficiales. IV Congreso Métodos Numéricos en Ingeniería. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla (en prensa).
- Padilla, F., Secretán, Y. y Leclerc, M. 1997. On open boundaries in the finite element approximation of two-dimensional advection-diffusion flows. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 40: 2493-2516.
- Poncela, R. 1993. Análisis del funcionamiento hidrogeológico

del Parque Nacional de Doñana en el entorno del arroyo de La Rocina. Tesis de Maestría en Hidrología Subterránea, Universidad Politécnica de Cataluña.

Salvany, J.M. y Custodio, E., 1995. Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. Rev. Soc. Geol. España, 8 (1-2): 21-31

Salvany, J.M., Mediavilla, C. y Mantecón, R., 1999. Geología del valle aluvial del Guadiamar y del sector NO de las marismas del Guadalquivir. Proyecto CYCIT-FEDER, Universidad Politécnica de Cataluña (informe inédito): 24 pp.

Trick, T. 1998. Impactos de las extracciones de agua subterránea en Doñana. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.