

**INFORME FINAL DEL PROYECTO:
ASISTENCIA TÉCNICA A LA EMPRESA
ESTATAL AGUAS DE LAS CUENCAS
MEDITERRÁNEAS, S.A.**



24 de marzo de 2009

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del proyecto Asistencia Técnica a la Empresa Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas, S.A. es dar asesoramiento a dicha empresa pública en materia de aguas subterráneas, aportando los conocimientos regionales, científicos y técnicos del IGME.

Para ello se estableció un contrato de asistencia técnica con vigencia entre los años 2005 y 2009 mediante el cual el IGME desarrollaría una serie de trabajos en función de las necesidades del momento con motivo de la implantación del programa AGUA del Ministerio de Medio Ambiente.

Dentro de este marco se establecieron unas líneas básicas sobre las que se solicitó asistencia técnica:

- Desalación de agua de mar.
- Desarrollo de nuevos aprovechamientos de aguas subterráneas.
- Eliminación de salmueras mediante inyección profunda.
- Gestión conjunta de aguas superficiales y aguas subterráneas.

El resultado fue la elaboración de 7 informes sobre actuaciones específicas en las provincias de Castellón, Alicante y Málaga:

1. Actuaciones sobre el manantial salino de Meliones (Málaga).
2. Posible extracción de agua marina a través del acuífero de Cabo Roig (Alicante).
3. Desarrollo de programas para captación de agua subterránea en la provincia de Castellón.
4. Nota técnica sobre la viabilidad de captación de agua de mar a través de sondeos en el acuífero de Fuengirola (Málaga).
5. Nota técnica sobre las alternativas de ubicación de sondeos de captación de agua de mar para la alimentación de una planta desaladora y evaluación de las opciones de vertido de la salmuera de rechazo de la planta de Oropesa (Castellón).
6. Nota técnica sobre el estado de las unidades hidrogeológicas 06.07 Bédar-Alcornia; 06.08. Alto-Aguas y 06.09. Campo de Tabernas. Provincia de Almería.

7. Posibilidades de explotación sostenible del acuífero del río Vélez en el marco de las actuaciones de consolidación de los regadíos del plan Guaro (provincia de Málaga). Fase inicial.

En el anexo de este informe se presentan todos los trabajos realizados. Estos documentos, no obstante, se fueron entregando en el Centro de Documentación del IGME, a medida que fueron redactados, por lo que se pueden consultar de manera individual.

2. EQUIPO DE TRABAJO

En la realización de los trabajos participó el siguiente equipo técnico del IGME:

Julio López Gutiérrez.

Juan Antonio López Geta

Miguel Mejías Moreno

Bruno Ballesteros Navarro

Ramón Aragón Rueda

Juan José Durán Valsero

José Manuel Murillo Díaz

José Luis García Aróstegui

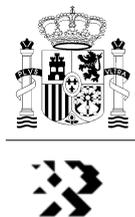
Jorge Enrique Hornero Díaz

ANEXO. INFORMES REALIZADOS

Nota técnica sobre el manantial salino de Meliones (Málaga) y las posibles actuaciones sobre el mismo

Madrid, abril de 2005





Índice

	página
Introducción	4
Antecedentes	4
Aspectos geológicos e hidrogeológicos del manantial de Meliones	5
Análisis de las alternativas existentes	6
Conclusiones y recomendaciones	7



Nota técnica sobre el manantial salino de Meliones (Málaga) y las posibles actuaciones sobre el mismo

Introducción

El manantial de Meliones se localiza en el denominado Estrecho de Meliones, atravesado por el Río Guadalhorce, en la cola del Embalse del Guadalhorce, término municipal de Antequera, provincia de Málaga, en el ámbito hidrológico de la Cuenca mediterránea andaluza.

La peculiaridad más notable de dicho manantial es el alto contenido salino de sus aguas, que han vertido al embalse, en los últimos años, unas 90.000 toneladas de sal anuales. El caudal de este manantial, pese a que sólo se poseen datos de aforos discontinuos, se ha estimado por diversos métodos entre 10 y varios centenares de litros por segundo, dependiendo de las precipitaciones y del nivel de llenado del embalse.

Dicho manantial genera un importante problema de salinización de las aguas embalsadas en los Embalses del Guadalhorce y del Guadalteba, unidos ambos en su coronación, haciendo inviable su utilización para abastecimiento (con una salinidad media estimada en torno a 4000-8000 mg/L).

Antecedentes

Desde los años 70 del siglo pasado se vienen realizando estudios y actuaciones diversas para evitar la salinización de las aguas del embalse, sin éxito apreciable hasta el momento. Dos son las actuaciones más importantes de las llevadas a cabo:

- Una, de tipo directo, sobre las aguas surgentes y su entorno, con la realización de una serie de sondeos para captación del manantial, y posterior bombeo y evacuación de la salmuera a través de un saleoducto hasta el mar.
- Otra, de tipo indirecto, intentando evitar la infiltración en el karst yesífero de Gobantes, considerando este como zona de recarga del manantial, básicamente a través de las dolinas y los sumideros relacionados con la red de drenaje superficial.

En el primer caso, la estrategia dio resultados parcialmente positivos durante un tiempo, bombeándose caudales medios de unos 75 litros por segundo. Los aportes salinos al embalse disminuyeron, con una notable mejora temporal de la calidad de sus aguas. Dos problemas vinieron a truncar dicha estrategia:

- 1) el colapso y hundimiento del entorno inmediato de la captación, por disolución de los materiales salinos del subsuelo.



2) la rotura de la conducción que transportaba la salmuera al mar, por múltiples problemas geotécnicos de asentamiento, además de los deslizamientos producidos en varios puntos del trazado. Ambos problemas llevaron al fracaso de la iniciativa, y al abandono de los sondeos y del saleoducto.

En el segundo caso, se realizaron una serie de actuaciones tendentes a sellar sumideros kársticos, a elevar artificialmente las bocas de algunas cavidades, a impermeabilizar con arcilla algunos cauces permeables, y otras similares. Aunque esta actividad no se llegó a realizar totalmente, se detectaron tres problemas que vinieron a paralizar la iniciativa, sin que se conozcan con detalle los posibles resultados de la misma. Por un lado, el intento de evitar la recarga se centró en exclusiva en las dolinas situadas en los cauces, olvidando que existen muchas más dolinas en la superficie del karst y que además la recarga no se realiza en exclusiva sobre éstas: una parte importante de la infiltración se produce directamente sobre el conjunto de la superficie aflorante de los materiales atribuidos al Triásico. Por otro lado, la dinámica del karst yesífero (y salino) es muy rápida, y su respuesta es prácticamente inmediata ante cualquier modificación de las condiciones kársticas naturales. Así, cuando se desviaron algunos cursos de agua superficial para que no se sumieran en las dolinas existentes, se crearon nuevos sumideros aguas abajo, de tal manera que las aguas volvieron a infiltrarse en el subsuelo. Y por último, esta iniciativa no tuvo en cuenta la existencia de limitaciones ambientales de tipo normativo, como son la existencia de importantes colonias de ciertos quirópteros en las múltiples cavidades en yesos existentes, cuya conservación quedo comprometida con las actuaciones realizadas, llegando, esta actuación, a manos de la justicia.

Aspectos geológicos e hidrogeológicos del manantial de Meliones

El manantial de Meliones se ubica en una franja de materiales asignados al Triásico. Presumiblemente se alimenta de aguas meteóricas (su contenido en isótopos estables así lo indica), precipitadas en su entorno cercano. En realidad, el manantial es un conjunto de puntos de emergencia de agua subterránea, situados fundamentalmente a lo largo de unos 400-500 metros en la margen izquierda del río Guadalhorce, si bien por lo general existe uno de mayor entidad que el resto. El área de recarga, aunque desconocida se ha estimado en unos pocos kilómetros cuadrados, mediante la realización de un sencillo balance hidrogeológico. Básicamente, esta área de recarga coincidiría con el afloramiento de un karst yesífero (el karst de Gobantes), que presenta una elevada karstificación superficial, con una alta densidad de dolinas, y subterránea, con presencia de casi un centenar de cavidades, la mayor parte de ellas conocidas y topografiadas, algunas surcadas por ríos subterráneos.

Un hecho destacable es la diferencia entre el quimismo de las aguas típicas del endokarst (sulfatadas cálcicas) y las aguas surgentes en el manantial de Meliones (cloruradas sódicas, con unos 30-40 gr/L de concentración en cloruros). Los sondeos realizados con recuperación de testigo continuo indican la presencia de grandes cantidades de sal a cierta profundidad (más de cien metros), y su ausencia cerca de la superficie. Estas cantidades de sal sugieren la existencia de movimientos halocinéticos de la sal, hacia la superficie, de tipo diapírico, complicando la ya de por sí compleja estructura geológica del área inmediata al manantial.



El Estrecho de Meliones se halla precisamente en la intersección del río Guadalhorce con la franja de materiales triásicos. Al sur, estos materiales están limitados por sedimentos poco permeables atribuidos a los flyschs del Campo de Gibraltar, mientras que al norte el contacto de los materiales del Triásico se realiza con sedimentos detríticos del Mioceno y con depósitos aluviales cuaternarios.

La estructura que presenta el Triásico, en esta zona, es muy compleja, no estando bien determinadas sus relaciones con los sedimentos detríticos del Mioceno ni con los de los flyschs del Campo de Gibraltar, posiblemente debido a la coexistencia y rejuego de contactos mecánicos originados por procesos tectónicos (cabalgamientos, fallas) y otros movimientos de tipo halocinético.

Análisis de las alternativas existentes

Dos alternativas de actuación se plantean en la actualidad:

- alternativa número 1: consiste en la realización de un túnel para desviar el río Guadalhorce entre la entrada y la salida del Estrecho de Meliones, y la construcción de dos presas emplazadas aguas abajo y aguas arriba del manantial. El espacio comprendido entre las dos presas se aprovecharía para almacenar el agua salada del manantial y bombearla, posteriormente, por el saleoducto - que sería reparado para tal efecto - y evacuarla finalmente al mar.
- Alternativa número 2: consiste en dejar el manantial en su estado actual y conducir el agua del pantano, con una salinidad media de 4-8 g/L, a la planta desalobradoradora de El Atabal, situada en las cercanías de Málaga, donde se trataría para hacerla potable, de manera que pudiera utilizarse para el abastecimiento de la ciudad de Málaga.

Ambas alternativas plantean ventajas e inconvenientes.

En la primera alternativa las ventajas serían:

- la solución, en el caso de que resultara exitosa, sería, en principio, definitiva
- se recuperaría la calidad del agua del embalse a niveles adecuados para su uso, bien agrícola o de abastecimiento
- los costes de tratamiento del agua serían baratos

Y los inconvenientes:

- el coste inicial de la inversión es notable
- las incertidumbres son muy elevadas, en relación al comportamiento del manantial, del túnel y de las presas, en un entorno muy dinámico y geotécnicamente muy complicado.
- Existen altos riesgos, por la cercanía de infraestructuras lineales (AVE), en el caso de que se realizara el túnel por la margen izquierda del río
- no es una solución inmediata, necesitaría varios años para su ejecución y puesta a punto
- presenta impactos ambientales notables, aunque puntuales
- existen algunos interrogantes sin resolver (colmatación del espacio entre presas, comportamiento ante avenidas extraordinarias)



En el segundo caso las ventajas serían:

- prácticamente se podría poner en marcha muy rápidamente (la desalobradora está construida y existe una antigua conducción para el posible trazado, en parte, aprovechable)
- no hay riesgo alguno
- es una solución reversible, en tanto que no se hipoteca nada, ni se altera el entorno natural, pudiéndose declarar el karst yesífero de Gobantes espacio natural protegido, como otros ya existentes en la comunidad autónoma andaluza (karst yesífero de Sorbas)
- ambientalmente es impecable, no se toca el río ni el karst
- el coste de inversión es menor (trazado de la nueva conducción)

Y los inconvenientes:

- el problema continúa, latente; el manantial podría presentar en el futuro una mayor salinidad o evolucionar un caudal mayor, llegando a superar la concentración de sales admitidas por la desalobradora
- en ciertos momentos puntuales (grandes avenidas) se podría producir trasvase de agua con cierto grado de salinidad de las capas superiores del Embalse del Guadalhorce hacia el del Guadalteba
- presenta un alto coste de mantenimiento (desalación) y energético

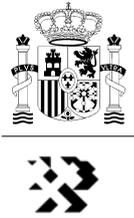
Conclusiones y recomendaciones

Según los conocimientos actuales geológicos e hidrogeológicos del manantial de Meliones y su entorno, analizadas las experiencias previas y teniendo en cuenta las alternativas existentes, se puede concluir que:

- 1.- Existen incertidumbres importantes en la alternativa número 1 (construcción de dos presas y un túnel, y evacuación de la salmuera mediante un saleoducto), con posibles riesgos importantes, una mayor necesidad de inversión inicial y más tiempo de ejecución de las obras necesarias.
- 2.- La segunda alternativa no invalida otras opciones posteriores si las circunstancias cambiasen en el futuro. Se puede poner en marcha en un plazo relativamente rápido, y los costes, aunque posiblemente mayores a largo plazo, son asumibles para el abastecimiento de la ciudad de Málaga, considerando además que tenderán a la baja en un futuro.
- 3.- La segunda alternativa debería estar acompañada de la realización de estudios hidrogeológicos globales que permitieran la investigación en profundidad del manantial de Meliones y su entorno, tratando de encontrar soluciones a largo plazo, ambientalmente asumibles e hidrogeológicamente correctas.

Por tanto, se recomienda:

- 1.- Adoptar e iniciar la segunda alternativa



2.- Poner en marcha un programa de investigación riguroso sobre el acuífero kárstico que abastece al manantial, y un seguimiento del mismo y del embalse.

3.- Tener en cuenta la existencia de la primera alternativa, por si esta fuese necesaria, así como otras soluciones que probablemente surgirán de los estudios a realizar y que sería necesario analizar conjuntamente en el futuro.

Madrid, a 14 de abril de 2005

Fdo. Juan José Durán Valsero
Dr. en Ciencias Geológicas
Jefe del Área de Coordinación Hidrogeológica
Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas
Instituto Geológico y Minero de España

NOTA TÉCNICA
SOBRE LA POSIBLE EXTRACCIÓN DE
AGUA MARINA A TRAVÉS DEL ACUÍFERO
DE CABO ROIG (ALICANTE)

INDICE

	Pag.
1. Objetivo De La Nota Técnica.....	2
2. Documentación Aportada Por ACUAMED.....	2
3. Análisis De La Documentación Utilizada.....	4
4. Análisis De Resultados.....	5
5.Recomendaciones.....	7

1. Objetivo De La Nota Técnica

La presente nota técnica tiene por objeto efectuar una valoración preliminar sobre la posibilidad de llevar a cabo una captación de un caudal significativo de agua marina, mediante sondeos a realizar en las formaciones permeables del acuífero Cabo Roig, situado en la cuenca del Segura, dentro de la provincia de Alicante.

Dicha nota técnica se emite a petición de la sociedad estatal "Agua de las Cuencas Mediterráneas, S.A." (ACUAMED), que solicitó al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el 3 de febrero de 2005, una valoración sobre las posibilidades de extracción de agua marina, para su posterior utilización, previa desalación, a través de extracciones en sondeos a ubicar en el acuífero de Cabo Roig (Alicante), con el objetivo último de disponer de nuevos recursos de agua, para contribuir a la reducción del déficit hídrico de la cuenca del Segura.

2. Documentación Aportada Por ACUAMED

ACUAMED facilitó al IGME para que pudiera proceder a su la documentación que se relaciona a continuación:

- 1) Informe final sobre los sondeos de investigación, para captar agua del mar a través de acuíferos costeros, llevados a cabo en el litoral del sector meridional de la provincia de Alicante. UPCT. Mayo 2001.
- 2) Proyecto para la captación de aguas subterráneas del sondeo río Seco en el T.M. de Pilar de la Horadada (Alicante). RODES, Minería y Aguas, C.B. Diciembre 2001.
- 3) Informe final sobre los sondeos y pozos de investigación, para captar agua del mar a través de 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. Julio 2002.
- 4) Dictamen de valoración del: "Informe final sobre los sondeos y pozos de investigación, para captar agua del mar a través de acuíferos costeros, realizados en el litoral del sector meridional de la provincia de Alicante por el Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura". Prof. Rafael Fernández Rubio. Octubre 2002.
- 5) Ante-proyecto para la realización de una batería de sondeos para la captación de aguas subterráneas en los TT.MM. de Orihuela y Pilar de la Horadada (Alicante). RODES, Minería y Aguas, C.B. Junio 2003.
- 6) 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). UPCT. Septiembre 2004.
- 7) Situación de la intrusión marina en la cuenca del Segura: Evolución desde el TIAC'88. Tomás Rodríguez Estrella. TIAC'03.
- 8) Ubicación de sondeos y desaladoras de agua de mar. Experiencias en la cuenca del Segura. Tomás Rodríguez Estrella, Antonio Pulido Bosch, Cristóbal García García, Pablo Pulido Leboeuf y Francisco del Amor García. TIAC'03.
- 9) Integración de las aguas marinas desaladas, a través de acuíferos, en el abastecimiento de ciudades litorales del sureste español". Antonio Pulido Bosch, Tomás Rodríguez Estrella, Pablo Pulido Leboeuf, Juan Gisbert, Francisco Sánchez Martos, Angela Vellejos, Cristóbal García y Luis Ángel López. Simposio sobre el agua y la ciudad sostenible: hidrogeología urbana. Barcelona 2003.
- 10) Señalización, perforación, terminación y seguimiento de sondeos destinados a extraer agua del mar, para ser tratada en plantas desaladoras. Tomás Rodríguez Estrella, Antonio Pulido Bosch y Pablo Pulido Leboeuf. Simposio sobre el agua y la ciudad sostenible: hidrogeología urbana. Barcelona 2003

- 11) Posibilidades de captación de agua del mar en la cuenca del Segura, a través de acuíferos costeros con intrusión marina. Tomás Rodríguez Estrella. Hidropres. Enero 2003.

La documentación anteriormente enumerada ha sido generada, desde el año 2001, como consecuencia de los estudios y trabajos previos llevados a cabo por iniciativa del Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura, con objeto de disponer de nuevas fuentes de suministro de agua que reduzcan las incertidumbres asociadas a la variabilidad de las aportaciones a la zona.

3. Análisis De La Documentación Utilizada

Examinada la documentación aportada por ACUAMED, así como la existente en el Instituto Geológico y Minero de España, relativa a las características hidrogeológicas del acuífero de Cabo Roig, que se recoge en los informes titulados “Geometría de los acuíferos del Campo de Cartagena (1989)”, “Estudio de la intrusión marina en acuíferos costeros de Murcia y Alicante (1990)”, “Estudio hidrogeológico del campo de Cartagena (1991)”, “Las aguas subterráneas del campo de Cartagena (1994) ” y “Estudio de los recursos subterráneos de agua salobre en los acuíferos de Torre Vieja y Cabo Roig (2002) ”, cabe emitir las consideraciones que se exponen a continuación:

- 1) La documentación aportada por ACUAMED tiene su fundamento en los estudios realizados por el IGME y reproduce las principales conclusiones contenidas en los mismos.
- 2) La documentación aportada por ACUAMED contiene aspectos novedosos que incorporan e interpretan una serie de medidas piezométricas (80) y de conductividad del agua (64), en diez sondeos localizados en dos áreas muy concretas del acuífero, para el periodo de tiempo comprendido entre septiembre de 2003 y mayo de 2004, así como los resultados de los sondeos y ensayos de bombeo, efectuados por la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) con la colaboración de la Universidad de Almería (UA), en las proximidades de la desembocadura de los ríos Nacimiento y Seco.
- 3) La documentación aportada por ACUAMED incluye un programa de trabajo donde se propone la realización de una veintena de sondeos, alineados paralelamente a la costa y a escasa distancia del mar, con objeto de captar, a través de las calcarenitas pliocenas, un caudal de agua de mar comprendido entre 1.000 y 2.000 L/s, con el beneficio añadido de tratar de representar una barrera hidráulica negativa al avance de la intrusión marina. Dicha batería de sondeos se situaría en el sector litoral meridional del acuífero, entre el sur de Cabo Roig y el río Seco.
- 4) El tratamiento del fenómeno de la intrusión marina que efectúa la UPCT, con la colaboración de la UA, está basado en un

planteamiento teórico, en referencias bibliográficas solventes y tiene un dictamen favorable del Profesor Fernández Rubio (Universidad Politécnica de Madrid). Dicho tratamiento, aunque puede considerarse adecuado, precisa profundizar en algunos aspectos, que se especifican posteriormente, y que se han de abordar previamente a la realización de los sondeos de explotación.

Como complemento a la documentación anteriormente citada también se han tenido en cuenta los trabajos que en la actualidad lleva a cabo el IGME, en convenio con la Diputación Provincial de Alicante (DPA), en este acuífero. Dichos trabajos consisten en la revisión y actualización, tanto de datos como del modelo conceptual del acuífero, al objeto de elaborar un modelo numérico de densidad variable que sea capaz de reproducir el funcionamiento hidrogeológico del acuífero y comprender los procesos de intrusión marina que tienen lugar.

4. Análisis De Resultados

A partir de los datos e información contenida en los documentos anteriormente citados se concluyen los siguientes resultados:

- 1) El acuífero de Cabo Roig (codificado en el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura como 07.31.145) está constituido por tres formaciones permeables que de más superficial a más profunda son las siguientes: formación detrítica pliocuaternaria, formación de areniscas calcáreas del Plioceno y formación calcarenítica del Mioceno superior (denominado por el IGME acuífero Andaluciense).
- 2) La formación detrítica pliocuaternaria no presenta unas características hidrogeológicas adecuadas para su explotación y es necesario descartar su aprovechamiento por su bajo interés productivo.
- 3) La formación de areniscas calcáreas del Plioceno reúne características adecuadas para ser objeto de captación de agua marina a través de sondeos, que, en síntesis, son las siguientes: cierto grado de sobreexplotación del acuífero de Cabo Roig; ligeros procesos de intrusión marina; interrelación de esta formación permeable con el mar; conocimiento aceptable de su geometría y de su hidrogeología general
- 4) La formación calcarenítica del Mioceno superior es prácticamente desconocida en la zona de Cabo Roig en lo que se refiere a su posición geométrica (como ha quedado de manifiesto en el sondeo denominado "río Nacimiento II"), a sus características hidrodinámicas e hidroquímicas, a su funcionamiento hidráulico e, incluso, a su relación con el mar.

- 5) Existe discrepancia de datos en cuanto al balance hídrico de la formación de areniscas calcáreas del Plioceno. No obstante se puede considerar que los datos más ajustados a la realidad son los del IGME, tanto en recursos renovables (del orden de 1,7 hm³/año a 2,7 hm³/año) como en extracciones (del orden de 3 hm³/año), pues responden a trabajos recientes de este organismo que se vienen realizando desde el año 2001. De este modo se comprende mejor su situación actual de explotación intensiva y de procesos de intrusión marina, que justificaron su declaración de sobreexplotación por la Confederación Hidrográfica del Segura el 6 de abril de 2004, con informe favorable del IGME, de fecha 6 de mayo de 2002.
- 6) Aunque se conoce con cierta exactitud la geometría del acuífero Plioceno, que constituyen la formación principal a explotar, conviene destacar que existe un importante grado de desconocimiento sobre su continuidad lateral bajo el mar, ya que no se dispone de sondeos, ubicados en el mar, que capten dicho acuífero.
- 7) El espesor de la formación Pliocena aumenta desde unos 30 metros en el borde occidental a algo más de 100 metros en el sector litoral; su posición vertical varía de norte a sur como consecuencia en gran medida de factores tectónicos, pasando la cota de su techo de localizarse a -35 m s.n.m. en el sector del río Nacimiento a ser del orden de -85 m s.n.m. en río Seco. Este hecho se ha puesto de manifiesto a lo largo de la realización del modelo matemático e induce a pensar que existe una cierta incomunicación para la transmisión de agua entre el sector del río Nacimiento y el sector del río Seco.
- 8) De acuerdo con la posición del nivel piezométrico, la formación Pliocena presenta en el sector del río Seco un carácter claramente confinado. Este hecho puede tener su incidencia en la conexión hidráulica con el mar, pues hay que señalar la potencia y reducida permeabilidad de los materiales suprayacentes, que podrían dificultar dicha conexión hacia el sur.
- 9) A pesar de no conocerse el modelo físico de conexión del acuífero con el mar (en los estudios aportados se menciona que el contacto directo debe establecerse mar adentro, a una distancia superior a 5 km de la línea de costa estimada por el buzamiento de la formación y la suave pendiente del fondo marino) parece evidente que dicha relación existe, pues así cabe deducirlo de los datos hidrodinámicos e hidroquímicos obtenidos durante los ensayos de bombeo y en las testificaciones efectuadas en las perforaciones.
- 10) De la perforación realizada en río Seco se deduce que las areniscas pliocenas presentan una permeabilidad vertical variable de acuerdo con su heterogeneidad litológica, de tal modo que las mejores

condiciones se alcanzan en su parte superior, extremo éste que, de confirmarse, es imprescindible tener en cuenta de cara a la productividad de la captación al tener que considerar como explotable únicamente el tramo afectado por la invasión de agua marina.

- 11) Es preciso indicar que las condiciones bajo las cuales se han efectuado los ensayos de bombeo no son exactamente iguales que aquellas bajo las que se llevaría a cabo la explotación, pues en las pruebas se ha captado la totalidad del tramo saturado en agua, mientras que, como ya se comenta en la documentación aportada, en la explotación únicamente se captará la porción de aquel que esté por debajo de la zona de mezcla agua dulce-agua salada, con lo que los parámetros hidráulicos deducidos de los ensayos son considerablemente superiores a los que corresponderán a la situación real. La productividad de los pozos será, por tanto, netamente inferior, con lo que para obtener un volumen anual determinado será imprescindible construir un mayor número de perforaciones. En este sentido hay que advertir, también, que los sondeos ya ejecutados no servirían para su explotación si no se ubican adecuadamente el tramo de filtro y las cementaciones.

5. Recomendaciones

A la vista de lo expuesto se realizan las recomendaciones que a continuación se indican:

- 1) Dado el desconocimiento que existe sobre la geometría y el funcionamiento hidrogeológico de la formación calcarenítica del Mioceno superior se recomienda que dicho nivel acuífero no sea objeto de captación, a no ser que se juzgue de interés, en cuyo caso habría que definir en primer lugar una completa investigación hidrogeológica, que debería incluir un estudio de detalle previamente a la construcción de cualquier obra de investigación que, no obstante, sería imprescindible ejecutar si el estudio resultase positivo.
- 2) El objetivo hoy por hoy de las operaciones de explotación del agua marina debe centrarse exclusivamente en las areniscas y calcarenitas del Plioceno.
- 3) Previamente a la realización de la batería de sondeos que se proponen (que deben efectuarse a lo largo de todo el litoral sur, como se indica en el informe "Ante-proyecto para la realización de una batería de sondeos para la captación de aguas subterráneas en los TT.MM. de Orihuela y Pilar de la Horadada" y no concentrados en las tres zonas que se apuntan en el "Informe final sobre los sondeos y pozos de investigación, para captar agua del mar a través de 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), es necesario ejecutar uno o varios sondeos que se ubiquen y acondicionen de la misma manera que lo harán los futuros de explotación, y llevar a cabo en ellos los correspondientes ensayos de bombeo y pruebas de producción, con el consiguiente seguimiento y control en piezómetros de observación realizados para este fin. De esta manera se estará en condiciones de ajustar las previsiones a la realidad, conocer las posibles afecciones a otros usuarios y determinar y dimensionar el caudal de explotación.

- 4) Es muy conveniente, en cuanto a la óptima ubicación de las captaciones, conocer la posible variación vertical de la permeabilidad de la formación pliocena y la situación de la interfase, con objeto de tratar de optimizar el rendimiento de las captaciones en cuanto a la mayor productividad del tramo a explotar y a su incidencia en los niveles piezométricos. Igualmente se considera necesario determinar la distribución espacial de la interfase mediante la ejecución de sondeos tierra adentro y el uso de las técnicas geofísicas adecuadas, así como analizar la magnitud del proceso de intrusión marina en este sector, ya que los datos disponibles hasta la actualidad no muestran claramente su existencia.
- 5) Es imprescindible disponer de una adecuada red de control de la explotación que diferencie las evoluciones hidrodinámicas e hidroquímicas tanto de la zona de agua dulce como de la marina y de la de mezcla entre ambas.
- 6) Finalmente hay que indicar que el IGME, en convenio con la DPA, está terminando un completo estudio hidrogeológico de este acuífero, que incluye un modelo numérico de densidad variable, el cual, una vez adecuadamente calibrado y validado, constituirá una herramienta imprescindible para conocer la incidencia de la explotación de agua marina a través del Plioceno y para diseñar, mediante las oportunas simulaciones, la alternativa de extracción que resulte óptima. Asimismo será eficaz para la toma de decisiones ante posibles variaciones futuras del volumen de explotación por los usuarios del acuífero.
- 7) Podría tener interés la captación del sector litoral del acuífero al norte de Cabo Roig, para ubicar otra planta desaladora en dicho sector o bien complementar a la proyectada. No obstante para conocer las posibilidades reales de esta propuesta se debería llevar a cabo una investigación que tuviese en cuenta las mismas observaciones que se han mencionado para el sector meridional.

La presente nota técnica ha sido elaborada en Madrid y Murcia por el siguiente equipo de trabajo:

Sede central de Madrid

Juan Antonio López Geta

José Manuel Murillo Díaz

Oficina de proyectos de Murcia

Ramón Aragón Rueda

José Luis García Aróstegui

Jorge Enrique Hornero Díaz

Madrid a 8 de Abril de 2005

NOTA TÉCNICA SOBRE
EL DESARROLLO DE PROGRAMAS PARA CAPTACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LA PROVINCIA DE CASTELLÓN

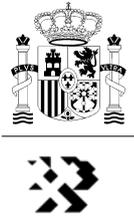
Madrid, 22 de julio de 2005





ÍNDICE

	Página
OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA.....	3
ANTECEDENTES.....	3
ZONAS PRIORITARIAS.....	4
SECTORES DE ACTUACIÓN.....	5
VALORACIÓN TÉCNICA DE LAS PROPUESTAS DE ACTUACIÓN.....	6
SECTOR A. CANET LO ROIG.....	6
SECTOR B. ALCALÁ DE CHIVERT-STA. MAGDALENA DE PULPIS.....	8
SECTOR C. CABANES.....	10
SECTOR D. SIERRA DE LAS PEDRIZAS.....	13
SECTOR E. SUROESTE DE BORRIOL.....	14
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	15
PROPUESTA DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN.....	17
MAPA DE SECTORES DE ACTUACIÓN	



EQUIPO DE TRABAJO

La presente nota técnica ha sido elaborada por el **INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA** interviniendo en su realización el siguiente equipo de trabajo:

Julio López Gutiérrez (Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid)

Miguel Mejías Moreno (Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid)

Bruno J. Ballesteros Navarro (Oficina de Proyectos de Valencia)

Juan Antonio López Geta (Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid).

Coordinación y Supervisión



OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA

La presente nota técnica se realiza a petición de ACUAMED, y al amparo del Convenio de Asistencia Técnica suscrito por esta Sociedad con el IGME. El objetivo evaluar las características hidrogeológicas de 5 sectores de investigación para la captación de aguas subterráneas en la provincia de Castellón.

Para dicho cometido la empresa ACUAMED ha facilitado un documento en el que se expone una propuesta de actuaciones en materia de aguas subterráneas, basada en un informe de la Diputación Provincial de Castellón, en el que se especifican las zonas prioritarias de abastecimiento en la provincia y los volúmenes anuales de agua demandados para cada una de ellas. Se delimitan, igualmente, los sectores para la investigación y explotación de los recursos subterráneos y se indica el número de perforaciones que se considera necesario realizar para cubrir estas demandas, así como los caudales y los volúmenes de captación movilizables en cada uno de dichos sectores.

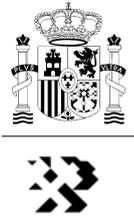
En la nota técnica elaborada se hará una valoración técnica de la mencionada propuesta, analizando uno a uno los sectores de actuación definidos por ACUAMED, indicando al mismo tiempo los aspectos que se consideren idóneos en cada caso ó aquellos que, por sus características técnicas o por las condiciones hidrogeológicas de cada zona, se valoren como no adecuadas. En estos últimos casos se propondrán las alternativas que, en virtud de la información existente y del conocimiento regional de los autores de esta nota, se consideren más apropiadas.

ANTECEDENTES

La zona objeto de estudio se sitúa dentro de la poligonal delimitada por la Unidad Hidrogeológica 08.07, El Maestrazgo, que engloba el Sistema Acuífero Javalambre-Maestrazgo y más concretamente el subsistema Acuífero Maestrazgo.

El IGME viene realizando trabajos de investigación en infraestructura en esta zona desde los años 70, tanto en proyectos propios del Organismo, como en proyectos realizados en colaboración con otras entidades de la Administración Estatal, Autonómica y Local.

En la zona de interés, o en sus proximidades, existen diversos estudios hidrogeológicos entre los que cabe destacar los trabajos realizados por el IGME a través del proyecto PIAS y el informe “Estudio hidrogeológico del Maestrazgo” (IGME, 1989) que recopila y sintetiza los anteriores, así como el proyecto “Garantías de abastecimiento con aguas subterráneas a núcleos urbanos de la Plana de Castellón. Análisis y propuestas de actuación” (ITGE-DPC, 1998) Existen también en la zona diversos trabajos de prospección geofísica destinados a la determinación de áreas



favorables para la explotación de hidrocarburos, así como sondeos con este mismo objetivo. Se encuentra también un cierto número de sondeos profundos perforados, con el objetivo del aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos.

Desde el año 2003 el IGME está desarrollando el proyecto: “Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferos profundos. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 (El Maestrazgo). Desarrollo metodológico”, en el que, como primer resultado, se ha elaborado en abril de 2005 el “Informe preliminar de recopilación y síntesis de la información “ que recoge toda la información geológica e hidrogeológica existente en la zona del Maestrazgo, así como los primeros resultados de las actividades técnicas y de investigación llevadas a cabo.

Por tanto, la presente nota técnica se emite en base a la bibliografía mencionada y al conocimiento de campo de la zona de interés.

ZONAS PRIORITARIAS

Las zonas prioritarias de abastecimiento se sitúan en la proximidad de la costa de la provincia de Castellón, entre las localidades de Almazora, al sur, y Vinaroz, al norte, donde la demanda se supone elevada debido al desarrollo turístico de áreas como las planas de Oropesa y Vinaroz, o la localidad de Benicasim, así como la importante actividad industrial desarrollada en torno al sector cerámico en áreas como Alcora-San Juan de Moró, y el eje Alcora-Castellón de la Plana.

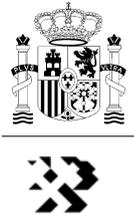
De acuerdo con la documentación facilitada, las zonas prioritarias para abastecimiento a partir de las actuaciones previstas son:

- Zona 1: Vinaroz, Benicarló, Peñíscola, San Jorge, Santa Magdalena de Pulpis.
- Zona 2: Alcalá de Chivert, Torreblanca, Oropesa, Cabanes, Vall de Alba, Pobla de Tornesa, Villafamés.
- Zona 3: Benicasim, Castellón de la Plana, Almazora, Borriol, San Juan de Moró, Alcora.

El volumen total movilizable es de 44 hm³/año, distribuidos de la siguiente forma:

- Zona 1: 16 hm³/año
- Zona 2: 15 hm³/año
- Zona 3: 13 hm³/año

En cada una de las zonas prioritarias de abastecimiento se propone un programa de investigación de aguas subterráneas. Para las zonas 1 y 2 el programa de investigación se denomina “Acuíferos Jurásicos en el área Puertos-Maestrazgo”, que se corresponde con el sector oriental del Subsistema Acuífero del Maestrazgo, mientras que en la zona 3 el programa se denomina “Acuíferos Jurásicos del Mijares”,



que corresponde aproximadamente con el sector oriental del Subsistema Acuífero del Javalambre.

SECTORES DE ACTUACIÓN

Para el abastecimiento de la zona 1 se propone el sector de actuación A o sector de Canet lo Roig, en el que se pretende obtener 8 hm³/año, así como el sector de actuación B, en la Depresión de Alcalá de Chivert, donde se contempla movilizar 8 hm³/año, sumando los 16 hm³/año que se precisan para esta zona. Ambos sectores se ubican en el Subsistema Acuífero del Maestrazgo.

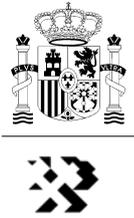
Para el abastecimiento de la zona 2 se proponen los sectores de actuación B, Depresión de Alcalá de Chivert, del que se espera obtener 12 hm³/año, y el sector de actuación C, Cabanes, del que se obtendrían los 3 hm³/año adicionales necesarios para cubrir las necesidades de 15 hm³/año existentes en esta zona. Al igual que en el caso anterior, los dos sectores se ubican en el “Subsistema Acuífero del Maestrazgo”.

Para el abastecimiento de la zona 3 se proponen los sectores de actuación D, Sierra de La Pedriza, y E, Borriol, con 9 y 4 hm³/año respectivamente, para satisfacer las demandas de dicha zona establecidas en 13 hm³/año. Ambos sectores se encuadran en el “Subsistema Acuífero del Javalambre”.

Con respecto a los sondeos contemplados en la documentación facilitada, se hacen las siguientes propuestas:

- Sector A (Canet lo Roig): 4 sondeos con profundidades medias de 800 m y caudales de 100 L/s cada uno, con un total anual extraído de 8 hm³.
- Sector B (Alcalá de Chivert): 5 sondeos de 700 m de profundidad media y 200 L/s de caudal, con un total anual extraído de 20 hm³.
- Sector C (Cabanes): 3 sondeos de 1.100 m de profundidad y caudales de 50 L/s, con un total anual extraído de 3 hm³.
- Sector D (sierra de La Pedriza): 3 sondeos de 700 m de profundidad y 150 L/s, con un total anual extraído de 9 hm³.
- Sector E (Borriol): 2 sondeos de 400 m de profundidad y caudales de 100 L/s cada uno, con un total extraído de 4 hm³/año.

En conjunto suman 17 sondeos, con una profundidad media cercana a los 760 m y rango de variación entre 400 y los 1.100 metros, y una longitud total perforada de 12.900 m.



VALORACIÓN TÉCNICA DE LAS PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

Una vez revisada la documentación facilitada por ACUAMED se ha procedido a analizar las diferentes actuaciones que figuran en la misma, utilizando además documentación de diversas fuentes, destacando la generada en el proyecto “Garantías de abastecimiento con aguas subterráneas a núcleos urbanos de la Plana de Castellón. Análisis y propuestas de actuación” (ITGE-DPC, 1998), así como distintos informes y trabajos realizados por el IGME, entre ellos el que se está desarrollando en la actualidad, titulado “Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 (El Maestrazgo)”. Se ha hecho además especial hincapié en la consulta del inventario de puntos acuíferos del IGME y en la interpretación de la cartografía geológica MAGNA.

SECTOR A: CANET LO ROIG

Este sector de actuación se ubica inmediatamente al norte de la localidad de Canet lo Roig, y abarca el sector norte de la depresión de San Mateo, así como el borde oriental del acuífero del Turmell. En esta zona el acuífero principal viene definido por calizas y dolomías que abarcan desde la base de las formaciones jurásicas hasta el tránsito Cretácico-Jurásico, con una potencia de hasta 1.000 m, que constituyen el acuífero del Turmell. Estas formaciones desaparecen hacia el este por la acción de una ó varias fracturas de directriz catalánide, situándose entonces bajo los sedimentos pliocenos y cuaternarios que conforman la depresión de La Cenia y la Plana de Vinaroz-Peñíscola.

La cota de la superficie piezométrica del acuífero jurásico en el borde oriental del Turmell es de unos 260 m s.n.m., siendo la cota media del terreno de unos 350 m s.n.m., lo que significa que el nivel piezométrico se encuentra a una profundidad media de 90 m. Sin embargo, en el entorno inmediato de Canet lo Roig, los niveles piezométricos se encuentran en localizados en torno a los 50 m s.n.m., lo que implica un salto piezométrico de unos 200 m que debe obedecer a una posible desconexión hidráulica a nivel del jurásico, provocada por la presencia de una falla de dirección NE-SO que se encuentra fosilizada por los sedimentos pliocuaternarios. Este accidente tectónico sellaría el límite oriental del acuífero del Turmell condicionando el flujo subterráneo en este sector, que adquiriría una componente N-S.

Por este motivo, y con el fin de evitar captar el acuífero a una profundidad excesiva, cuya magnitud exacta estaría por determinar, y teniendo en cuenta los niveles piezométricos referidos, se estima conveniente circunscribir el sector de investigación A solamente al borde oriental del acuífero del Turmell, emboquillando directamente los sondeos en los materiales correspondientes a la formación Portlandiense-Kimmeridgiense superior.



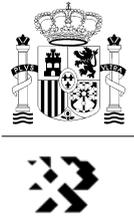
En el sector seleccionado la potencia total del acuífero Jurásico puede ser del orden de los 1.000 m, de los que los primeros 85 m corresponden a calizas con finas intercalaciones margosas del Portlandiense-Valanginiense, seguidos de 100 m de dolomías masivas grises del Kimmeridgiense superior y unos 120 m de margas arcillosas y calizas del Oxfordiense-Kimmeridgiense medio. La serie jurásica subyacente es desconocida en este lugar, ya que no aflora ni ha sido atravesada en los sondeos que existen en el entorno. Sin embargo, y de acuerdo con los datos del sondeo petrolífero Maestrazgo 1, se espera que los materiales atravesados a partir de los primeros 310 m, descritos anteriormente, correspondan hacia el muro a: un primer tramo entre 50 y 200 m de margocalizas del Calloviense, seguido de una barra oolítica y posibles dolomías de Bathoniense de unos 100 m de espesor. Le seguiría un tramo de calizas margosas y margas del Bajociense-Aalenense correspondientes a las formaciones Margas de Turmiel (20 m) y Margas del Cerro del Pez (< 10 m), entre las que se intercalan las calizas bioclásticas de la formación Calizas de Barahona (40 m). Las formaciones basales y más potentes corresponderían a las calizas bioclásticas de la formación Cuevas Labradas (100 m) y las brechas dolomíticas de la Formación Cortes de Tajuña (50 m).

De acuerdo con la información extraída de sondeos cercanos, se estima que el nivel piezométrico se sitúa en torno a los 260 m s.n.m., lo que corresponde a una profundidad de unos 90 a 110 m, como ya se ha mencionado anteriormente.

Cabe señalar que según la información facilitada por ACUAMED sobre los caudales que está previsto obtener en este sector, se espera que los sondeos alcancen rendimientos de 100 L/s con depresiones dinámicas de 100 m. De acuerdo con los datos del ensayo de bombeo del sondeo Rosell, situado al norte del sector de investigación propuesto y que capta los primeros 300 m del acuífero jurásico, la transmisividad de este tramo del acuífero es de 20 m²/día, lo que corresponde aproximadamente a un caudal específico de 0,2 L/s/m e implica descensos dinámicos cercanos a los 200 m para obtener un caudal de tan solo 40 L/s. Este bajo rendimiento de las formaciones jurásicas no es infrecuente en el área del Maestrazgo, donde incluso se han obtenido caudales muy bajos en algunos sondeos por lo que, siendo cautelosos, es de suponer que en principio los caudales esperados pueden ser bastante inferiores. En este sentido, caudales del orden de 50-70 L/s podrían ser valorados como más próximos a la realidad.

La profundidad de investigación, de 800 m, se considera apropiada, ya que se atravesaría gran parte de la serie jurásica, aunque el número de sondeos para obtener los 8 hm³/año que se precisan dependerá del rendimiento de los mismos (serían necesarios del orden de cuatro con los caudales mencionados).

Como solución más recomendable se propone realizar un sondeo de 800 m de profundidad procediendo a su estimulación mediante acidificación y posterior desarrollo para mejorar su rendimiento, y en base a los resultados obtenidos determinar el número definitivo de sondeos.



A la vista de estas consideraciones se puede estimar que para la obtención del volumen requerido ($8 \text{ hm}^3/\text{año}$) pueden ser necesaria la ejecución de unas seis perforaciones con una profundidad de 800 metros.

SECTOR B: ALCALÁ DE CHIVERT-STA. MAGDALENA DE PULPIS

Se extiende sobre los afloramientos jurásicos existentes al oeste de la depresión de Alcalá de Chivert, en concreto en la zona de los montes de Murs o Valdancha Oriental.

En este sector se esperan extraer $20 \text{ hm}^3/\text{año}$, de los que 8 se destinarían a la zona 1 y los 12 restantes a la zona 2, mediante 5 sondeos con una profundidad media de 700 m, en los que se prevé obtener caudales de 200 L/s con depresiones de 5 metros del nivel estático.

De acuerdo con los datos analizados, el nivel piezométrico se sitúa a una cota de entre 10 y 15 m s.n.m., lo que hace que en el borde este de la sierra de Valdancha Oriental, en su articulación con la fosa de Alcalá de Chivert y único lugar en el que sería accesible el acuífero jurásico ya que el resto del sector presenta relieves abruptos, el nivel se encuentre a una profundidad de entre 160 y 180 m de profundidad. En este área el flujo tiene una dirección ONO-ESE, hacia el mar, con un gradiente muy bajo, del orden del $1 \text{ }^0/_{00}$.

El acuífero principal en esta zona está constituido por el tránsito Jurásico-Cretácico (Portlandiense-Valanginiense) y el Kimmeridgiense superior-Portlandiense. El tránsito Jurásico-Cretácico alcanza una potencia de unos 160 m constituidos por una sucesión de calizas y dolomías con finas intercalaciones métricas de conglomerados calcáreos con arcillas, y calizas arenosas, y el Kimmeridgiense-Portlandiense constituido por 250 m de calizas y calizas dolomíticas. Por debajo y hacia el muro de la serie se disponen 100 m de calizas arcillosas del Kimmeridgiense inferior-medio, que pueden actuar como tramo de baja permeabilidad.

En consecuencia con lo expuesto, se deduce que los sondeos propuestos, de 700 m de profundidad, tendrían como objetivo tanto el tramo acuífero Valanginiense-Kimmeridgiense superior como los materiales subyacentes a las calizas arcillosas anteriormente descritas, constituidas por calizas y dolomías del tramo Lías-Dogger-Oxfordiense y que corresponderían a un acuífero inferior cuyo nivel de conocimiento todavía escaso.

Sin embargo, los caudales que se esperan obtener de cada uno de los sondeos propuestos, cifrados en 200 L/s según el documento presentado, parecen demasiado optimistas, a tenor de las productividades conseguidas por los sondeos ya existentes que, aunque sólo captan el tramo superior del acuífero, son del orden de 45 a 50 L/s con descensos de 45 m e implican caudales específicos de 1 L/s/m.



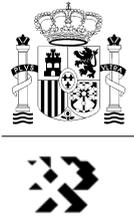
Hay que tener en cuenta, además, que la cota piezométrica se encuentra en torno a los 15 m s.n.m. por lo que descensos superiores a este valor suponen un cierto riesgo de intrusión marina. Esta circunstancia es especialmente importante, y ha de ser valorada cuidadosamente, ya que se ha podido constatar una circulación preferencial del flujo subterráneo a través de conductos kársticos, favorecida por acción de los procesos de disolución a los que se encuentran sometidos este tipo de formaciones geológicas de carácter carbonatado. Esto implica a su vez que no es recomendable extraer caudales punta muy elevados en una sola captación (aunque sus características lo permitan). En este sentido se estima que, en principio y a falta de estudios más precisos, las evaluaciones realizadas sobre los caudales de explotación de los sondeos propuestos no deben superar los 100 L/s.

Por los motivos expuestos en el párrafo anterior, se recomienda distribuir las futuras extracciones en un área más amplia de la que figura en la propuesta, y que se extienda a la totalidad de la fosa de Alcalá de Chivert (Sector B1), desde esta localidad hasta el norte de Sta. Magdalena de Pulpis, y localizada preferentemente en el área más occidental de la misma con el fin de evitar un posible efecto de desconexión en el borde oriental. Se estima que, de esta forma, se podrían obtener sin problemas unos 8 hm³/año en el sector de Sta. Magdalena de Pulpis, y otros 6 hm³/año entre esta localidad y Alcalá de Chivert.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se considera que sería necesario la realización de unos seis sondeos con una profundidad de 700 m, cuyo caudal de explotación estaría en torno a los 100 L/s. Con estas actuaciones se podrían obtener 14 hm³/año en este sector.

Hay que resaltar, que no es descartable que una explotación de recursos mayor en este sector, hasta completar los 20 hm³/año considerados, pueda provocar procesos de intrusión marina, debido a las especiales características del acuífero, que ya han sido comentadas. En consecuencia, el incremento de la explotación en este sector queda a expensas de los resultados y datos reales que se obtengan a partir de los ensayos a llevar a cabo en los sondeos propuestos. El momento actual del conocimiento de la hidrogeología del acuífero del Maestrazgo induce a ser prudente y proponer ampliar las áreas de investigación a otras zonas con objeto de completar los volúmenes demandados en este sector.

Por los motivos comentados y en el sentido aludido, para los 6 hm³/año restantes que se precisan sería recomendable investigar el acuífero jurásico en la cercana depresión de San Mateo (Sectores B2 y B3), así como el acuífero cretácico (Gargasiense-Cretácico superior) en el sector de Villanueva de Alcolea (Sector B4) que, si bien tienen el inconveniente de una superficie piezométrica localizada a más profundidad, presentan la ventaja de su mayor distancia al mar, con lo que el riesgo de sufrir procesos de intrusión marina queda descartado.



Se estima que en los sectores comprendidos entre San Mateo y Salsadella el nivel piezométrico se encuentra a una profundidad de unos 270 m lo que implica una cota piezométrica en torno a los 60 m s.n.m y entre Cuevas de Vinromá y Torre Endoménech, en torno a los 20 m s.n.m. lo que sitúa el nivel a una profundidad de 180 m en la primera localidad y en unos 260 m en la segunda. En el conjunto de estas zonas se estima como posible volumen extraíble 4 hm³/año, para lo que sería necesario la realización 4 sondeos de 800 metros de profundidad, con caudales del orden de 45 L/s.

Con respecto al acuífero cretácico en el sector de Villanueva de Alcolea, el nivel piezométrico se sitúa a una cota promedio de 66 m .s.n.m. que equivale a una profundidad de unos 280 m. De acuerdo con los datos de ensayos de bombeo disponibles, la transmisividad calculada en captaciones de este sector es media-baja, lo que equivale a rendimientos algo reducidos, con caudales que podrían estar en el entorno de los 40 L/s. En este sector podrían obtenerse unos recursos de 2 hm³/año, repartidos en un total de 2 sondeos de 450 m de profundidad aproximadamente.

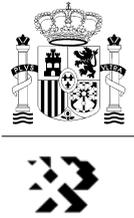
Hay que resaltar que la explotación de los sectores de la depresión de San Mateo y de Villanueva de Alcolea dependería finalmente de los resultados obtenidos en el sector de Alcalá-Sta. Magdalena de Pulpis, pudiendo considerarse arriesgado incrementar la explotación del acuífero en este sector por encima de los 14 hm³/año.

Independientemente de los aspectos puramente hidrogeológicos que han motivado esta propuesta de ampliación del sector B, con esta opción se pueden abordar alternativas infraestructurales de abastecimiento, ya que desde los sectores B3 y B4, e incluso desde B2, se puede plantear el apoyo a los abastecimientos asignados al desde el sector C (Cabanés-Vall de Alba-Villafamés-Puebla de Tornesa), tanto por proximidad como por la orografía del terreno, en el caso de que en las captaciones de Cabanés no se obtuviesen los rendimientos esperados.

SECTOR C: CABANES

Los materiales aflorantes en este sector, de forma muy simplificada, corresponden en la mitad occidental del sector C a materiales pliocuaternarios de tipo aluvial y en la mitad oriental a materiales carbonatados de edad Cretácico Inferior y Cretácico Superior (básicamente Cenomaniense) y Dogger (Jurásico). Al norte del sector aparecen afloramientos correspondientes a arcillas y areniscas del Oligoceno y Mioceno y al Sur cabe destacar la presencia de materiales triásicos, en los bloques situados entre Villafamés y Oropesa.

Desde el punto de vista tectónico el sector se caracteriza por una sucesión de horst y fosas delimitadas por fallas que en la mitad occidental se encuentran ocultas por los rellenos pliocuaternarios.



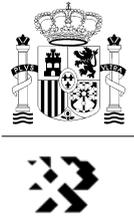
A escala más local, la zona se encuentra afectada por dos condicionantes geológicos con importantes repercusiones hidrogeológicas. Por un lado, la ausencia de Lías atribuida a movimientos intralíasicos que impidieron su sedimentación, dando lugar al denominado “Umbral del Maestrazgo Meridional”, cuyo límite, aunque de complicada delimitación, podría situarse ligeramente al Norte de la población de Cabanes, con dirección NO-SE. Posteriormente, durante el Dogger y el Malm se produce sedimentación marina y durante el Kimmeridgiense (Malm) se produce una reactivación de la emersión del Umbral sedimentario, que continúa durante el Portlandiense (Jurásico Superior) hasta el inicio del Gargasiense (Cretácico Superior), faltando estos términos en la zona situada al sur del límite del Umbral. Los términos más superiores del Gargasiense se depositan sobre toda la zona, cubriendo completamente el Umbral.

Por otro lado, los movimientos tectónicos posteriores a la formación del Umbral han dado lugar a discontinuidades que desplazan su límite inicial, dificultando todavía más su ubicación espacial y, por tanto, la determinación a priori de la columna litoestratigráfica prevista para un punto determinado.

La columna del sondeo 302380008 situado al norte de la localidad de Cabanes, con una profundidad de 545 m muestra de techo a muro un tramo de 120 m (0-120 m) de dolomías y calizas del Gargasiense que se disponen sobre 80 m predominantemente margosos que se atribuyen al Bedouliense (120-200 m). Le siguen 20 m de margocalizas del Kimmeridgiense superior (200-220 m), 5 m (220-225 m) de calizas también del Kimmeridgiense superior, 70 m (255-325 m) de calizas grises del Kimmeridgiense inferior, 130 m (325-455 m) de calizas y calizas margosas del Kimmeridgiense inferior y 90 m (455-545 m) de calizas microcristalinas y micritas del Oxfordiense-Lías).

En este sondeo el nivel piezométrico se encuentra a una profundidad de 270 m, lo que sitúa la cota del mismo a 14 m s.n.m. Por ello y de ser correcto el levantamiento litoestratigráfico en la columna del sondeo mencionado, correspondería al nivel del acuífero jurásico dispuesto bajo un tramo cretácico no saturado. Por lo tanto, en este sector C, existe un acuífero regional de interés constituido por las formaciones carbonatadas Jurasicas del Lías y del Kimmeridgiense separados por términos más margosos del Oxfordiense, que, dependiendo de las facies, puede definir zonas en que exista conexión hidráulica entre los dos términos acuíferos. También esta conexión hidráulica entre ambos términos puede producirse por contacto mecánico.

Las posibilidades hidrogeológicas de la zona están influenciadas por dos factores: la presencia del mencionado Umbral del Maestrazgo Meridional, cuyo límite exacto resulta difícil de determinar, y que condiciona la serie litológica a atravesar en función de su posición, y por el grado de fracturación que presenten los materiales carbonatados.



Por encima de estos términos se sitúan algunos niveles acuíferos de interés más local, en litologías de edad Cretácico, cuando las características de éstos dan lugar a un almacenamiento con suficiente interés, siendo su rendimiento, en general, inferior al del acuífero regional Jurásico.

Actualmente no existen datos suficientes de profundidad de nivel piezométrico en la zona para trazar un mapa local de isopiezas con ciertas garantías. Sin embargo, en el marco del proyecto que está desarrollando actualmente el IGME en la zona, mencionado en apartados anteriores, se han realizado varias campañas de medidas de profundidad del nivel piezométrico en la zona. De esta información se desprende que el nivel regional del acuífero Jurásico se situaría entre 10 y 40 m sobre el nivel del mar, lo que supone profundidades de nivel generalmente superiores a 200 m. Asimismo, se ha podido comprobar que tienen lugar importantes oscilaciones de nivel en algunos puntos que deben estar relacionadas con una compartimentación estructural que produce una cierta desconexión hidráulica entre sectores.

Según la documentación facilitada por ACUAMED, en este sector se pretende obtener un volumen anual de 3 hm³/año, mediante tres sondeos con una profundidad media de 1.100 m y caudales de bombeo de 50 L/s por sondeo, cuyo destino sería el sector meridional de la zona 2. Ante esta hipótesis debe tenerse en cuenta que para obtener un caudal de 50 L/s en un sondeo, debería tener un valor de transmisividad en torno a 500 o 600 m²/día, para un descenso teórico de 10 m, lo que supone una previsión algo optimista para que se dé esta circunstancia en los tres sondeos previstos.

De acuerdo con estos aspectos se considera que en principio debería evitarse proyectar perforaciones en la zona afectada por el Umbral del Maestrazgo Meridional, es decir, al sur de línea de dirección NO-SE que pasaría por la parte norte de la población de Cabanes, ya que sería poco probable atravesar materiales correspondientes al acuífero regional Jurásico, en el que, teóricamente, deben centrarse los esfuerzos de investigación.

Al norte del límite mencionado, una primera opción sería la ubicación de sondeos al nordeste de la población de Cabanes, emboquillado sobre materiales cretácicos (Bedouliense-Gargasiense) que a profundidades en torno a 200-400 m atravesarían los materiales carbonatados Jurásicos (Lías-Kimmeridgiense).

Otra opción la constituye el situar los sondeos directamente sobre los afloramientos del Jurásico Superior (Kimmeridgiense) existentes al Norte de la población de Cabanes, suroeste de la población de Torre de Endomenech y al noroeste de las poblaciones de Cabanes y Vall d'Alba, en la Sierra de Engarcerán, opción también contemplada como alternativa de investigación en el sector B.

Los sondeos ubicados sobre afloramientos cretácicos deberían alcanzar profundidades próximas a los 1000 m, con el objetivo de atravesar por completo los materiales de edad Jurásico.



Aunque es difícil establecer una previsión suficientemente precisa por los argumentos expuestos, si se obtuviesen rendimientos de 40 L/s, sería necesario realizar unos 3 sondeos con una profundidad de 1.000 para alcanzar el caudal total requerido.

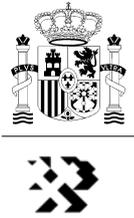
SECTOR D: SIERRA DE LAS PEDRIZAS

Este sector se ubica en el borde suroriental del Subsistema Acuífero del Javalambre, aguas abajo del embalse de Sitchar, y en concreto en la sierra de Las Pedrizas. Esta Sierra está constituida por calizas jurásicas del Malm (Portlandiense-Oxfordiense), que desde un punto de vista hidrogeológico actúan como zona preferente del flujo de 70 hm³/año de transferencia subterránea desde el Subsistema del Javalambre hacia el acuífero detrítico de la Plana de Castellón, circunstancia que está favorecida por los procesos de karstificación a los que se encuentra sometido el macizo carbonatado.

La serie jurásica teórica, de techo a muro, comienza con 250 m de calizas oolíticas y pisolíticas, fuertemente dolomitizadas hacia la base, aunque localmente la dolomitización puede alcanzar el techo de la serie, que corresponden al periodo Kimmeridgiense superior-Portlandiense. Le siguen unos 90 m de calizas tableadas y margas del Kimmeridgiense inferior y 50 m de calizas del Oxfordiense. Continuando hacia la base, aparecen 100 m de calizas oscuras bien estratificadas del Dogger. La serie jurásica termina hacia el muro con unos 200 m atribuibles al Lías en los que se puede distinguir un tramo superior eminentemente margoso y margo-calizo y un tramo inferior constituido por dolomías y carniolas.

La propuesta de actuación que figura en la documentación facilitada por ACUAMED, supone unas extracciones de 9 hm³/año repartidas entre 3 sondeos con una profundidad media de 700 m y un caudal de 150 L/s, cuyo destino sería el abastecimiento de la zona 3 y, en concreto, para el área de Alcora.

De acuerdo con los datos disponibles, en este sector ya existen tres sondeos de 400, 450 y 712 m de profundidad respectivamente, denominados sondeos Las Pedrizas, que han sido construidos e instalados en los últimos años para el abastecimiento urbano de la Plana Baja de Castellón, y que suministran actualmente unos 3 hm³/año, volumen que se irá incrementando progresivamente. La concesión global de explotación de estas captaciones asciende a 8 hm³/año, lo que sumado a los 9 hm³/año de la actuación propuesta, resulta un total de 17 hm³/año. Este volumen habría que detraerlo de los 70 hm³/año de entradas subterráneas al acuífero detrítico de la Plana de Castellón procedentes del Subsistema del Javalambre. La opción de captar estos recursos antes de su salida a la Plana de Castellón se considera a priori como favorable, ya que se trata de un agua de excelente calidad, óptima para abastecimiento urbano y que de otro modo sufriría un deterioro irremediable a lo largo de su tránsito por el acuífero de la Plana de Castellón que, entre otros procesos, iría incorporando diversos tipos de sales, especialmente nitratos, que la harían no apta para el consumo.



La información que se dispone de los sondeos de las Pedrizas, ubicados en el flanco sur de la mencionada sierra, indica que el espesor de la serie jurásica en este sector es mayor de la teóricamente esperada, al menos en lo que respecta al Jurásico superior, ya que los sondeos de 400 y 450 m de profundidad no llegaron a alcanzar el techo del Dogger, mientras que el sondeo de 712 m atravesó la totalidad del Malm y el techo del Dogger. En los aforos realizados se obtuvieron unos resultados excelentes, con caudales específicos de 44 L/s/m. El nivel piezométrico se sitúa a una cota de 44 m s.n.m. lo que significa que la profundidad del agua se encuentra entre los 130 y 160 m en el flanco sur de la sierra.

En línea con lo expuesto, se valora como idónea la selección del sector de investigación D, así como los caudales de bombeo esperados, si bien, y en vista de los resultados obtenidos en los sondeos ya existentes, es posible que no sea necesario alcanzar en todos los sondeos propuestos la profundidad de 700 m, ya que podría quedar reducida entre un mínimo de 400 m y un máximo establecido en ese mismo valor de 700 m. Sin embargo, y teniendo en cuenta que existe un modelo matemático de este sector del Subsistema del Javalambre, actualizado en 1997, se recomienda simular un incremento de 9 hm³/año en las extracciones para tener una idea más precisa de los efectos que estas nuevas explotaciones tendrían sobre el comportamiento del sistema hidrogeológico, en general, y del flujo subterráneo hacia el acuífero de la Plana, en particular.

SECTOR E: SUROESTE DE BORRIOL

El sector de investigación E se ubica en el extremo oriental del Subsistema del Javalambre, y se esperan extraer 4 hm³/año, mediante 2 sondeos de 400 m de profundidad y con caudales de extracción de 100 L/s cada uno, cuyo destino sería el abastecimiento de la zona 3. En este sector, situado entre la localidad de Borriol y el embalse de M^a. Cristina, se ubican la mayor parte de los pozos de abastecimiento a la ciudad de Castellón de la Plana, que actualmente bombean una media de 18 hm³/año, de los 21 hm³/año que consume la ciudad.

Los objetivos de la investigación en esta zona se centran en el acuífero de edad Gargasiense, situado entre el sur de la localidad de Borriol y el embalse de M^a. Cristina, en la zona de conexión del Subsistema del Javalambre con el acuífero de la Plana de Castellón, que está formado por unos 400 m de calizas entre las que se intercalan tramos margosos en su parte central. También pueden ser de interés los afloramientos del tránsito Jurásico-Cretácico, constituidos por calizas, dolomías y brechas dolomíticas, que orlan por el norte el acuífero Gargasiense, si bien todo parece indicar que existe conexión hidráulica entre ambos acuíferos como consecuencia del juego de fracturas subverticales que los sitúan en contacto lateral.

Con los sondeos planificados, de 400 m de profundidad, se investigaría la totalidad del acuífero Gargasiense, mientras que si se quisiera alcanzar el techo del tránsito



Jurásico-Cretácico, la profundidad de investigación debería ser de al menos 700 m. Este hecho, sin embargo carece de importancia si se capta el acuífero Gargasiense en una posición favorable y con buenas características hidráulicas, ya que estos materiales se pueden considerar como un único acuífero en virtud de las conexiones creadas por la intensa fracturación a la que se encuentran sometidas estas formaciones. Por ello sería de interés ubicar los sondeos en los depósitos de pie de monte que orlan los relieves gargasienses en su articulación con la plana de Castellón, al sur y suroeste de la localidad de Borriol.

La superficie piezométrica en esta área se encuentra entre los 30 y los 60 m s.n.m. lo que la hace bastante accesible desde la superficie, cuya topografía varía entre los 100 y 120 m s.n.m., con profundidades del nivel del agua que no rebasan en los casos más desfavorables los 80 m.

En concordancia con lo expuesto, se considera positivamente esta propuesta, tanto en la selección del sector de investigación como en el número y profundidad estimada para los sondeos propuestos. Igualmente se consideran como probables los caudales esperados.

El único punto a considerar como menos favorable, es la presencia de numerosas captaciones en este sector, entre ellas las doce que abastecen a la ciudad de Castellón, que extraen una media de 18 hm³/año, y que habrán de ser tenidas en cuenta a la hora de la ubicación definitiva de los sondeos que se proponen.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El actual conocimiento geológico e hidrogeológico de los subsistemas acuíferos del Maestrazgo y del Javalambre, y el análisis de diferentes tipos de datos y experiencias previas sobre los sectores considerados, han permitido establecer las siguientes conclusiones en relación con la propuesta formulada por ACUAMED sobre el desarrollo de programas para la captación de aguas subterráneas en la provincia de Castellón:

1. Para el sector de actuación A se estima que la profundidad de 800 m establecida para los sondeos de investigación es apropiada, si bien se considera necesario que éstos sean emboquillados directamente sobre los materiales jurásicos del Portlandiense-Kimmeridgiense superior del borde oriental del acuífero del Turmell. Sin embargo, existen serias dudas de que se puedan obtener los caudales previstos de 100 L/s, en virtud de las características hidráulicas de los materiales jurásicos en zonas próximas. Estimaciones acordes con los datos existentes apuntan a que estos podrían estar entre los 50 y los 70 L/s.



2. En el sector de actuación B se recomienda diversificar el área de extracción, ampliando las zonas de investigación a la totalidad de la depresión de Alcalá de Chivert, y, dependiendo de los resultados, a la depresión de San Mateo y al acuífero cretácico en la zona de Villanueva de Alcolea. Al igual que en el caso anterior, los caudales de extracción de 200 L/s se consideran demasiado optimistas teniendo en cuenta los rendimientos conseguidos en captaciones del entorno.
3. En el sector de actuación C, el objetivo sería el acuífero jurásico existente bajo los materiales gargasienses. La profundidad de investigación de 1.000 m asegura atravesar la totalidad de los materiales jurásicos. Al igual que en los sectores A y B, los caudales de 50 L/s que se supone que se van a obtener parecen algo elevados.
4. En el sector de actuación D, el área de investigación de la sierra de las Pedrizas, es el más apropiado, aunque la profundidad de investigación original de 700 m podría reducirse a un intervalo entre 400 y 700 m. En este caso los caudales que se esperan obtener, de 150 L/s, sí se consideran factibles.
5. En el sector de actuación E, la investigación debería centrarse en el acuífero Gargasiense, siendo las zona más accesibles los pié de monte que orlan los relieves cretácicos al S y SO de Borriol. En este caso la profundidad de investigación de 400 m asegura la captación de la totalidad de la serie gargasiense. Los caudales de extracción de 100 L/s que se esperan obtener se consideran probables.
6. En general, la evaluación de las zonas de investigación propuestas, así como la profundidad de los sondeos y el potencial rendimiento de éstos, está basada en la información generada en estudios e informes previos realizados a partir de principios de la década de los setenta, y en el conocimiento personal adquirido a lo largo de los años sobre la zona objeto de análisis por los autores de esta nota. Sin embargo, es conveniente que para la ubicación definitiva de cada uno de los sondeos propuestos se lleven a cabo estudios específicos, apoyados por un reconocimiento de campo detallado.
7. Por último, se puede considerar que los caudales asignados en el informe de ACUAMED para las captaciones propuestas son demasiado optimistas en los sectores A, B y C, mientras que en los sectores D y E son más acordes con la realidad. Por ello se recomienda realizar en todos los casos una estimulación por acidificación y un desarrollo adecuado en los primeros sondeos perforados en cada zona de investigación. El análisis de los resultados de estas perforaciones, junto con los rendimientos obtenidos, permitirán orientar con mayor precisión los programas de investigación en cada sector.



PROPUESTA DE PRIORIDADES DE ACTUACIÓN

Independientemente de las prioridades condicionadas por aspectos logísticos o infraestructurales por parte de ACUAMED, en esta nota se establecen unas prioridades de las actuaciones atendiendo básicamente a dos criterios:

1. seguridad de obtener los caudales requeridos a la profundidad prevista.
2. necesidad de mejorar el conocimiento de sectores concretos

Con respecto al primer criterio, de obtener los recursos requeridos, la fiabilidad proviene del estado del conocimiento hidrogeológico, así como de la existencia de sondeos en los que se obtengan rendimientos similares a los requeridos. Según estos criterios los sectores prioritarios de actuación serían, **D (sierra de las Pedrizas)** y **E (Borriol)**. En el primero existen tres sondeos de abastecimiento que captan el acuífero jurásico del Subsistema del Javalambre, en los que se efectúan bombeos de 200 L/s. El caudal específico de estos pozos es de unos 44 L/s/m. En el segundo de los sectores propuestos, se disponen actualmente varios sondeos de abastecimiento a Castellón de la Plana, en los que se captan materiales cretácicos (Gargasiense) y del tránsito Jurásico-Cretácico, en los que se efectúan bombeos con caudales del orden de 100 L/s.

En cuanto al segundo criterio, los sectores de actuación se pueden incluir en el apartado de necesidad de mejorar del conocimiento hidrogeológico, en aras de evaluar la posibilidad de obtener recursos con un grado de garantía suficiente. En este caso se da prioridad a aquellos sectores menos conocidos, pero que pueden disponer de recursos aprovechables. Atendiendo a este criterio se consideran prioritarios los sectores: **A (Canet lo Roig)**, **zona norte del sector B1 (al norte de Santa Magdalena de Pulpis)** y **el sector B4 (Cretácicos de Villanueva de Alcolea)**. En estos sectores solo se perforaría un único sondeo, con la profundidad indicada en el apartado correspondiente a cada sector, ya que su finalidad es de tipo exploratorio.



LOS AUTORES DE LA NOTA TÉCNICA

Fdo.: Julio López Gutiérrez

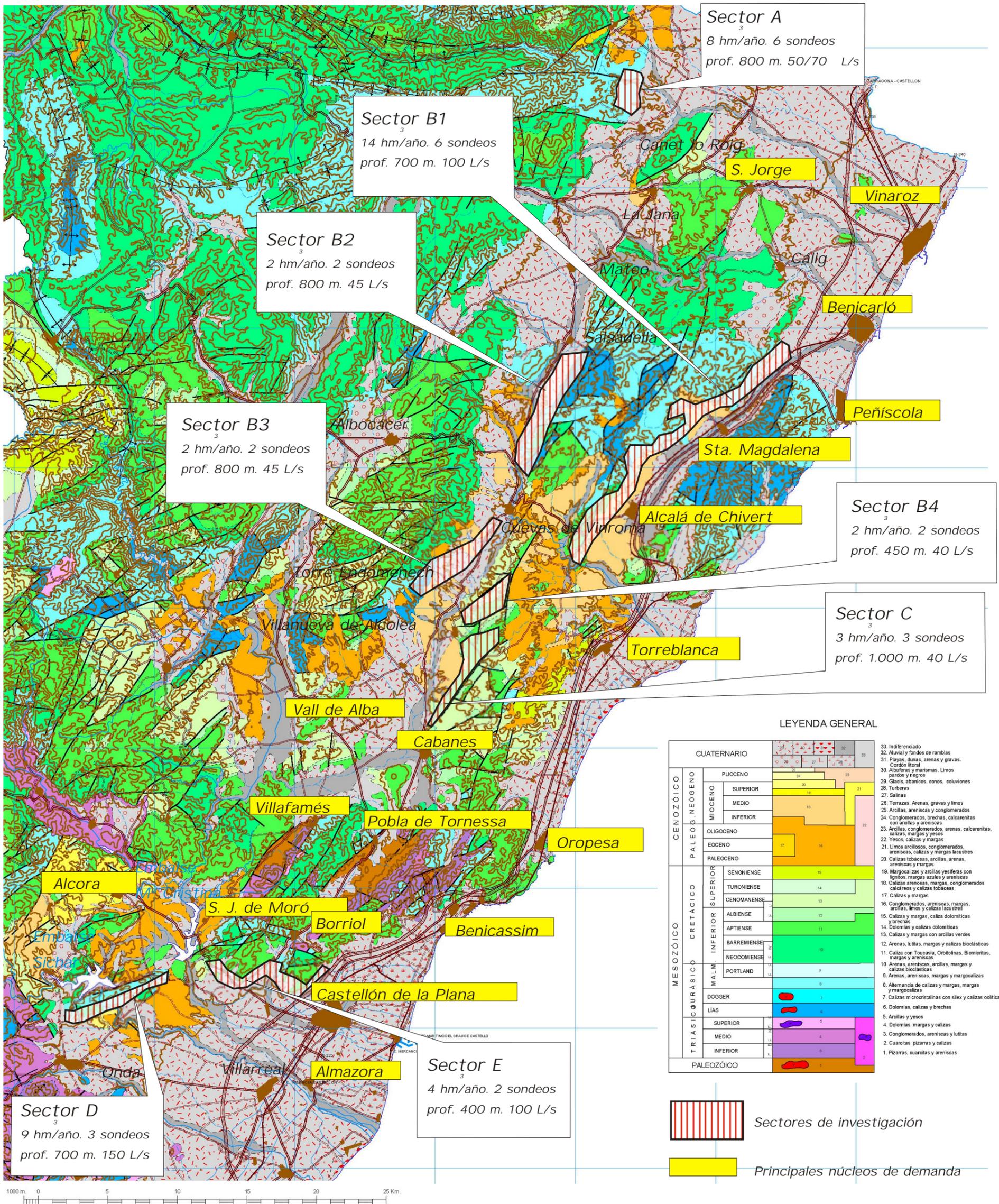
Fdo.: Miguel Mejías Moreno

Fdo.: Bruno J. Ballesteros Navarro

Vº Bº

Fdo.: Juan Antonio López Geta

MAPA DE PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS



NOTA TÉCNICA SOBRE EL DESARROLLO DE PROGRAMAS PARA LA CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA PROVINCIA DE CASTELLÓN

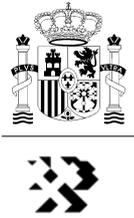
**NOTA TÉCNICA SOBRE
LA VIABILIDAD DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR A
TRAVÉS DE SONDEOS EN EL ACUÍFERO DE
FUENGIROLA (MÁLAGA)**

Madrid, 24 de febrero de 2006



ÍNDICE

	Pág.
Equipo de trabajo.....	2
1. OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA.....	3
2. ANTECEDENTES.....	3
3. CAUDALES REQUERIDOS.....	4
4. GEOLOGÍA.....	5
4.1. MARCO GEOLÓGICO.....	5
4.2. GEOLOGÍA LOCAL.....	7
5. HIDROGEOLOGÍA.....	9
5.1. MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	9
5.2. HIDROGEOLOGÍA LOCAL.....	10
5.3. CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	13
5.4. USOS DEL AGUA.....	14
5.5. INFRAESTRUCTURA DE ABASTECIMIENTO.....	14
6. VIABILIDAD PRELIMINAR DE LA OPCIÓN DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR A TRAVÉS DE SONDEOS DE CAPTACIÓN EN EL ACUÍFERO CUATERNARIO DE FUENGIROLA.....	16
7. ZONAS DE ACTUACIÓN.....	17
8 PROPUESTA DE ACTUACIONES.....	17
9. ANEXO FOTOGRÁFICO.....	22
10. BIBLIOGRAFÍA.....	23



EQUIPO DE TRABAJO

La presente nota técnica ha sido elaborada por el **INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA** interviniendo en su realización el siguiente equipo de trabajo:

Julio López Gutiérrez (Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid)

Juan Antonio López Geta (Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid).

Coordinación y Supervisión



1. OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA

La presente nota técnica se realiza a petición de ACUAMED, S.A., al amparo del Contrato de Asistencia Técnica suscrito por esta Sociedad con el IGME. El objetivo es evaluar la posibilidad de captar agua de mar a través de sondeos perforados en el acuífero detrítico cuaternario de Fuengirola, en la provincia de Málaga, con el fin de alimentar a una planta desaladora situada en el entorno de la desembocadura del río Fuengirola.

Por parte de la empresa ACUAMED, S.A., se ha facilitado el caudal diario requerido, así como la ubicación aproximada de la planta desaladora.

En esta nota técnica se hará una primera aproximación a la posibilidad de captar agua de mar mediante sondeos, a partir de la información previa existente, indicando en su caso los trabajos complementarios que se consideran necesarios para poder valorar de manera más precisa las posibilidades reales de aprovechamiento.

2. ANTECEDENTES

La zona objeto de estudio se sitúa dentro de la poligonal delimitada por la Unidad Hidrogeológica 06.39 denominada Fuengirola, que tiene una superficie de 66 km², y que engloba al Subsistema Acuífero Costero Cuaternario de Fuengirola, con una superficie aflorante de unos 15 km².

El grado de conocimiento hidrogeológico de esta unidad no es demasiado alto aunque existe una caracterización general aceptable. En este sentido destacan los trabajos realizados por el IGME a través del proyecto PIAS sintetizado en 1983 en el estudio: "Investigación Hidrogeológica de las Cuencas del Sur de España (Sector Occidental)", así como los informes y notas técnicas realizados por el IGME sobre el control de la piezometría y la intrusión marina durante los años 80 y la primera mitad de los 90.

En el año 1988 se realizó un trabajo relacionado con el funcionamiento y la gestión del acuífero costero de Fuengirola (López Geta, *et al.*, 1988), y en el año 1992 el IGME elaboró una nota técnica sobre posibles alternativas para abastecimiento de agua a Fuengirola, en la que se hace una puesta al día del estado de las infraestructuras de abastecimiento del municipio de Fuengirola, haciéndose además una revisión litoestratigráfica de los materiales que constituyen las unidades hidrogeológicas existentes en el entorno del municipio.



En el año 2003, se hace una revisión del estado de la intrusión marina del acuífero aluvial de Fuengirola, (Gómez Gómez, *et al.*, 2003).

Hay que remarcar la ausencia de trabajos de geofísica por parte de las Administraciones Públicas en este acuífero, lo que restringe el grado de conocimiento de la geometría de las unidades geológicas que lo conforman. Por ello, para abordar este aspecto, aunque sea de manera preliminar, se ha recurrido a la cartografía geológica MAGNA a escala 1:50.000 (IGME, 1978) y al inventario de puntos de aguas y en concreto a aquellos puntos en los que existe información de las columnas litológicas de sondeo.

3. CAUDALES REQUERIDOS

Los caudales requeridos para la futura planta desaladora de Fuengirola son:

1ª Fase: 100.000 m³/día de agua de mar, para una producción aproximada de 50.000 m³/día de agua desalada, produciéndose un rechazo de salmuera de 50.000 m³/día.

2ª Fase: 200.000 m³/día de agua de mar, para una producción aproximada de 100.000 m³/día de agua desalada, produciéndose un rechazo de salmuera de 100.000 m³/día.

Para la obtención de los mencionados caudales existen dos alternativas:

- a) Toma abierta desde el mar.
- b) Captación de agua salada de origen marino, a través del acuífero cuaternario de Fuengirola.

Cada una de estas opciones tiene las siguientes ventajas e inconvenientes:

Toma abierta desde el mar. La principal ventaja de la toma abierta desde el mar es la obtención de importantes caudales. Éstos, sin embargo, están supeditados a las condiciones del mar ya que los aportes de sólidos en suspensión pueden ser importantes en épocas de temporal. Del mismo modo, los vertidos litorales producen una degradación de la calidad de las aguas marinas así como una alta variabilidad en su composición. Normalmente esta alternativa requiere el uso de sistemas de pretratamiento costosos, así como un mantenimiento in situ de la toma en el mar.

Captación a través de acuíferos. La captación de agua marina a través de acuíferos por medio de bombeo en pozos tiene como principal ventaja la obtención de agua de buena calidad para los fines requeridos, debido sobre todo al efecto de la filtración natural, obteniéndose normalmente aguas con una composición constante. Entre los principales

inconvenientes destaca la disponibilidad de terrenos próximos a la costa para la ubicación de los pozos de captación, que en el caso de requerirse grandes caudales puede ser elevada; el envejecimiento de los pozos de captación, debido sobre todo a su contacto permanente con agua salada, que produce incrustaciones. Además la ubicación y el diseño de los pozos debe establecerse sobre la base de estudios hidrogeológicos contrastados ya que de otro modo se pueden inducir procesos de intrusión marina y la contaminación salina de las captaciones próximas (figura 1).

Actualmente la captación a través de pozos se considera la opción más favorable, ya que una vez construidos los pozos y habiendo conseguido los rendimientos deseados, la operación de captación de agua de calidad no tiene condicionantes ambientales o climáticos como ocurre en las tomas directas.

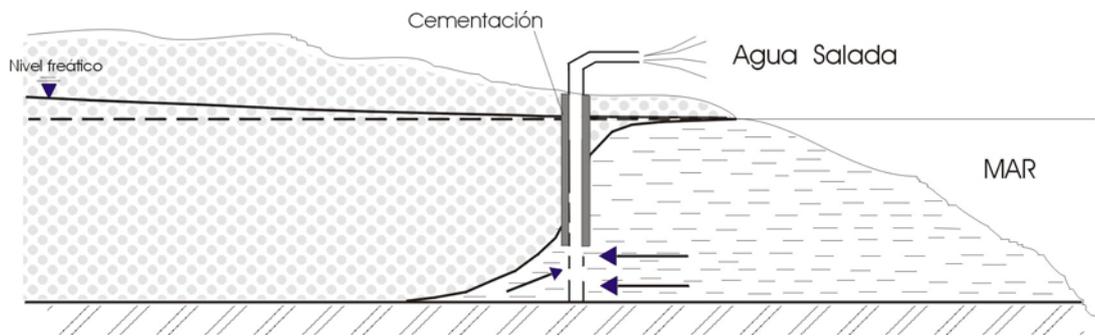


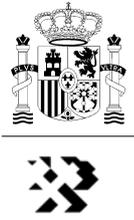
Figura 1. Esquema de captación de agua salada mediante bombeo en un acuífero libre costero. La idea consiste en bombear exclusivamente bajo la interfase, cementado el tramo de pozo situado por encima, con el objeto de evitar o al menos minimizar la entrada de agua dulce del acuífero y evitar la intrusión marina. El agua obtenida tiene una composición constante, prácticamente la del agua de mar, y una calidad excelente para los fines previstos, ya que se somete a un filtrado natural.

4. GEOLOGÍA

4.1. MARCO GEOLÓGICO

El término municipal de Fuengirola se ubica en el sector meridional de la Cordillera Bética, en la zona Bética en sentido estricto. Los materiales aflorantes corresponden a los complejos Alpujárride y Maláguide, de edad Precámbrico-Paleozoico-Triásico, sobre los que se disponen discordantemente sedimentos pliocenos de origen marino, y cuaternarios fluviales, litorales y poligénicos (figura 2).

Los materiales Alpujárrides son en su mayoría de naturaleza silíceo (esquistos, cuarcitas, gneises), y carbonatada (mármoles), aunque también aparecen materiales ultrabásicos (peridotitas del manto de la unidad de los Reales).



Los materiales del complejo Maláguide son de naturaleza metapelítica (fillitas y pizarras), metapsamítica (grauwackas, conglomerados y areniscas), y carbonatada (calizas).

El terciario está representado por sedimentos marinos de edad Plioceno, discordantes sobre el Alpujárride y Maláguide. Están constituidos por alternancias de conglomerados, arenas fosilíferas, arcillas margosas y margas azules, con una potencia que puede superar los 100 m.

Los materiales cuaternarios están representados por los depósitos aluviales del río Fuengirola, constituidos por limos, arenas, gravas y conglomerados, así como por depósitos litorales (conglomerados y arenas de playa), y coluviales (arcillas con pasadas o niveles de gravas).

Desde un punto de vista tectónico, en el sector estudiado predominan las estructuras compresivas de cabalgamiento de dirección promedio E-O, con evidencias de rejugos posteriores como fallas normales de bajo ángulo. Las unidades alpujárrides, sujetas a una importante deformación y un metamorfismo de grado medio-alto (gneisses con sillimanita y granate), ocupan la posición estructural más baja (unidad Blanca), a la que se superponen tectónicamente las peridotitas de la unidad de los reales. Los mantos maláguides ocupan una posición estructural culminante sobre el complejo Alpujárride, presentando una deformación y un metamorfismo menos intenso (fillitas y pizarras). Se identifican además fracturas de dirección NE-SO y NO-SE con movimiento de desgarre, así como pliegues y fracturas de dirección ONO-ESE.

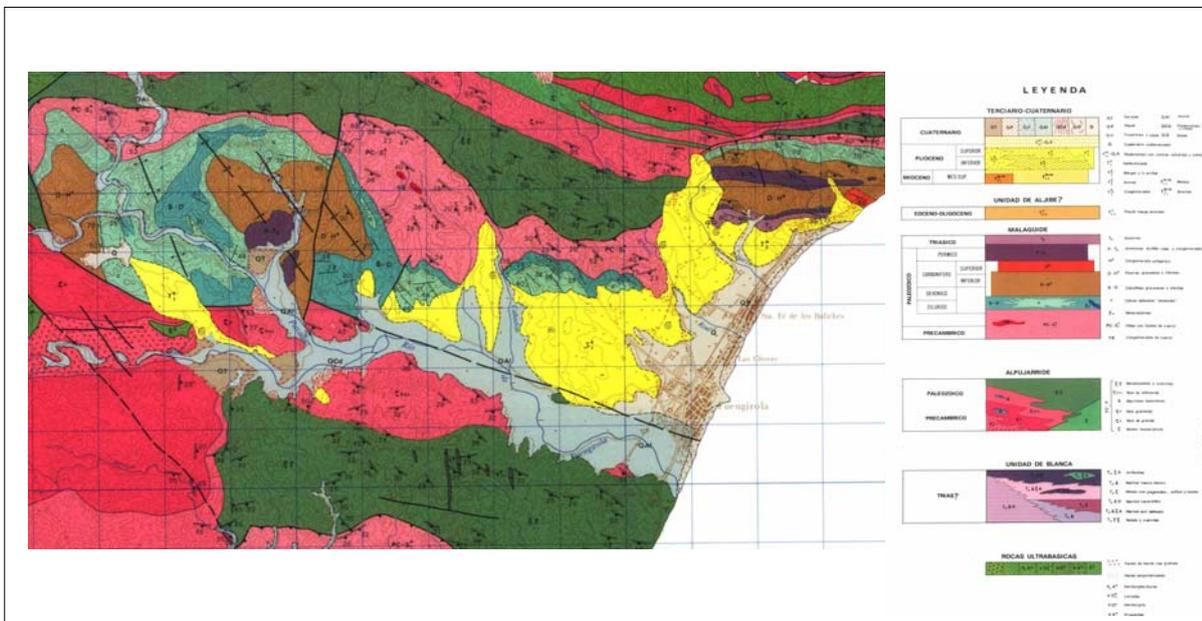


Figura 2. Mapa geológico a escala 1:50.000. Extraído de la Hoja 1.066 Coín (IGME, 1978).



4.2. GEOLOGÍA LOCAL

El modelo geológico local, responde a una pequeña cuenca rellena por un conjunto de sedimentos arcillosos y margosos con intercalaciones de arenas del Plioceno y sedimentos detríticos aluviales y poligénicos cuaternarios, dispuesto discordantemente sobre un basamento metamórfico de baja permeabilidad correspondiente a los materiales maláguides, hacia el norte del término municipal, y alpujárrides al sur.

El Plioceno aflora exclusivamente al norte del río Fuengirola, de manera subhorizontal, orlando los relieves circundantes a la llanura costera sobre la que extiende el núcleo urbano. De acuerdo con la descripción de estos materiales de origen marino, que se hace en la memoria de la cartografía geológica MAGNA de la Hoja 1.066 Coín (IGME, 1978), la serie en la cantera existente al sur de la Serrezuela está formada de muro a techo por:

- 2 m de arcillas margosas azuladas con lentejones de arenas finas amarillentas.
- 2 a 3 m De alternancia de arcillas margosas azuladas y arenas muy finas. El espesor de los niveles de arcillas es de 0,7 m aproximadamente, y el de las arenas de 5 a 10 cm.
- 5 cm de arenas muy finas.
- 2,5 m de arcillas.
- 5 cm de arenas muy finas.
- 5 a 7 m de arcillas margosas azuladas.
- 40 cm de limolitas arenosas compactas.

La abundante fauna y la litología de esta serie permite asignar esta unidad a un medio marino somero de baja energía (limos y arcillas), con intervalos de mayor energía (lentejones de arenas), e incluso episodios de playas (arenas muy finas).

Aunque la serie descrita tiene un espesor de unos 15 m, la columna del sondeo con número 1645-7-228, situado 1 km al sur de la misma, y emboquillado en los mismos materiales pliocenos, muestra la siguiente litología:

- 0-32 m margas amarillentas.
- 32-35 m nivel detrítico con bioclastos.
- 35-100 m margas oscuras.

De acuerdo con la posición del sondeo, la disposición subhorizontal de los materiales en superficie y la columna del sondeo descrita, el espesor de esta unidad es superior a los 140 m.

La presencia de estos materiales bajo el cuaternario aluvial del río Fuengirola queda patente en las columnas de los sondeos 1645-7-185 y 1645-7-186, donde bajo un relleno cuaternario de limos y arenas de 47 y 40 m respectivamente, aparecen margas azuladas atribuibles al Plioceno.



Del mismo modo, bajo el cuaternario coluvial y litoral situado al norte del casco antiguo de Fuengirola, en las proximidades del arroyo Real, y a 30 m de profundidad, aparece la misma serie marga-arenosa pliocena, lo que se pone de manifiesto en la columna del sondeo 1645-7-233.

No se ha constatado la presencia del Plioceno en la margen derecha del río Fuengirola, debido posiblemente a la falta de información de sondeos.

En lo que respecta al Cuaternario, cabe distinguir tres grupos de materiales:

- a) Sedimentos aluviales asociados al río Fuengirola.
- b) Sedimentos poligénicos.
- c) Sedimentos litorales.

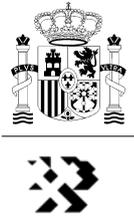
Sedimentos fluviales. El río Fuengirola discurre según una dirección ONO-ESE, hacia el mar, cuyo valle se alinea con la fractura que pone en contacto los materiales de los complejos Alpujárride y Maláguide, lo que posiblemente le confiera un control estructural. Los sedimentos fluviales están asociados a la dinámica fluvial del río Fuengirola. De este modo se distinguen limos de llanura de inundación y arenas y gravas tanto de canal como de desbordamiento en la llanura de inundación.

El espesor de estos materiales, que constituyen el acuífero principal de Fuengirola, se incrementa progresivamente aguas abajo, de modo que en el sondeo 1645-6-0086, situado en la confluencia de los arroyos de la Pasadas y los Pilonos, ambos tributarios del río Fuengirola, el espesor de Cuaternario aluvial es de 12 m, mientras que en el sondeo 1645-7-241, en el tramo medio, el espesor es de unos 40 m, y en los sondeos 1645-7-185 y 1645-7-186, situados aguas abajo de la depuradora, los espesores se incrementan hasta 40 y 47 m respectivamente. Por este motivo, es de suponer que en la desembocadura del río Fuengirola, el espesor de Cuaternario aluvial debe ser superior a 50 m.

Sedimentos poligénicos. Dentro de este conjunto se aglutinan los sedimentos coluviales y restos de conos de deyección que se depositaron en el sector costero, al norte de la desembocadura del río Fuengirola, sobre los materiales pliocenos. Están constituidos por arcillas rojas con niveles o pasadas de cantos de materiales paleozoicos, con ligero buzamiento hacia la costa.

El espesor de estos materiales, de acuerdo con el sondeo 1645-7-233, es de 30 m en la proximidad de la costa.

Sedimentos litorales. Estos materiales están constituidos por arenas finas de playa, y se ubican exclusivamente adosados a la línea de costa. Además, en la proximidad de las desembocaduras de los torrentes en el mar, se producen importantes acumulaciones de bloques y cantos. De acuerdo con la columna de los sondeos 1645-7-231 y 1645-7-232, el espesor de estos materiales es superior a los 4 m.



5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. MARCO HIDROGEOLÓGICO

El acuífero costero de Fuengirola, con una superficie de 15 km², se sitúa en la costa malagueña, a unos 40 km al oeste de la ciudad de la capital e inmediatamente al oeste de la localidad de Fuengirola. Se desarrolla principalmente en el aluvial del río Fuengirola y sus afluentes, y en sector más próximo a la costa en materiales cuaternarios poligénicos y litorales (figura 3).

La cuenca vertiente que alimenta a este acuífero tiene una extensión de 118 km², perteneciendo a la misma el río Fuengirola y sus afluentes, el río Ojén y el arroyo de las Pasadas o Alaminos. Recibe además aportes de la cercana cuenca de los arroyos Real y Pajares, con una superficie de 32 km², que desembocan directamente en el mar al igual que el río Fuengirola.

La precipitación media sobre la cuenca es de 733 mm/año, concentrándose las lluvias en los meses de octubre a marzo, correspondiendo el periodo más seco a los meses de junio a agosto.

La evapotranspiración potencial se sitúa en torno a los 925 mm/año. Considerando una capacidad de campo del suelo de 100 mm, la evapotranspiración real se sitúa en torno a los 450 mm/año, lo que supone un 60 % aproximadamente de la precipitación media de la cuenca.

De acuerdo con estos datos, el balance del acuífero queda establecido de la siguiente manera (ITGE y Junta de Andalucía, 1998):

ENTRADAS

Lluvia directa:	1,5 – 3	hm ³ /año
Infiltración ríos:	14 – 19	hm ³ /año
Retorno de riegos:	1	hm ³ /año
TOTAL	16,5 – 23	hm³/año

SALIDAS

Bombes:	6,5 hm ³ /año
Descargas al mar:	10 – 17 hm ³ /año
TOTAL	16,5 – 23 hm³/año

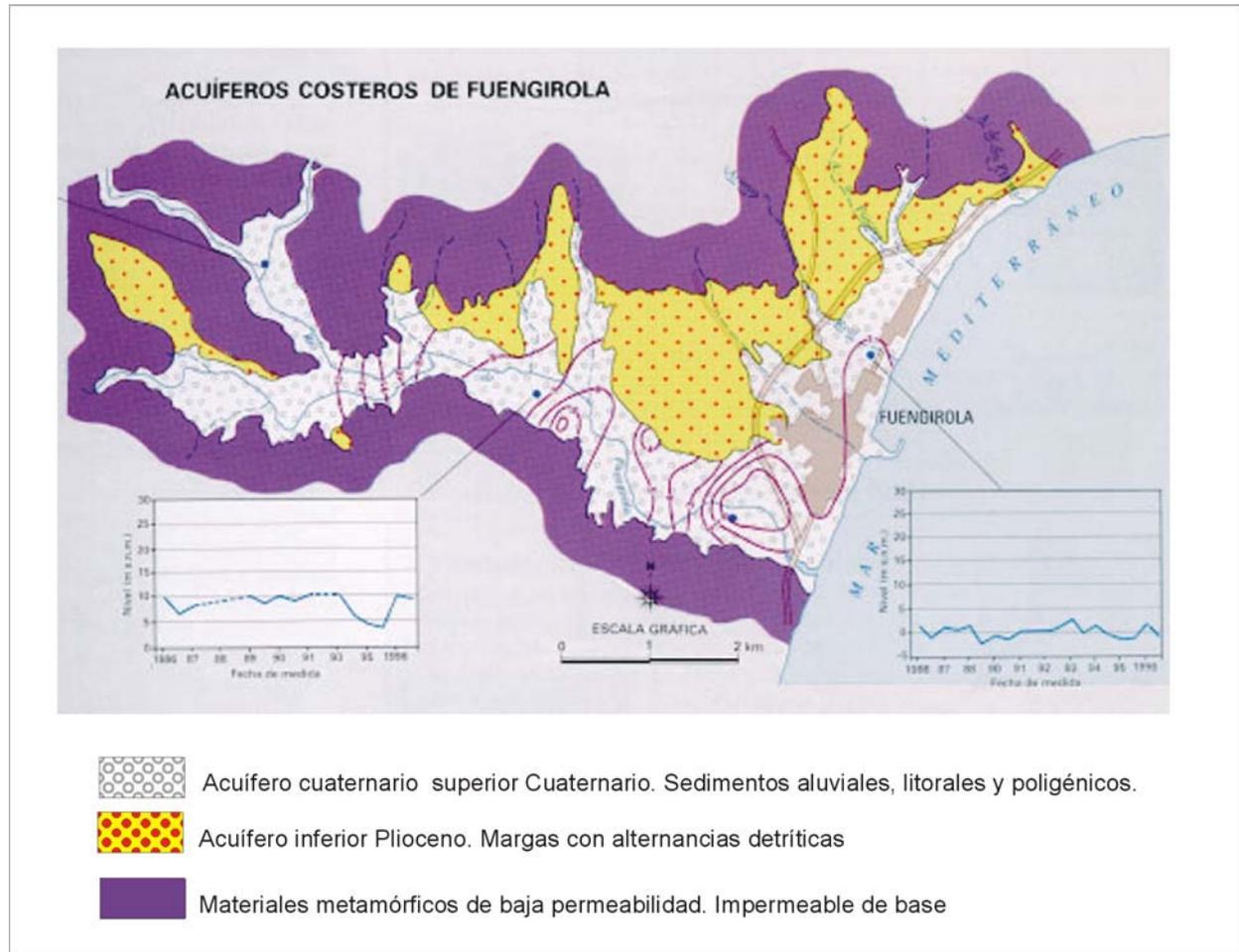


Figura 3. Esquema hidrogeológico del acuífero costero de Fuengirola

5.2. HIDROGEOLOGÍA LOCAL

Desde un punto de vista hidrogeológico local, los materiales aflorantes en el entorno del acuífero de Fuengirola se pueden agrupar en dos conjuntos:



- Materiales de baja permeabilidad: son los materiales metamórficos de los complejos Alpujárride y Maláguide, que constituyen un sustrato de baja permeabilidad sobre el que se depositaron los sedimentos pliocenos y cuaternarios del valle del río Fuengirola y la llanura costera.
- Materiales permeables: son aquellos con capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades más o menos elevadas por lo que pueden presentar interés como acuíferos.

De acuerdo con esta clasificación, en el acuífero de Fuengirola se distinguen básicamente dos acuíferos: uno superior cuaternario, y otro inferior plioceno.

El acuífero superior cuaternario está formado por los sedimentos aluviales ligados al río Fuengirola, y se trata del acuífero principal, donde se ubican los pozos más productivos. También se incluyen en este acuífero los materiales cuaternarios poligénicos que afloran al norte del río Fuengirola, hacia el núcleo urbano y de forma paralela a la costa, aunque su naturaleza más arcillosa le confiere unas características hidráulicas más pobres que al acuífero aluvial en sentido estricto.

La superficie piezométrica del acuífero aluvial muestra una estrecha relación río-acuífero, de modo que en la parte alta el río alimenta al acuífero, mientras que en el tramo bajo es el acuífero el que alimenta el cauce del río. Las isopiezas indican que existe una alimentación del acuífero plioceno hacia el cuaternario. Este hecho tiene relevancia en cuanto a la calidad del acuífero cuaternario, ya que en el plioceno se ha constatado la presencia de aguas congénitas salinas, lo que se debe tener en cuenta a la hora del diseño de los pozos para evitar la contaminación “in ascensum” del acuífero cuaternario.

El flujo subterráneo se establece subparalelo al trazado del río Fuengirola, es decir de ONO a ESE hacia la costa. De acuerdo con los esquemas piezométricos, se pueden calcular gradientes hidráulicos en este acuífero entre 5 y 3 por mil, aunque en el sector próximo a la costa puede ser del 8 por mil.

Sin embargo, bombeos excesivos esporádicos han dado lugar a la formación de conos de depresión que en algunas circunstancias se han situado bajo el nivel del mar, lo que ha provocado problemas de salinización. Este hecho ha quedado patente en los pozos próximos al mar, como el sondeo del Conde en la margen derecha del río Fuengirola y a 1 km en línea recta del mar.

Con respecto a la evolución temporal de la piezometría, en el sector occidental del acuífero se dan las mayores oscilaciones piezométricas, de hasta 4 m. En el sector medio las oscilaciones son menos acusadas, entre 2,5 y 4 m y en la proximidad de la costa las variaciones son inferiores a 1 m.

Los valores estimados de transmisividad son de 720 a 1.440 m²/día, con coeficientes de almacenamiento de 10 a 25%, aunque estos valores son orientativos y deben ser comprobados mediante ensayos de bombeo planificados.

El acuífero inferior plioceno ocupa una extensión de unos 7,5 km², con un espesor medio de 100 m. Sus características hidráulicas son peores que las del acuífero cuaternario, con valores estimados de transmisividad entre 14 y 48 m²/día, y una porosidad eficaz del 1% al 5%, sin que se conozca el valor del coeficiente de almacenamiento. En algunos sectores el potencial hidráulico de este acuífero es más elevado que el del cuaternario, lo que condiciona la alimentación vertical hacia éste y ocasionalmente el confinamiento del Plioceno. Existen aproximadamente unos 70 pozos que captan este acuífero, y existen evidencias de problemas geotécnicos que se han relacionado con la descompresión por bombeo de este acuífero.

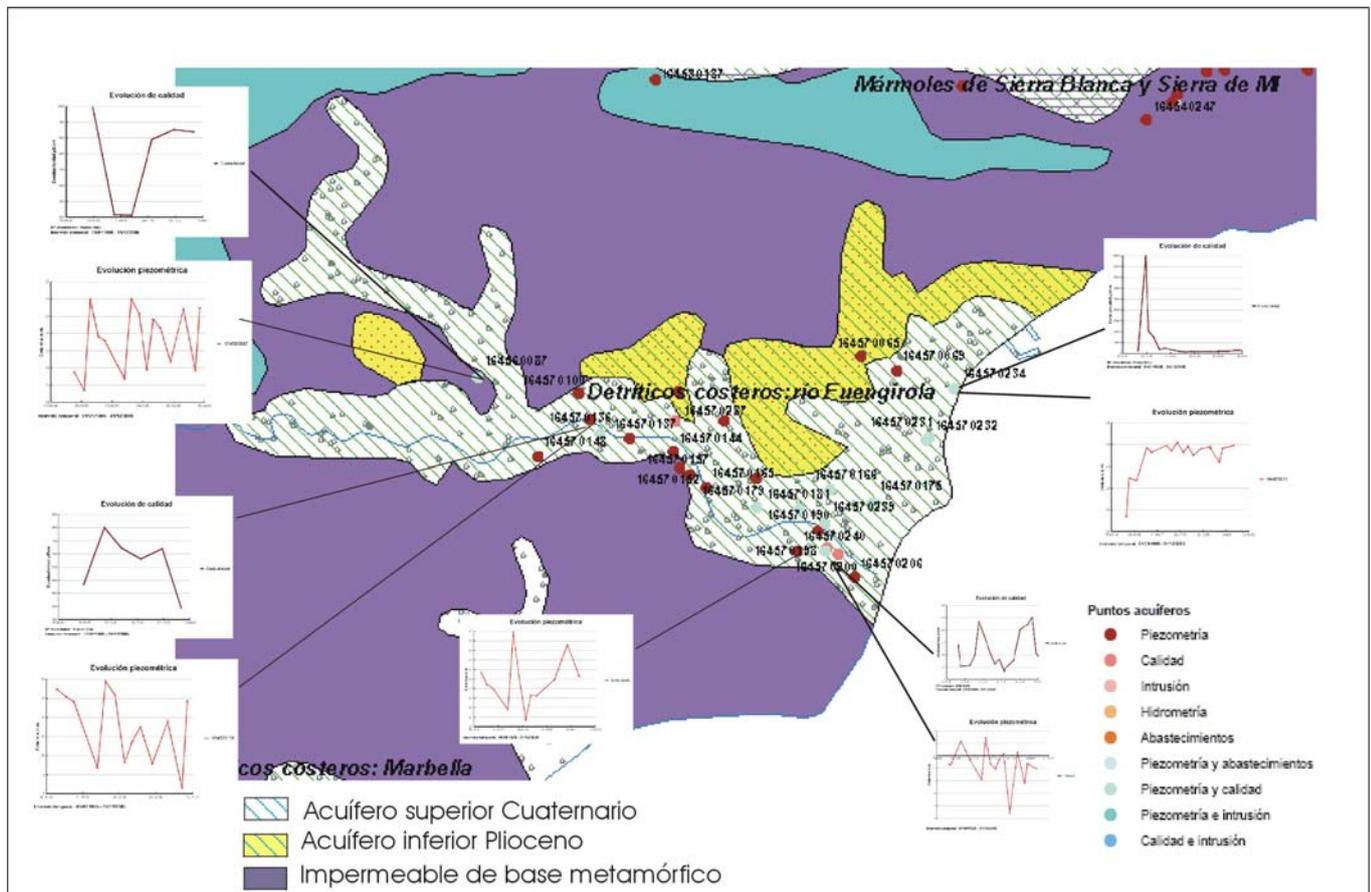


Figura 4. Datos de las redes de control. Evolución de la conductividad eléctrica y la piezometría en distintos sectores del acuífero de Fuengirola



5.3. CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La evolución de la calidad de las aguas subterráneas se ha seguido desde el año 1981 mediante la red de control de calidad, explotada por el IGME a lo largo de los años 80 y 90 (figura 4). En general la calidad de las aguas subterráneas del acuífero de Fuengirola se puede considerar mediocre, debido a una dureza media a elevada y una mineralización considerable, aunque normalmente no se llegan a sobrepasar los límites establecidos para aguas de consumo humano, a excepción de periodos climáticos excesivamente secos y sujetos a fuertes extracciones.

Predominan las facies bicarbonatadas Ca-Mg, sulfatadas Ca-Mg y cloruradas Mg, estas sobre todo en el sector costero. Las aguas de mejor calidad corresponden a las facies bicarbonatadas, y se encuentran asociadas al acuífero cuaternario aluvial y en sectores próximos al río Fuengirola, donde éste recarga el acuífero.

Los puntos de la red que siempre han mostrado concentraciones elevadas en sulfatos y en sodio parecen estar relacionados con el acuífero plioceno, que puede incluso alterar la calidad del agua del cuaternario. Así, la concentración en el ion sodio llega a ser más alta en sectores del interior que en la costa, lo que hace pensar más bien en una contaminación “in ascensum” desde el acuífero plioceno, que en procesos de intrusión marina.

En tiempos recientes se ha producido un incremento en nitratos y nitritos debido a la presión antrópica, por vertidos y fugas de aguas residuales, así como por explotaciones agropecuarias.

En lo que respecta a la relación acuífero-mar, también en el año 1981 se estableció una red de control de la intrusión marina, que fue operativa y estuvo gestionada por el IGME durante los años 80 y 90, y en la que se determinaban periódicamente la concentración de cloruros y la conductividad eléctrica del agua subterránea. Los datos obtenidos durante este periodo indican que en la zona próxima al cauce del río Fuengirola, junto a la desembocadura, se aprecian indicios de intrusión marina estacional, provocada por los bombeos. La zona costera próxima al casco urbano de Fuengirola no ofrece indicios de intrusión marina desde los años 90, debido al descenso en las extracciones para uso agrícola en esta zona.

Las mayores concentraciones en cloruros se dan en los puntos de la red de control 1645-7-200 y 1645-7-235, situados a 700 m y 200 m respectivamente de la línea de costa, en la zona de la desembocadura del río Fuengirola, con un promedio de 400 mg/L, aunque se producen puntas máximas entre 800 y 1.000 mg/L y mínimas entre 100 y 200 mg/L, siempre en muestras someras tomadas a menos de 20 m de profundidad. Esta alta variabilidad, con incrementos rápidos de la salinidad y recuperaciones también rápidas, son indicativas más que de un avance de una interfase, a la presencia de niveles muy transmisivos en conexión con el mar en la zona de la desembocadura, posiblemente relacionado con la presencia de gravas.



5.4. USOS DEL AGUA

Los usos del agua en Fuengirola están destinados básicamente a la agricultura y al abastecimiento urbano. La superficie aprovechada con fines agrícolas se estima en una 735 Ha, destacando los productos hortícolas y la alfalfa, así como flores y frutos subtropicales, regados principalmente a partir de aguas subterráneas. Con una dotación promedio de 7.000 m³/ha/año, la demanda sería del orden de 5,1 hm³/año.

Sin embargo la principal actividad económica de la zona es la industria turística, lo que confiere al uso urbano un papel preponderante. La población de hecho, en 2005 se situaba en 62.915, aunque en los meses estivales supera los 100.000 habitantes.

Aplicando las dotaciones teóricas previstas en el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur (250 L/hab/día), la demanda urbana asciende a unos 6,8 hm³/año. En los meses de verano se precisan aproximadamente unos 30.000 m³/día, y durante el resto del año unos 18.000 m³/día.

Considerando en conjunto los usos urbanos y agrícolas, la demanda total asciende a unos 12 hm³/año.

De los 6,5 hm³/año bombeados, aproximadamente el 60% se destina al abastecimiento urbano, y el 40% restante a usos agrícolas.

5.5. INFRAESTRUCTURA DE ABASTECIMIENTO

En la actualidad, el abastecimiento a Fuengirola se realiza, prácticamente de modo exclusivo a partir del embalse del río Verde. Únicamente en periodos de sequía o cuando se producen cortes en el suministro desde el embalse, se utilizan captaciones municipales y pozos privados. Todos ellos están conectados a la red municipal de distribución, bien directamente o a través de depósitos de almacenamiento

En el conjunto del acuífero existen aproximadamente unos 300 pozos, la mayor parte de los cuales captan el acuífero cuaternario, sobre todo para riego. Actualmente los pozos de abastecimiento urbano más importantes son cinco sondeos situados aguas arriba de la estación depuradora de aguas residuales de Fuengirola, que captan exclusivamente el acuífero cuaternario aluvial, que en este sector está constituido por 40 m de gravas dispuestos sobre las margas pliocenas. De estos pozos tres fueron construidos en 1995 y dos posteriormente, y bombean con un caudal de 60 L/s, en algunos momentos de forma continua, produciéndose escasos descensos. En origen se llegó a bombear con un caudal de 100 L/s, aunque se optó por reducir el caudal por seguridad a 60 L/s, con el fin de evitar posibles efectos de la intrusión marina.

En el término municipal de Fuengirola existen otros sondeos de abastecimiento, aunque por diversas causas (calidad, deterioro, bajo caudal, etc) no se utilizan o lo hacen de manera muy esporádica (Figura 5). Se trata del sondeo del Conde, sondeo Realenga, pozo del Ferial, pozo el Concejo, sondeo del Parbulario, y otros. Normalmente los pozos que obtienen mejores rendimientos son los situados en el aluvial del río Fuengirola, aunque los ubicados próximos al mar presentan efectos de la intrusión marina. Los pozos que captan el cuaternario poligénico suelen presentar problemas de caudal y de intrusión marina.



Figura 5. Infraestructura de abastecimiento urbano en Fuengirola



6. VIABILIDAD PRELIMINAR DE LA OPCIÓN DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR A TRAVÉS DE SONDEOS DE CAPTACIÓN EN EL ACUÍFERO CUATERNARIO DE FUENGIROLA

De acuerdo con los datos disponibles se hacen las siguientes consideraciones:

- Existe un acuífero detrítico costero, de origen aluvial, en el que existen captaciones de aguas subterráneas con bombes de 60 L/s aunque pueden soportar bombes con caudales superiores. Si no se hacen es por evitar riesgos de salinización.
- Si el acuífero presenta características similares en la costa, se podrían establecer bombes de 100 L/s, que si se producen por debajo de la interfase y a una profundidad conveniente, no deberían inducir intrusión marina. En tal caso se precisarían entre 10 y 15 pozos para obtener los 100.000 m³/día requeridos en la primera fase, y entre 20 y 25 pozos para los 200.000 m³/día de la segunda.
- Los datos estimados de transmisividad son del orden de 1.000 m²/día, que implicarían caudales específicos de 10 L/s/m. Esto significa que con 10 m de descenso teórico se obtendrían 100 L/s. Teniendo en cuenta las pérdidas de carga, estos descensos serán superiores.
- Se necesita tener espesor suficiente de acuífero cuaternario saturado de agua salada, capaz de soportar los descensos provocados por bombes de 100 L/s. Estos espesores se suponen superiores a los 50 m en la desembocadura del río Fuengirola, siempre considerando que ésta ha migrado casi con toda seguridad a lo largo del Cuaternario.

Por estos motivos, se considera que la alternativa de captación de agua de mar mediante sondeos es viable a priori, si bien todas las premisas que se han tenido en cuenta deben ser confirmadas mediante un plan de investigación que debe ser establecido.

Es necesario remarcar que con el fin de evitar la afección a pozos del entorno o inducir intrusión marina, cualquier obra de captación de agua de mar mediante sondeos se debe restringir al tramo de acuífero ubicado por debajo de la interfase agua dulce – agua de mar, debiendo quedar convenientemente cementado el espacio anular de la parte de acuífero que queda por encima de la misma, de acuerdo con el esquema indicado en la figura 1.



7. ZONAS DE ACTUACIÓN

Teniendo en cuenta los factores expuestos anteriormente como condicionantes de la viabilidad de la alternativa de captación de agua de mar mediante sondeos en el acuífero de Fuengirola, la selección de las zonas donde se deben desarrollar los trabajos de investigación, se ha realizado de siguiendo los siguientes criterios:

- Mayores espesores de cuaternario aluvial supuestos, con el fin de obtener el mayor espesor de acuífero saturado por agua de mar. Los mayores espesores de sedimentos fluviales se suelen acumular en las desembocaduras de los ríos.
- Mayor distancia posible a pozos de abastecimiento, para evitar la salinización de los mismos.
- Menor distancia posible al mar, para captar la interfase agua dulce-agua salada a la menor profundidad posible.
- Evitar zonas excesivamente urbanizadas.

La zona que cumple todos estos requisitos es la franja costera que se extiende desde el margen derecha del río Fuengirola, al pie del castillo, hacia el norte, en una longitud aproximada de 1 km.

El objetivo de los pozos de captación en este sector serían posibles niveles de arenas y gravas de alta transmisividad, conectados con el mar, y situados por debajo de la interfase. Por lo tanto el objetivo de las campañas de investigación sería probar la existencia de dichos niveles, su geometría y continuidad, calcular sus parámetros hidráulicos, comprobar el comportamiento hidrodinámico del acuífero frente a los bombeos requeridos, y evaluar los impactos sobre el medio originados por la actuación.

8. PROPUESTA DE ACTUACIONES

La opción de captación de agua salada a través del acuífero costero de Fuengirola precisa un programa de mejora del conocimiento, ya que actualmente presenta lagunas importantes y los caudales requeridos para abordar un plan como el que se pretende, son elevados.

Con el objeto de optimizar el rendimiento de los pozos y evitar la posible afección a los pozos de abastecimiento existentes en el acuífero, se propone estudiar el sector de playa existente en el entorno de la desembocadura del río Fuengirola, en ambos márgenes.



Se propone realizar cuatro sondeos de reconocimiento, dos en cada margen del río, lo más próximo posible al mar con un diámetro suficiente para poder realizar ensayos, y un piezómetro a una distancia inferior a 50 m desde cada sondeo de investigación, lo que hace un total de cuatro sondeos de reconocimiento y cuatro piezómetros. La finalidad es obtener la columna litológica, para conocer tanto el espesor del acuífero cuaternario como la disposición de los tramos de diferente permeabilidad, así como realizar ensayos de bombeo con piezómetro de observación que permitan obtener los parámetros hidráulicos del acuífero cuaternario y la afección entre pozos.

Se propone además realizar una campaña de geofísica puntual, mediante testificación en los sondeos de reconocimiento, que permitirá conocer la ubicación de la interfase agua dulce – agua salada, la litología de la columna del sondeo y la distribución de tramos permeables. La finalidad de esta campaña, es obtener los datos que permiten el correcto diseño de los pozos de abastecimiento.

Con el objeto de conocer la distribución espacial y la geometría de los materiales cuaternarios a lo largo de la franja costera de 500-1.000 m, donde se prevé la actuación, se propone realizar una campaña de tomografía eléctrica o sísmica de reflexión superficial, complementada con perfiles de polarización inducida.

A) Sondeos de reconocimiento:

Los sondeos de investigación deberían perforarse mediante el método de circulación inversa, evitando de este modo el uso de lodos, con un diámetro de 500 a 600 mm previendo posibles reducciones de diámetro y la aplicación adecuada del empaque de grava. La entubación debe realizarse con PVC, con el fin de evitar los efectos de la corrosión del agua de mar.

La profundidad de perforación dependerá del espesor de los sedimentos cuaternarios, aunque teniendo en cuenta los espesores obtenidos en sondeos situados en sectores más proximales, se considera que en la zona de la desembocadura del río Fuengirola, el espesor de cuaternario puede alcanzar los 80 m. Para tener mayor grado de seguridad sería conveniente planificar sondeos de 100 m de profundidad.

Durante la perforación se llevará a cabo la toma de muestras de ripio cada metro, conservándose las muestras en bolsas de plástico con autocierre. Se registrará asimismo la conductividad eléctrica, temperatura y la posición del nivel piezométrico en cada maniobra que permita la introducción de una sonda.

Con el fin de disponer de datos representativos durante los ensayos de bombeo, es necesaria la perforación de un total de cuatro piezómetros de observación, cada uno de ellos a una distancia de unos 50 m desde cada sondeo de investigación. Estos piezómetros se deben perforar a pequeño diámetro y estar entubados en PVC.



La posición aproximada de los sondeos de investigación se muestran en la figura 6.

B) Testificación geofísica:

Los registros que se considera conveniente realizar en cada sondeo de reconocimiento son: temperatura, conductividad, gamma natural, potencial espontáneo, resistividad normal (16''- 64'') y resistencia monoelectrónica.

La combinación de estos registros permitirá la identificación de niveles permeables, así como identificar la posición de la interfase en el sondeo, siendo una información imprescindible para poder diseñar los pozos de explotación.

C) Ensayos de bombeo:

Se propone realizar dos ensayos de bombeo en cada sondeo de reconocimiento, uno a caudal constante con recuperación y medidas en un piezómetro de observación, y un segundo ensayo de bombeo escalonado con cuatro escalones.

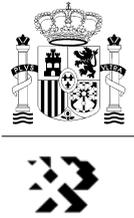
El objetivo del ensayo a caudal constante es obtener los valores de los parámetros hidráulicos, y el radio de influencia, mientras que el ensayo escalonado permite evaluar las pérdidas de carga en el pozo y el caudal óptimo de explotación.

Paralelamente a los ensayos de bombeos, se deben realizar aforos diferenciales en el río Fuengirola, con el fin de determinar cualquier cambio en la relación río/acuífero provocado por el bombeo con el fin de determinar la posible infiltración de agua del río hacia el acuífero.

D) Campañas de geofísica:

De acuerdo con las características litológicas de los materiales existentes, el modelo geológico más probable y con el tipo de problema a resolver, se propone el uso de dos técnicas geofísicas a lo largo del tramo de costa estudiado.

1. Tomografía eléctrica. Su fundamento es similar al de los sondeos eléctricos verticales, aunque al disponerse múltiples electrodos que pueden actuar consecutivamente como electrodos de corriente o como electrodos de lectura, permite obtener una visión tridimensional de la distribución de resistividades en el subsuelo de una manera rápida. En el caso estudiado su utilidad reside en poder detectar el basamento resistivo, es decir, los materiales metamórficos Alpujarrides que presentan un buen contraste de resistividad con respecto al relleno cuaternario o pliocuaternario,



determinando la estructura geológica y las zonas con mayores espesores de sedimentos.

2. Sondeos de polarización inducida. Permite distinguir las bajas resistividades debidas a la presencia de agua salada de aquellas debidas a la presencia de arcillas. Por lo tanto su objetivo es ubicar la interfase agua dulce agua salada.

Esta información debe quedar integrada en un estudio hidrogeológico clásico, que incluya una cartografía hidrogeológica de detalle, inventario de puntos de aguas, medidas piezométricas y de calidad. La combinación de los datos aportados por el estudio hidrogeológico, los sondeos mecánicos y la geofísica permitirá confirmación de las posibilidades de captar los caudales requeridos, y su posible afección medioambiental, así como es su caso, la ubicación más idónea de los pozos de captación.



Figura 6. Propuesta de investigación.

9. ANEXO FOTOGRÁFICO



Fotografía 1. Desembocadura del río Fuengirola. Las actuaciones propuestas se distribuyen a lo largo de las dos márgenes. Orientación sur.

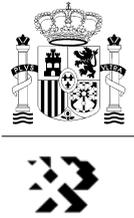


Fotografía 2. Detalle del área de actuación en la margen izquierda del río Fuengirola. Orientación norte.



10. BIBLIOGRAFÍA

- Gómez Gómez, J.D., López Geta, J.A., y Garrido Schneider, E., (2003). The state of seawater intrusion in Spain. In: Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos. J.A. López-Geta, J. De Dios Gómez, J.A. de la Orden, G. Ramos y L. Rodríguez eds. Madrid. Instituto Geológico y Minero de España, 2003. ISBN: 84-7840-471-6. pp. 169-186.
- IGME (1978). Mapa Geológico de España. E. 1:50.000. Coín. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria.
- IGME, (1983). Sistema Acuífero Costero “Cuaternario de Fuengirola”. Investigación hidrogeológica de las cuencas del sur de España (Sector Occidental). Informe técnico nº 1. Memoria – Síntesis. Ministerio de Industria y Energía. Secretaría de la energía y recursos minerales.
- IGME, Inédito. Proyecto de un sondeo mecánico para la investigación del Cuaternario y Plioceno del río Fuengirola. Mayo de 1975.
- IGME, Inédito. Nota técnica nº 255, Málaga, 20 - 1984. Informe sobre el control de la intrusión marina en los acuíferos costeros de la cuenca Sur (sector Occidental) durante 1984. Diciembre de 1984.
- IGME, Inédito. Nota técnica nº 363. Evolución de la piezometría en los acuíferos del sector occidental de la cuenca Sur durante los años 1987-88 y 1988-89. Diciembre de 1990.
- IGME, Inédito. Nota técnica Málaga nº 367. Control de la intrusión marina en los acuíferos costeros de la provincia de Málaga durante los años hidrológicos 1987-88 y 1988-89. Enero de 1991.
- IGME, Inédito. Nota técnica nº 390. Informe hidrogeológico sobre posibles alternativas para abastecimiento de agua a Fuengirola (Málaga). Agosto de 1992.
- ITGE y Junta de Andalucía, (1998). “Atlas hidrogeológico de Andalucía”. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Consejería de Trabajo e Industria, Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 216 pp. II y planos. ISBN: 84-7840-351-5. NIPO: 241-97-018-8.
- López Geta, J.A., Parra y Alfaro, J.L., y Rivera Martínez, A., (1988). Acuífero costero de Fuengirola (Málaga). In: Proc. 1st Int Simp. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros. Almuñecar 1988. Vol.II. pp. 317-335.



Páginas web:

http://www.igme.es/internet/ServiciosMapas/siasweb/prin_sias.htm. SIAS. Sistema de Información del Agua Subterránea. Andalucía.

<http://aguas.igme.es/igme/homec.htm>. Unidades Hidrogeológicas de España.

LOS AUTORES DE LA NOTA TÉCNICA

Fdo.: Julio López Gutiérrez

Fdo.: Juan Antonio López Geta

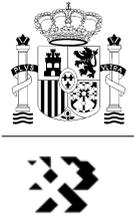
**NOTA TÉCNICA SOBRE LAS ALTERNATIVAS DE
UBICACIÓN DE SONDEOS DE CAPTACIÓN DE
AGUA DE MAR PARA LA ALIMENTACIÓN DE UNA
PLANTA DESALADORA Y EVALUACIÓN DE LAS
OPCIONES DE VERTIDO DE LA SALMUERA DE
RECHAZO EN LA PLANA DE OROPESA
(CASTELLÓN)**

Madrid, 2 de marzo de 2006



ÍNDICE

	Pág.
Equipo de trabajo.....	2
1. OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA.....	3
2. ANTECEDENTES.....	3
3. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTUACIONES PREVISTAS.....	4
4. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS PRESENTADAS POR ACUAMED SOBRE LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR	5
4.1. ALTERNATIVA A: BATERÍA DE SONDEOS COSTEROS EN PRIMERA LÍNEA DE PLAYA AL SUR DE LA DESEMBOCADURA DE LA RAMBLA DE CHINCHILLA.....	6
4.2. ALTERNATIVA B: BATERÍA DE SONDEOS COSTEROS EN PRIMERA LÍNEA DE PLAYA EN LA ZONA SUR DE CABANES.....	8
5. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE ELIMINACIÓN DE LA SALMUERA DE RECHAZO DE LA PLANTA DESALADORA	10
5.1. VALORACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE VERTIDO EN LA RAMBLA DE CHINCHILLA.....	10
5.2. PROPUESTA DE UNA NUEVA ALTERNATIVA DE GESTIÓN DE LA SALMUERA DE RECHAZO.....	12
5.3. VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE ELIMINACIÓN DE LA SALMUERA DE RECHAZO.....	12
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	12
7. ANEXO FOTOGRÁFICO.....	16



EQUIPO DE TRABAJO

La presente nota técnica ha sido elaborada por el **INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA** interviniendo en su realización el siguiente equipo de trabajo:

Julio López Gutiérrez (Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid)

Miguel Mejías Moreno (Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid)

Juan Antonio López Geta (Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid).

Coordinación y Supervisión



1. OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA

La presente nota técnica se realiza a petición de ACUAMED, S.A., y al amparo del Contrato de Asistencia Técnica suscrito por esta Sociedad con el IGME. El objetivo de la misma es evaluar las diferentes propuestas para la ubicación de una batería de sondeos para la captación de agua de mar en Oropesa de Mar, capaz de suministrar el caudal requerido por una planta desaladora de nueva construcción y las posibles opciones de gestión de la salmuera de rechazo procedente del proceso de desalación.

Como documentación básica que recoge las diferentes alternativas, la empresa ACUAMED ha facilitado al IGME los siguientes documentos:

- Memoria resumen del proyecto informativo de la desaladora de Oropesa del Mar y obras complementarias (Castellón).
- Estudio geológico de la zona.

Se efectuará una valoración experta de las propuestas mencionadas, analizando las alternativas y su relación con las características geológicas e hidrogeológicas del medio físico, en función de la documentación disponible y la experiencia y conocimiento hidrogeológico del IGME en la zona.

En concreto, se desarrollará un apartado relativo a las características geológicas e hidrogeológicas de las dos zonas propuestas para ubicar la batería de sondeos de captación de agua de mar: sector de la Ribera de Cabanes, próximo a la rambla de Mañes, y del sector al norte de Oropesa, en las proximidades del barranco de Chinchilla; y otro apartado relativo al análisis de las alternativas de vertido de la salmuera de rechazo de la planta desaladora recogidas en la mencionada documentación.

2. ANTECEDENTES

Las zonas de actuación propuestas para la ubicación de la batería de sondeos de captación, planta desaladora y área o punto de vertido se encuentran situadas en la unidad hidrogeológica 08.11, Plana de Oropesa-Torreblanca, que con una superficie del orden de 105 km², se engloba en el Sistema Acuífero Javalambre-Maestrazgo quedando además integrada dentro del Sistema de Explotación Cenía-Maestrazgo, en la provincia de Castellón. La Unidad se encuentra en contacto hidráulico con la unidad hidrogeológica 08.07, El Maestrazgo.



El IGME viene realizando trabajos de investigación e infraestructura en esta zona desde los años 70, tanto en proyectos propios del Organismo, como en proyectos realizados en colaboración con otras entidades de la Administración Estatal, Autonómica y Local, especialmente con la Diputación Provincial de Castellón.

En la zona de interés, y en sus proximidades, existen diversos estudios hidrogeológicos entre los que cabe destacar los trabajos realizados por el IGME a través del proyecto PIAS y el informe “Estudio hidrogeológico del Maestrazgo” (IGME, 1989) que recopila y sintetiza los anteriores, así como el proyecto: “Garantías de abastecimiento con aguas subterráneas a núcleos urbanos de la Plana de Castellón. Análisis y propuestas de actuación (ITGE-DPC, 1998)”.

Desde el año 2003 el IGME está desarrollando el proyecto “Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 (El Maestrazgo). Desarrollo metodológico”, en el que, como primer resultado, se ha elaborado en abril de 2005 el “Informe preliminar de recopilación y síntesis de la información” que recoge toda la información geológica e hidrogeológica existente en la zona del Maestrazgo, así como los primeros resultados de las actividades técnicas y de investigación llevadas a cabo.

Asimismo, se ha consultado la Base de Datos Aguas XXI del IGME y diversos trabajos de campo que se están llevando a cabo en el proyecto mencionado en el párrafo anterior y de los que se dispone de resultados parciales.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTUACIONES PREVISTAS

Las actuaciones previstas tienen como objetivo, según se indica en la documentación entregada por ACUAMED, S.A., garantizar el abastecimiento hídrico de las urbanizaciones existentes y futuras en los términos municipales de Oropesa del Mar y Cabanes, así como mejorar la calidad del agua de abastecimiento a la población de Benicasim, mediante la construcción de una planta desaladora para cuya ubicación se plantean que en una primera fase, horizonte año 2010, la planta desaladora aporte un caudal de 65.000 m³ /día y en una segunda fase, horizonte año 2020, 130.000 m³ /día, lo que implica una captación de unos 145.000 m³ /día (52,03 hm³/año) durante la primera fase y 290.000 m³ /día (105,85 hm³/año) durante la segunda.

De manera muy resumida, las alternativas previstas en la zona, descritas en la documentación aportada por ACUAMED, se pueden sintetizar en:

1. **Ubicación de una planta desaladora.** Para esta actividad se plantean dos alternativas:



- a) Desaladora de Oropesa Norte. Situada en el término municipal de Oropesa del Mar, junto a la nueva EDAR, con captación de agua de mar mediante una batería de sondeos localizados en la zona de playa, al sur de la desembocadura de la rambla de Chinchilla.
- b) Desaladora de Cabanes. Ubicada en el Sector Torre de la Sal, en el término municipal de Cabanes, al sur del Prat de Cabanes-Torreblanca, con captación de agua de mar mediante sondeos situados en la playa del Mojón, entre los términos municipales de Oropesa del Mar y Cabanes.

En ambos casos el objetivo es obtener los caudales requeridos sin provocar efectos de intrusión salina o afección a captaciones del entorno. Para ello, lo que se pretende es captar agua de mar por debajo de la interfase agua dulce – agua salada.

Se contempla la posibilidad de una toma abierta de agua de mar si no se pudiese alcanzar el caudal necesario por medio de sondeos.

2. Eliminación de la salmuera de rechazo. De acuerdo con la documentación aportada por ACUAMED se estima un caudal de vertido en la primera fase de 78.000 m³/día (28,47 hm³/a) y en la segunda de 156.000 m³/día (56,94 hm³/a).

Las alternativas de vertido propuestas son:

- a) Desagüe de la salmuera al mar en la zona de la desembocadura de la rambla de Chinchilla; para el caso de ubicar la desaladora en Oropesa Norte.
- b) Distribución del vertido directo a lo largo de la línea de costa, aprovechando la zona de rompientes; aplicable a los dos posibles casos de ubicación de la planta desaladora.
- c) Diseño de un emisario submarino. También para las dos posibilidades de ubicación.

4. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PRESENTADAS POR ACUAMED, EN RELACIÓN CON LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR

A continuación se hace un análisis geológico e hidrogeológico de las dos emplazamientos propuestos por ACUAMED, para la captación de agua de mar a través de sondeos, así como una valoración técnica de cada alternativa.



4.1. ALTERNATIVA A: BATERÍA DE SONDEOS COSTEROS EN PRIMERA LÍNEA DE PLAYA AL SUR DE LA DESEMBOCADURA DE LA RAMBLA DE CHINCHILLA.

Descripción

La zona propuesta para perforar la batería de sondeos se encuentra ubicada en el límite sur de la unidad hidrogeológica 08.11, Plana de Oropesa-Torreblanca. Los materiales aflorantes corresponden a depósitos cuaternarios de playa suprayacentes a materiales de tipo aluvión, también de edad Cuaternario. Geológicamente la Plana de Oropesa-Torreblanca está constituida por materiales de relleno de edad Plio-Cuaternario, con espesores en torno a 80 m en la zona de interés.

La columna litoestratigráfica sintética de esta zona se puede determinar básicamente a partir de los 3 sondeos realizados para evaluar las posibilidades de captación de agua de mar para su utilización en el complejo balneario de Marina d'Or y de algunos sondeos (302440030, 302440031) relativamente próximos, 4 a 5 km, descritos en la base de Datos Aguas del IGME; si bien las características tectónicas del entorno hacen difícilmente extrapolable la continuidad de las formaciones mesozoicas captadas en áreas más occidentales a la zona propuesta.

De este modo la columna sintética muestra, de techo a muro, un tramo de 82 m (0-82 m) de gravas, arenas y arcillas en facies continental de edad Pliocuatnario, le siguen 46 m (82-128 m) de limos y arcillas en facies litoral proximal o lacustre del Oligoceno-Mioceno, 38 m (128-166 m) de intercalaciones de areniscas y calizas en facies litoral de la misma edad y, finalmente, de 166 a 204 m calizas, dolomías y arcillas en facies marina. Este último tramo podría englobar formaciones carbonatadas cretácicas a partir de aproximadamente 192 m de profundidad, correspondientes a litologías del Aptiense-Barremiense que afloran al oeste de la zona propuesta y cuyo grado de karstificación resulta muy variable. Estos materiales, junto con algún nivel de calizas del Dogger, captado en el sondeo 302440030, presentan un valor de transmisividad de unos 90 m²/día.

Con respecto a las características hidráulicas de los materiales pliocuatnarios y oligomiocenos descritos, en función de los resultados recogidos en la documentación aportada por ACUAMED, a partir de los ensayos de bombeo llevados a cabo en los sondeos "Marina d'Or", se pueden establecer las consideraciones siguientes:

- Los materiales con mejores condiciones hidráulicas corresponden al tramo superior del acuífero pliocuatnario, hasta una profundidad aproximada de 36 m, con un valor de transmisividad entre 1.250 y 33.000 m²/d.
- El tramo inferior del acuífero pliocuatnario, de 40 a 80 m de profundidad, tiene una transmisividad entre 300 y 800 m²/d.

- El rendimiento hidráulico de la facies marina del acuífero Oligoceno-Mioceno, aislado de los demás niveles, es bajo, con una transmisividad en torno a $57 \text{ m}^2/\text{d}$.
- El aprovechamiento conjunto de las facies litoral y marina del acuífero oligoceno-mioceno presenta una transmisividad de 300 a $1.140 \text{ m}^2/\text{d}$, muy similar a la del tramo inferior del acuífero pliocuaternario, pudiendo calificarse como de transmisividad media-alta.

Consideraciones a la alternativa A

De acuerdo con los datos expuestos anteriormente, las mejores características hidráulicas para la captación de agua de mar se producen en el conjunto del acuífero pliocuaternario. Los datos preliminares de transmisividad obtenidos en los sondeos de Marina d'Or, permiten suponer que se pueden obtener caudales de 100 L/s, o incluso superiores con descensos moderados.

Otra opción es la captación conjunta de la mitad inferior del acuífero pliocuaternario y los materiales del oligoceno-mioceno en sus diferentes facies. Éstos aportarían de una manera individual cada sondeo entre 50 y 100 L/s, dependiendo de sus afecciones mutuas y parámetros hidráulicos, lo que supone la perforación, para la primera fase, de una batería de sondeos entre 18 y 34 pozos de captación, que supondría el doble para la segunda fase.

En ambas opciones el objetivo es la captación de agua de mar bombeando por debajo de la interfase agua dulce – agua de mar, con el fin de conseguir una composición constante del agua a desalar, así como evitar cualquier afección a captaciones del entorno. Con este fin se debe plantear una serie de estudios, que se proponen a continuación.

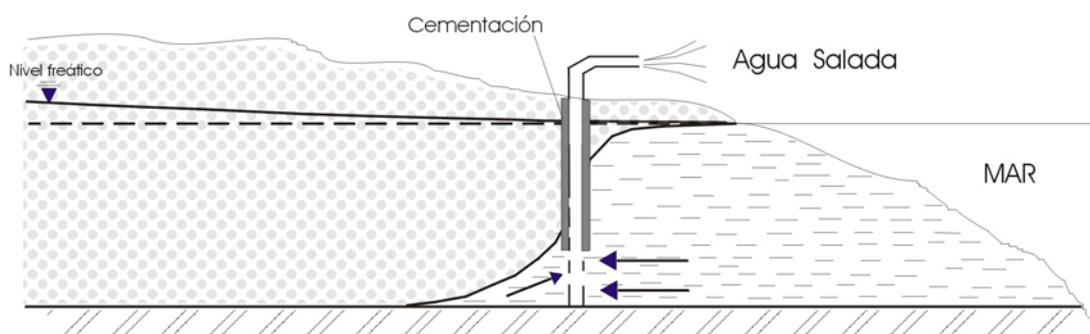


Figura 1. Esquema de captación de agua salada mediante bombeo en un acuífero libre costero. La idea consiste en bombear exclusivamente bajo la interfase, con el objeto de minimizar la entrada de agua dulce del acuífero y evitar la intrusión marina. El agua obtenida tiene una composición constante, prácticamente la del agua de mar, y una calidad excelente para los fines previstos, ya que se somete a un filtrado natural.



Estudios propuestos

Cualquiera de las opciones contempladas en la alternativa A, tanto la captación del acuífero pliocuaternario como la captación conjunta del Pliocuaternario y el Oligoceno-Mioceno, precisa la realización de sondeos de reconocimiento, así como piezómetros de observación, y pruebas de bombeo a caudal constante y caudales escalonados, que permitan determinar los parámetros hidráulicos del acuífero, los caudales de explotación, y el radio de influencia de las captaciones y del campo de pozos. Se precisa asimismo la testificación geofísica de los sondeos de investigación que permita el correcto diseño de los pozos de explotación, así como la posición de la interfase, ya que con vista a evitar la inducción de intrusión salina en el acuífero pliocuaternario, es necesario que el bombeo se produzca por debajo de la interfase, debiéndose cementar el tramo de acuífero sobre la interfase. Se considera necesario, además, la realización de una campaña geofísica de superficie con el objeto de conocer la posición areal de la interfase, a lo largo del tramo de costa donde se pretende actuar.

Los detalles sobre las características de los sondeos de investigación y la investigación geofísica se muestran en el apartado final de conclusiones y recomendaciones.

4.2. ALTERNATIVA B: BATERÍA DE SONDEOS COSTEROS EN PRIMERA LÍNEA DE PLAYA, EN LA ZONA SUR DE CABANES.

Descripción

La zona propuesta para perforar la batería de sondeos se encuentra ubicada en la mitad sur de la Plana de Oropesa-Torreblanca, próxima al límite sur del Prat de Cabanes.

Tanto los materiales aflorantes como la secuencia litoestratigráfica son muy similares a la descrita para la alternativa A.

La columna litoestratigráfica sintética se puede determinar en base al sondeo referido como número de inventario 55 en el estudio geológico aportado por ACUAMED, que corresponde con un sondeo de inyección para el vertido de aguas residuales procedentes de una pequeña planta de tratamiento de agua por ósmosis inversa, situado en el término municipal de Cabanes y en base a los sondeos con número de inventario 312410013 y 312410005 de la Base de Datos Aguas del IGME, situados respectivamente a unos 0,5 km al este del sondeo mencionado como número de inventario 55, y a unos 1,5 km al oeste de la zona marcada como alternativa B.

La columna sintética, de techo a muro, se inicia con unos 50-60 m de gravas, arenas y arcillas con conglomerados a muro, correspondientes a depósitos continentales de



edad Pliocuaternaria, suprayacentes a depósitos del Oligoceno-Mioceno, que se distribuyen en facies lagunar, litoral y marina. La facies lagunar se dispone entre los 60 m y 80 m de profundidad y está constituida por arcillas, limos, margas y arenas calcáreas con niveles de gravas; por debajo, entre 80 y 166 m se sitúa la facies litoral constituida por arenas calcáreas, calizas y margas con algunos niveles de gravas y, desde el metro 166 hasta 248 m, de profundidad, final del sondeo número 55, aparecen calizas fisuradas que en su tramo final, a partir del metro 198, podrían corresponder a depósitos de edad Cretácica.

Se pueden individualizar por tanto dos acuíferos, uno superior correspondiente a los materiales pliocuaternarios y otro inferior formado por las arenas calcáreas y calizas en facies litoral y marina que se encuentra confinado por las arcillas, limos y margas del oligoceno-mioceno en facies lacustre.

En la documentación aportada por ACUAMED no se hace referencia a los parámetros hidráulicos de estos acuíferos.

Consideraciones a la alternativa B

Desde el punto de vista del objetivo de este estudio, el acuífero de mayor interés sería el inferior. En la documentación consultada aparece una referencia de rendimiento hidráulico en el punto acuífero 312410013, captando 8 m de materiales detríticos correspondientes al Oligoceno-Mioceno en facies litoral, de 147 a 155 m de profundidad, y 10 m de calizas en facies marina, de 167 a 177 m de profundidad; el valor de transmisividad es de unos 70 m²/d. Otra posible referencia es la del punto 312910005, que no llega a atravesar el acuífero oligoceno-mioceno en facies marina y que se consideró con resultado negativo a efectos de su aprovechamiento.

A partir de la información disponible se puede efectuar las siguientes consideraciones:

- Existe, en general, menor conocimiento de la geología e hidrogeología en la zona denominada alternativa B.
- Con la información disponible actualmente se observan unas características hidráulicas menos favorables que las determinadas en la alternativa A. Los niveles explotables del acuífero profundo, que es el que presenta mayor interés, se sitúan a profundidades en torno a los 150 m, con valores de transmisividad que podrían clasificarse como bajos. En concreto la facies litoral parece tener peores características hidráulicas que en la alternativa A.
- El carácter confinado del acuífero inferior en la zona de alternativa B favorecería el mantenimiento de una composición química estable del agua a desalar.



Propuesta

Al igual que en el caso de la alternativa A, cualquier actuación en la zona situada al sur de Cabanes, precisa un plan de estudio similar al descrito en la zona de la rambla de Chinchilla, es decir, perforación de sondeos de reconocimiento y piezómetros de observación, realización de ensayos de bombeo, a caudal constante y bombeos escalonados, testificación geofísica en los sondeos y campañas geofísicas de superficie. La principal diferencia entre ambas zonas estriba en que al ser menor el grado de conocimiento previo de la alternativa B, se precisa posiblemente un mayor número de sondeos de reconocimiento, aunque la metodología es similar. Una descripción más detallada de los trabajos propuestos se hace en el último apartado de este informe.

5. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE ELIMINACIÓN DE LA SALMUERA DE RECHAZO DE LA PLANTA DESALADORA.

En el epígrafe correspondiente de esta nota técnica a la descripción de las actuaciones previstas, se enumeran las alternativas para el vertido de la salmuera de rechazo de la planta desaladora, propuestas por ACUAMED. Estas alternativas consisten para el caso de la desaladora de Oropesa en:

- Vertido a la rambla de Chinchilla.
- Emisario submarino.
- Vertido al mar en zona de rompientes.

Para el caso de la desaladora de Cabanes, solo se contempla la eliminación mediante emisario submarino y el vertido al mar en zona de rompientes.

De éstas posibilidades se van a analizar aquellas que pueden suponer una afección a la calidad de las aguas subterráneas, ya que el diseño y ubicación de emisarios submarinos para el vertido al mar o el desagüe directo en rompientes a lo largo de la línea de costa no produce afección a las aguas subterráneas, debiendo valorarse por otros especialistas las posibles afecciones al medio natural marino. Por lo tanto solo se valora la posibilidad de vertido a la rambla de Chinchilla, en el caso de la desaladora de Oropesa, y se hace una nueva propuesta de gestión de la salmuera tanto para el caso de Oropesa como para el de Cabanes

5.1. VALORACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE VERTIDO EN LA RAMBLA DE CHINCHILLA EN LA ZONA SITUADA AL NORTE DE OROPESA DE MAR.

En el caso de ubicar la planta desaladora en Oropesa Norte, una de las alternativas propuestas por ACUAMED es realizar el desagüe de la salmuera de rechazo en la zona de la desembocadura de la rambla de Chinchilla, lo que supone un caudal de



vertido, durante la primera fase, de unos 78.000 m³/día (28,47 hm³/año) y en la segunda fase de unos 156.000 m³/día (56,94 hm³/año).

Sobre esta propuesta, cabe mencionar como antecedente, que en la misma zona propuesta existe una autorización de vertido, para un caudal de unos 4,38 hm³/año, del efluente generado en el balneario de la urbanización Marina d'Or, para verter agua de mar, tras su utilización en el mencionado balneario, en un punto ubicado a unos 250 m de la línea de costa, en el entorno del embarcadero.

De las conclusiones obtenidas en el informe emitido el 2 de mayo de 2001 por el IGME, según lo establecido en la Ley de Aguas, en relación con el vertido mencionado y de la documentación consultada para la elaboración de esta nota técnica se pueden exponer las siguientes conclusiones:

- En la desembocadura de la rambla de Chinchilla existe una barra litoral que cierra la misma, y que desconecta el cauce y el mar, excepto en épocas de fuertes lluvias, cuando se produce una incisión natural en la misma. Por este motivo la mayor parte del año, y en condiciones naturales, la desembocadura se encuentra cerrada, por lo que cualquier vertido que se realice en la rambla debe llevar implícito la eliminación periódica de la barra con el fin de evitar que el embalsamiento incremente la carga hidráulica y en consecuencia se infiltre el efluente hacia el acuífero.
- A la altura de la zona urbanizada de Marina d'Or, el cauce de la rambla se encuentra excavado por debajo de la cota 0 m s.n.m., ya que se inició la construcción de un embarcadero. Por este motivo el agua que existe de manera permanente en la zona de la desembocadura procede del drenaje del propio acuífero. En concreto, el contenido en cloruros del agua del embarcadero (11.000 mg/L) indica que se trata de un agua salobre que corresponde a la zona de mezcla agua de mar - agua dulce del acuífero. De acuerdo con los datos de los piezómetros existentes en el entorno del embarcadero, la zona de mezcla se encuentra aproximadamente a una profundidad de 1,75 m.
- En la zona se produce un flujo de agua subterránea desde el interior hacia la costa, con una gradiente hidráulico del 0,17 ‰.
- El vertido de una salmuera, en un medio con mezcla de agua marina y agua de mejor calidad procedente del acuífero provocará una estratificación en el agua de la desembocadura, como consecuencia de la diferencia de salinidad y densidad, disponiéndose el agua más cargada en sales en el fondo, de manera que se producirá un incremento de la carga hidráulica y en el gradiente por la diferencia de salinidad, favoreciendo la infiltración de agua cargada en sales hacia el medio menos salino; afectando de este modo a la calidad de las aguas subterráneas. Este hecho, unido a que la captación de agua de mar a través de pozos puede provocar un cierto abatimiento de la superficie freática del acuífero, provocaría la infiltración de la salmuera hacia el acuífero en el entorno de la zona de captación, lo que implicaría un



alto riesgo de que parte de la salmuera fuera captada por los propios sondeos de explotación.

5.2. PROPUESTA DE UNA NUEVA ALTERNATIVA DE GESTIÓN DE LA SALMUERA DE RECHAZO.

Otra posibilidad de eliminación, no contemplada en la documentación aportada por ACUAMED y aplicable a los dos posibles emplazamientos de la planta desaladora, es la inyección de la salmuera de rechazo mediante sondeos, en niveles acuíferos más profundos que en los que se planifica la toma de agua de mar. En función del grado de karstificación y sus parámetros hidráulicos esta inyección podría realizarse en niveles saturados en agua de mar de calizas y dolomías mesozoicas. Esta alternativa precisa de un estudio hidrogeológico detallado que permita asegurar la inyección de los volúmenes de salmuera mencionados. Por este motivo, si se contempla esta posibilidad, sería necesario incrementar la profundidad de investigación, tanto de la perforación mecánica como de la geofísica, hasta alcanzar los referidos materiales carbonatados mesozoicos.

5.3. VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE ELIMINACIÓN DE LA SALMUERA DE RECHAZO.

De acuerdo con los datos expuestos, la opción de vertido en la rambla de Chinchilla muestra ser la más desaconsejable, debido principalmente a dos motivos:

- Alto riesgo de afección a la calidad de las aguas subterráneas del acuífero pliocuaternario superior. En caso de afección se pueden ver afectados los propios pozos de explotación que se consideran en la alternativa A.
- Necesidad de un acondicionamiento continuo de la desembocadura, que precisa la eliminación de la barra litoral que la cierra periódicamente.

En este caso y por estos motivos se cree conveniente optar por la eliminación mediante vertido al mar, siempre que se asegure la inocuidad del mismo al medio natural marino, o bien considerar la alternativa propuesta de eliminación mediante inyección profunda.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La documentación aportada por ACUAMED, la información consultada y la experiencia y conocimiento del IGME en la zona de actuación propuesta permiten establecer las siguientes conclusiones en relación con las alternativas para captación de agua de mar y las posibilidades de eliminación de la salmuera de rechazo formuladas por ACUAMED en relación con el proyecto informativo de la desaladora de Oropesa del Mar (Castellón) y obras complementarias:

1.- El estado del conocimiento previo y la infraestructura hidrogeológica existente en la zona propuesta, mitad meridional de la Unidad Hidrogeológica 08.11 Plana de Oropesa-Torreblanca, indican la presencia de una formación geológica, cuyos parámetros hidráulicos permitan seleccionar de forma directa una alternativa para la captación de agua de mar, pero para ello es necesario la realización de un estudio adicional que permita conocer los parámetros hidráulicos y la geometría de los materiales a través de los cuales se pretende extraer agua de mar, así como la posición de la interfase y el correcto diseño de los pozos de explotación. Los trabajos que se contemplan consisten en la perforación de sondeos de reconocimiento y piezómetros de observación, pruebas de bombeo, testificación geofísica en pozos y campañas de geofísica de superficie.

2.- Se considera que el número de sondeos de reconocimiento que deben ser perforados es de dos en cada una de las alternativas propuestas, más dos piezómetros de observación a una distancia de unos 50 m desde cada sondeo de investigación. El objeto de estos últimos es poder interpretar de manera óptima los descensos provocados durante los ensayos de bombeo que se realicen. De este modo, se incrementa de dos a cuatro el número de sondeos de reconocimiento a realizar con respecto a la documentación aportada por ACUAMED, así como cuatro piezómetros que no se consideraban con anterioridad.

3.- Los sondeos de reconocimiento deberían alcanzar una profundidad entre 200 y 300 m, de manera que se investiguen también las características hidrogeológicas de los niveles carbonatados mesozoicos, tanto para evaluar sus posibilidades para incrementar la extracción de agua de mar en cada sondeo de explotación individualizado, como para conocer sus características hidráulicas ante el posible planteamiento de un sistema de inyección profunda de la salmuera de rechazo en estos niveles.

4.- En cada uno de los sondeos de reconocimiento se deben realizar dos ensayos de bombeo, uno a caudal constante, con observación de descensos y recuperación tanto en el pozo de bombeo como en los piezómetros de observación, y un ensayo de bombeo escalonado, con al menos cuatro escalones de caudal. De este modo se obtendrán los parámetros hidráulicos de los materiales, el radio de influencia de los



bombeos, y se podrán evaluar los descensos reales para seleccionar el caudal óptimo de explotación.

5.- En la información remitida por ACUAMED, se evalúa una extracción individual de 100 L/s en cada sondeo, implicando el tramo inferior del pliocuaternario y el acuífero Oligoceno-Mioceno en sus distintas facies. Este límite parece demasiado optimista en virtud de las características hidráulicas de las formaciones y de la afección entre pozos, pudiéndose considerar como más probables valores individualizadas entre los 50 y 100 L/s.

6.- Sí parece probable la obtención de caudales de 100 L/s, en el acuífero pliocuaternario, en conjunto, aunque esta opción precisa una evaluación de los efectos que dicho bombeo puede provocar en captaciones próximas, y sobre la interfase. De manera preliminar, la afección puede ser mínima si se confirman valores elevados de transmisividad, si se dispone de suficiente espesor de acuífero saturado con agua de mar y si se diseñan correctamente los sondeos de explotación en lo que respecta a la ubicación de los tramos ranurados y posición de la bomba (Figura 1).

7.- La zona propuesta como alternativa A para la ubicación de la batería de sondeos de extracción, proximidad del barranco de Chinchilla, cuenta con más información hidrogeológica previa que la alternativa B, sector próximo a la rambla de Mañes, debido sobre todo a la existencia de sondeos de captación de agua de mar para el balneario de la urbanización de Marina d'Or. En el sector A las características hidrogeológicas de los materiales parecen mejores que en el sector B, en el que además los niveles de interés se encontrarían a una profundidad algo mayor que en la alternativa A. No obstante, no resulta posible realizar una recomendación definitiva sin contar antes con la información de pruebas de bombeo propuestas.

8.- En la documentación aportada se plantea también la realización de 5 sondeos geofísicos mediante el método de resonancia magnética nuclear (RMN) de superficie en cada una de las zonas propuestas. Se prevé un sondeo de este tipo, con objetivos paramétricos, junto a cada sondeo mecánico de investigación, y otros cuatro sondeos, dos al norte y otros dos al sur del sondeo mecánico. Al aplicar este método de investigación hay que tener en cuenta al menos dos aspectos:

- La RMN no discrimina entre agua dulce y salada, por lo que no aportará información relativa a la profundidad de la interfase.
- La profundidad de investigación es aproximadamente igual a la longitud del lado del bucle de antena empleado. En este sentido hay dos posibilidades de investigación: dispositivo cuadrado y bucle en ocho. El dispositivo cuadrado, tiene una longitud de lado del bucle de 150 m y, por tanto, profundidad de investigación igual o menor a ese valor. Teniendo en cuenta además que en la secuencia estándar de inversión la potencia de cada capa de resultado de la inversión va siendo mayor con la profundidad, para un valor de 150 m la última capa



discriminada tendría una potencia de unos 40 m, se podría obtener, por tanto, escasa información. Este dispositivo cuadrado con lado de 150 m se puede emplear en zonas en que exista poco ruido, considerando como tal la presencia de actividades antrópicas. La otra alternativa, para zonas con alto nivel de ruido, es la utilización de un bucle en ocho, con lado de 75 m y por tanto, con ese mismo límite de investigación. A esto hay que unir que la salinidad de las aguas hace que el terreno sea muy conductor, y los terrenos muy conductores no favorecen la penetración del método de RMN.

Una alternativa de prospección geofísica a la propuesta en la documentación remitida consistiría, en primer lugar, en la testificación en pozo con sondas de: resistividad de la formación, gamma natural, temperatura y conductividad del fluido. Una vez obtenida esta información se aplicaría geofísica de superficie. En ésta, dada la salinidad del agua, los métodos eléctricos y magnéticos pueden presentar ciertos problemas, por lo que podría emplearse sísmica de reflexión somera, con costes similares o inferiores a la RMN, mediante la realización de un perfil con una amplitud en torno a 1 km desde cada uno de los sondeos de investigación. Igualmente se puede aplicar la técnica de polarización inducida para obtener la posición de la interfase agua dulce – agua de mar a lo largo de los tramos de costa seleccionados, ya que permite distinguir las bajas resistividades debidas a la presencia de agua salada de aquellas debidas a la presencia de arcillas, que es la principal limitación a la aplicación de los métodos eléctricos y electromagnéticos clásicos.

Con la combinación de estos métodos se podría realizar un perfil en las proximidades de los sondeos de investigación que aportaría información sobre la permeabilidad relativa de las formaciones, las zonas de aportes de agua, la conductividad del fluido y la identificación de las facies correspondientes a materiales carbonatados.

9.- En relación con las alternativas de gestión de la salmuera de rechazo, se desaconseja expresamente la posibilidad de verter en la desembocadura de la rambla de Chinchilla, ya que los considerables volúmenes a verter, con salinidad muy superior a la del agua de mar, la presencia de una barra litoral que cierra la desembocadura de la rambla la mayor parte del año, y la existencia de una mezcla de agua marina y dulce proveniente del drenaje del acuífero cuaternario produciría una estratificación del agua como consecuencia de la diferencia de salinidad y densidad, dando lugar, al menos en determinadas ocasiones en función de los niveles relativos, a un incremento de la carga hidráulica que favorecería la infiltración de agua muy cargada en sales hacia el acuífero subyacente, en la zona de vertido, y en tal caso existiría un alto riesgo de afección a los propios pozos de captación establecidos en la presente actuación. Por lo tanto se aconseja la eliminación de la salmuera mediante su vertido al mar, siempre que las condiciones del medio marino sean favorables, o considerar la posibilidad de inyección profunda en el acuífero carbonatado mesozoico, si los resultados de una investigación *ex profeso* indicasen que tanto los valores de transmisividad como su grado de conexión con el mar permitiese la eliminación de los caudales requeridos.

7. ANEXO FOTOGRÁFICO



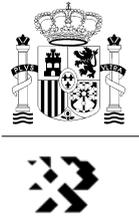
Fotografía 1. Estado de la desembocadura de la rambla de Chinchilla en octubre de 2001. Obsérvese la existencia de una barra litoral que cierra la salida al mar.



Fotografía 2. Desembocadura de la rambla de Chinchilla en 2005. El vertido de agua de mar de Marina d'Or exige la eliminación periódica de la barra litoral con el fin permitir la salida hacia el mar.



Fotografía 3. Embarcadero de Marina d'Or en el cauce de la rambla de Chinchilla. El agua que ocupa el cauce procede del drenaje del acuífero pliocuaternario de la Plana de Oropesa, como consecuencia de la excavación artificial del lecho por debajo del nivel freático.



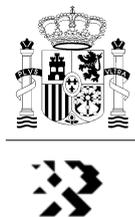
LOS AUTORES DE LA NOTA TÉCNICA

Fdo.: Miguel Mejías Moreno

Fdo.: Julio López Gutiérrez

VºBº

Fdo.: Juan Antonio López Geta



**NOTA TÉCNICA SOBRE EL ESTADO DE LAS
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS 06.07. BÉDAR-ALCORNIA;
06.08. ALTO AGUAS; Y 06.09. CAMPO DE TABERNAS.
PROVINCIA DE ALMERÍA**

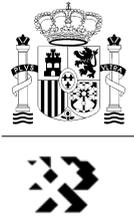
Madrid, 19 de mayo de 2006



ÍNDICE

	Pág.
Equipo de trabajo.....	2
1. OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA.....	3
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. ANTECEDENTES.....	5
4. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.07. BÉDAR-ALCORNIA.....	7
5. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.08 RÍO AGUAS.....	11
6. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.09. CAMPO DE TABERNAS.....	15
7. ACUÍFERO DE GÉRGAL.....	18
8. SUBSISTEMA ACUÍFERO ALCÓNTAR-BACARES.....	18
9. CONCLUSIONES.....	20
10. RECOMENDACIONES.....	21
11. BIBLIOGRAFÍA.....	22

ANEXOS



EQUIPO DE TRABAJO

La presente nota técnica ha sido elaborada por el **INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA** interviniendo en su realización el siguiente equipo de trabajo:

Julio López Gutiérrez (Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid)

Juan Antonio López Geta (Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Madrid).

Coordinación y Supervisión



1. OBJETIVO DE LA NOTA TÉCNICA

La presente nota técnica se realiza a petición de ACUAMED, S.A., al amparo del Contrato de Asistencia Técnica suscrito por esta Sociedad con el IGME. El objetivo es hacer una caracterización de las unidades hidrogeológicas implicadas en el abastecimiento de la demanda de agua en municipios situados en las estribaciones meridionales de la sierra de los Filabres y en la fosa de Sorbas-Tabernas, entre los términos municipales de Gergal y Sorbas, así como del acuífero de Bacares, situado en la vertiente septentrional de la Sierra de los Filabres, y se realizará un diagnóstico del estado de dichas unidades a partir de los datos históricos de piezometría y calidad existentes en este Centro.

Dichas unidades, pertenecientes al sector oriental de la Cuenca Mediterránea Andaluza (antigua Cuenca Hidrográfica del Sur), son las siguientes:

- U.H. 06.07. Bedar-Alcornia.
- U.H. 06.08. Río Aguas.
- U.H. 06.09. Campo de Tabernas.

Por parte de la empresa ACUAMED, S.A., se ha facilitado un mapa de ubicación de los municipios a los que se pretende optimizar el abastecimiento, así como las especificaciones sobre la información requerida.

2. INTRODUCCIÓN

La zona objeto de estudio se sitúa en el sector oriental de la Cuenca Mediterránea Andaluza, anteriormente Cuenca Hidrográfica del Sur, en la provincia de Almería. Una de las principales características de este sector de la cuenca es su climatología extremadamente adversa para la recarga de los acuíferos. La precipitación media anual oscila entre 200 y 300 mm/año, la más baja del territorio peninsular, y una evapotranspiración de referencia en torno a los 800 mm/año, lo que convierte a esta región en una de las más áridas de España.

Las formaciones geológicas aflorantes en esta zona, están formadas principalmente por materiales metapelíticos, metapsamíticos y carbonatados, pertenecientes a los complejos Nevado-Filábride y Alpujárride del sector oriental de la cordillera Bética, que constituyen las sierras de los Filabres, al norte, Alhamilla y Cabrera al sur y sureste respectivamente, y sedimentos neógenos post-tectónicos de carácter margoso-evaporítico y detrítico, que rellenan la fosa de Sorbas-Tabernas. En esta última depresión, durante el cuaternario se desarrollan una serie de depósitos aluviales asociados a las ramblas que disectan tanto la fosa como los relieves circundantes (figura 1). Dentro de este esquema, las formaciones que constituyen los acuíferos principales son las siguientes:

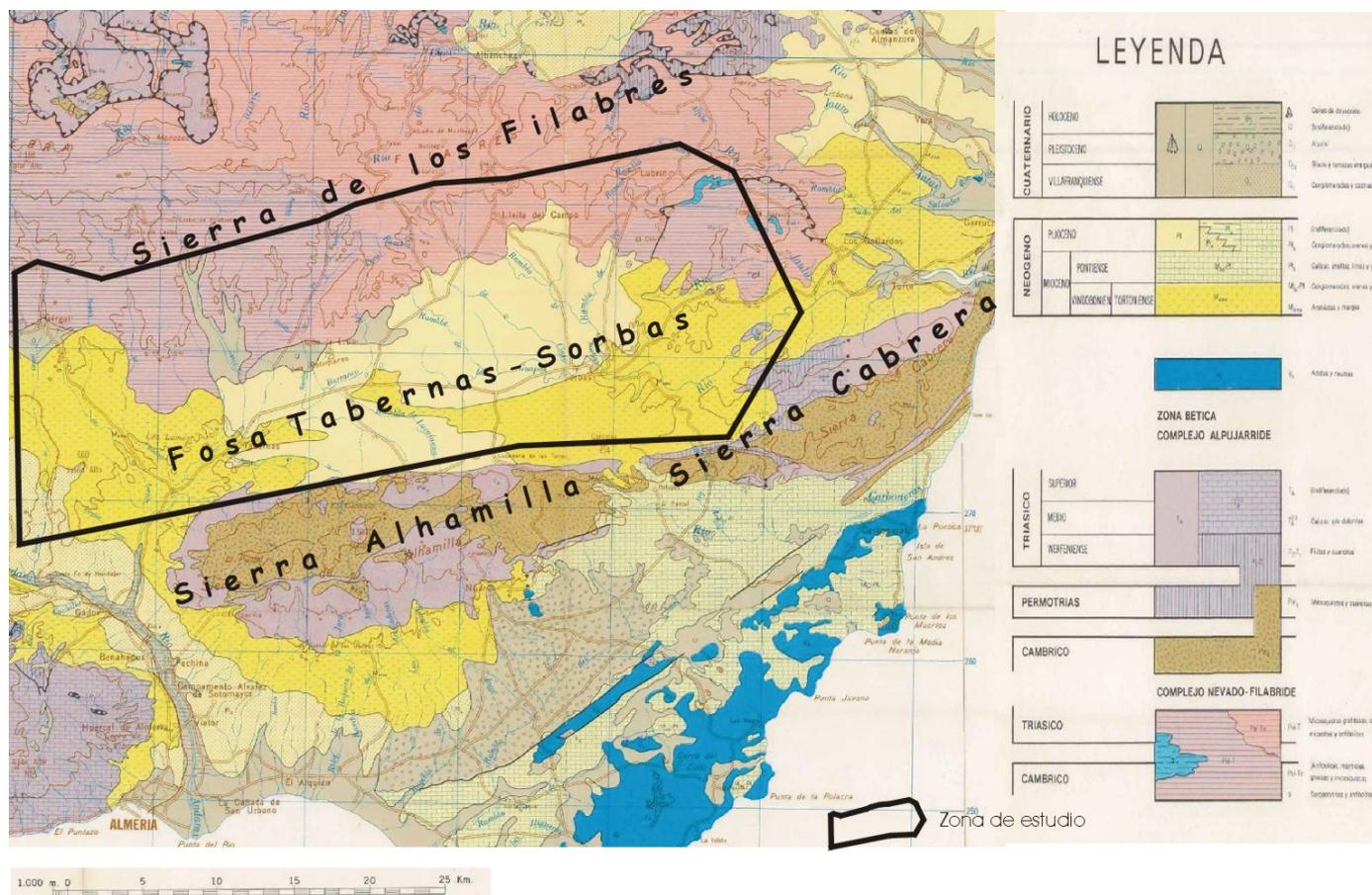


Figura 1. Mapa geológico y de situación de la zona de estudio.

- Cobertura carbonatada triásica de los complejos Alpujárride y Nevado Filábride, con características hidráulicas dependientes del grado de fisuración y sobre todo de karstificación. Dan lugar a los acuíferos más significativos de la región, con los recursos de mejor calidad. Se trata de acuíferos fisurados normalmente libres.
- Materiales calcareníticos y detríticos neógenos, intercalados entre sedimentos margosos, aflorantes en la fosa neógena de Sorbas-Tabernas, conocidas también como unidades neógenas del río Aguas. Suele tratarse de acuíferos detríticos y fisurados de carácter libre y confinado. Sus características hidráulicas son muy variables aunque las captaciones no obtienen rendimientos demasiado buenos. La calidad del agua también es muy variable, dependiendo de las zonas, aunque suelen ser habituales problemas de salinización por lixiviados desde las formaciones evaporíticas, también presentes en el relleno neógeno. Las aguas suelen ser potables en zonas de cabecera e inservibles para uso urbano aguas abajo.



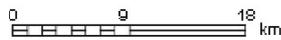
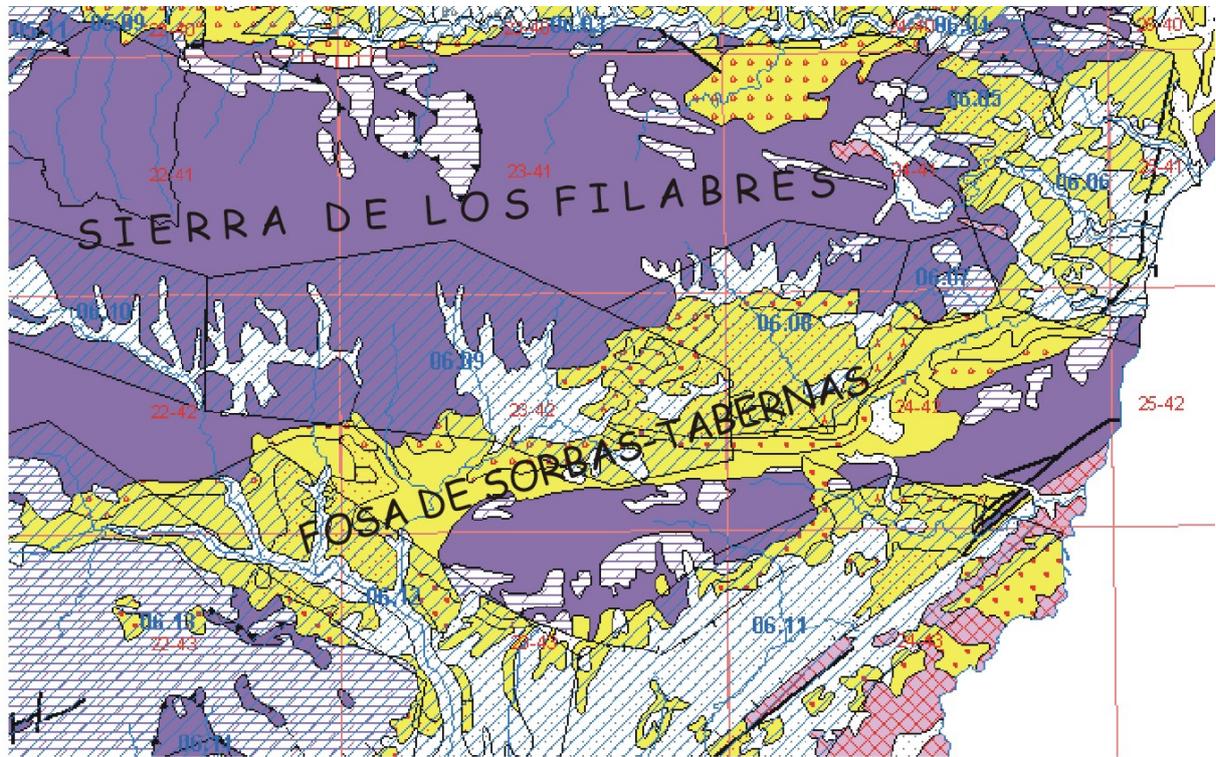
- Materiales aluviales cuaternarios. Están formados por sedimentos aluviales que constituyen los acuíferos detríticos de Tabernas y Gérgal, ambos en la cuenca del río Andarax. Estos acuíferos formados por arenas y gravas en la zona de Gérgal y conglomerados, gravas y arenas en la zona de Tabernas, se disponen fosilizando paleorrelieves desarrollados sobre materiales de baja permeabilidad neógenos y metapelíticos. Se trata de acuíferos detríticos de carácter libre en los que se alcanzan caudales específicos que oscilan entre 1 y 7 L/s/m. La calidad de los recursos está bastante degradada, debido a la alta salinidad debida sobre todo a altas concentraciones en cloruros y sulfatos. Por lo general las aguas no son aptas para consumo urbano.

El resto de materiales, tanto neógenos como cámbricos/paleozoicos/triásicos, suelen ser de baja permeabilidad, a excepción de las evaporitas neógenas de la fosa de Sorbas, donde se desarrolla un karst en yesos con alta permeabilidad secundaria por conductos. En las zonas de las sierras circundantes a la fosa de Sorbas-Tabernas, de la zona Bética, se desarrollan acuíferos muy limitados en los materiales metamórficos de baja permeabilidad, relacionados con zonas de fractura.

3. ANTECEDENTES

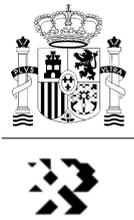
No existe mucha información de las estas unidades hidrogeológicas. Cabe resaltar los trabajos realizados por el IGME a través del proyecto PIAS “Investigación Hidrogeológica de las Cuencas del Sur de España (Sector Oriental)”, así como diversos informes y notas técnicas realizados sobre abastecimientos en el Campo de Tabernas. Esta información básica ha sido reelaborada a lo largo de los años en diversos estudios de síntesis. Uno de los más destacados es el Atlas Hidrogeológico de Andalucía, editado por la Junta de Andalucía y el IGME, en 1998.

En el año 2004, el IGME junto con la Confederación Hidrográfica del Sur y el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, redefinieron los límites de las unidades hidrogeológicas de la mencionada cuenca, definidos previamente en 1988 por la Dirección General de Obras Hidráulicas y el IGME, aprovechando la mejora en el conocimiento hidrogeológico producido desde la definición primigenia. Por ello en el presente estudio de síntesis se han utilizado los nuevos límites. Éstos, al ser más acordes con la distribución espacial de los materiales, han supuesto en muchos casos la incorporación de sectores de las antiguas unidades a las colindantes, así como la ampliación, reducción o incluso la definición de algunas nuevas. Entre los cambios más significativos destacan la ampliación de la U.H. 06.08 Río Aguas hacia el este, hasta la costa, y hacia el oeste, y el recorte sustancial de la U.H. 06.09 Campo de Tabernas tanto por el este como por el oeste, incorporándose estos sectores a las unidades 06.08 y 06.10 respectivamente.



-  Marismas
-  Arcillas, limos y arenas
-  Glaciares, coluviones, conos de deyección y terrazas antiguas
-  Aluviales recientes, travertinos y playas
-  Margas, limos, arenas, arcillas y ostras
-  Conglomerados, limos, arenas y arcillas
-  Yesos masivos
-  Calizas, calcarenitas, arenas, areniscas y margas
-  Conglomerados arcillosos
-  Conglomerados, arenas, areniscas y calcarenitas
-  Areniscas del Aljibe
-  Arcillas y margas (Flysch)
-  Margas, margocalizas, areniscas, limos, arcillas y olistostromas margosos
-  Calizas, calizas de algas y foraminíferos, calizas detríticas, calcarenitas, areniscas y conglomerados
-  Margas y margocalizas
-  Calizas y dolomías
-  Margocalizas y calizas
-  Margas, margocalizas, radiolaritas con interstratificaciones de rocas volcánicas
-  Calizas, calizas margosas y margocalizas
-  Dolomías, calizas y calizas oolíticas
-  Margas, arcillas con yesos y areniscas
-  Dolomías y carníolas
-  Dolomías, calizas, mármoles y calcoesquistos
-  Micaesquistos, gneises, mármoles, filitas, esquistos, areniscas, calizas, limos, conglomerados y ouarolitas
-  Peridotitas
-  Conglomerados, areniscas arcillosas y arcillas
-  Calizas, dolomías y mármoles
-  Cuarcita Americana
-  Pizarras, esquistos, ouarolitas, gneises, areniscas y calizas
-  Rocas volcánicas
-  Rocas intrusivas tardihercínicas
-  Rocas intrusivas sinemáticas

Figura 2. Esquema hidrogeológico y situación de las unidades hidrogeológicas: 06.07; 06.08; 06.09.



4. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.07. BÉDAR-ALCORNIA

Se ubica en el sector nororiental de la cuenca del río Aguas. Los acuíferos que la conforman están constituidos fundamentalmente por calizas, dolomías y mármoles triásicos, en facies alpinas, correspondientes a la cobertera carbonatada del complejo Nevado-Filábride, con una potencia media de 300 m (figura 3). La compleja estructura geológica da lugar a compartimentaciones de acuíferos con funcionamiento independiente y relaciones laterales y de base. Así lo indica los contrastes piezométricos, con cotas que varían desde los 550 m s.n.m., como promedio al norte de Bédar, hasta los aproximadamente 125 m s.n.m. en el sector sur de la unidad. En las zonas de contacto con los materiales impermeables pueden encontrarse yesos, que también aparecen en el neógeno al sur y sureste, donde confinan a estos materiales nevadofilábrides. También constituyen acuíferos los materiales calcareníticos miocenos que afloran en el sector meridional de la unidad.

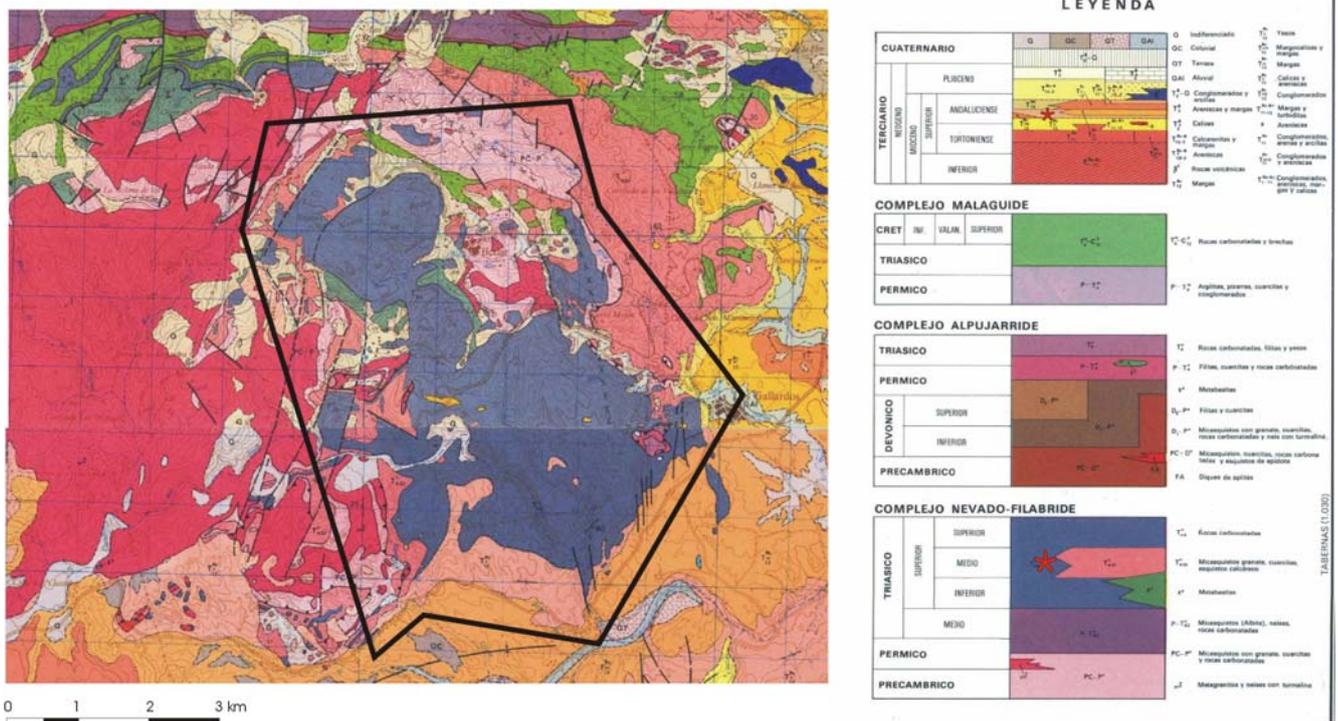


Figura 3. Mapa geológico de la unidad 06.07.



En general se trata de acuíferos fisurados y libres, aunque localmente se pueden encontrar confinados, con buenas características hidráulicas, si bien no se han confirmado por ensayos de bombeo. El espesor medio saturado se estima entre 50 y 100 m.

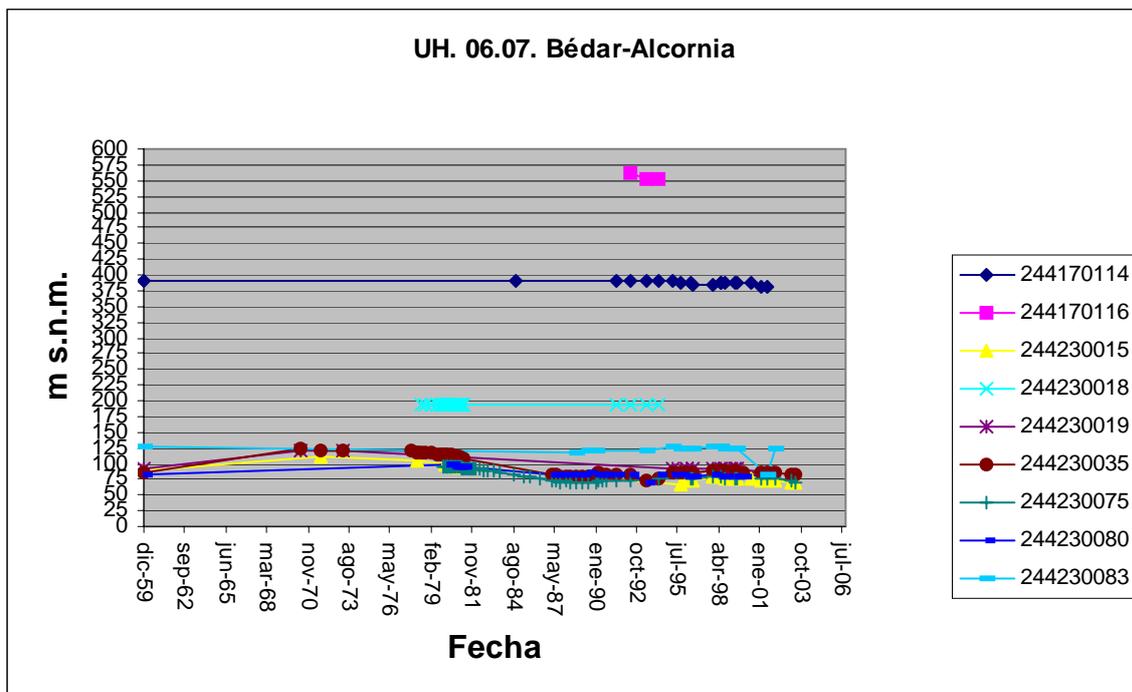
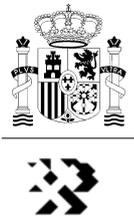


Gráfico 1. Evolución piezométrica en la UH. 06.07. Bédar – Alcornia

Los recursos renovables medios se estiman entre 2,5 y 4 hm³/año que proceden fundamentalmente de la infiltración directa de lluvia sobre materiales permeables, de la infiltración de la escorrentía superficial (2-3 hm³/año) y de la recarga lateral subterránea (0,5-1 hm³/año). Las salidas medias del sistema se producen por bombeo (3-4 hm³/año) y por descarga lateral subterránea (inferior a 0,5 hm³/año), según datos de finales de la década de los 90. El sistema se encuentra en régimen influenciado por la explotación intensiva con uso principalmente agrícola, con un total de 25 sondeos principalmente para este fin.

Los diagramas de evolución piezométrica (gráficos 1 y 2) muestran por lo general una tendencia descendente de los niveles, de hasta de 25 m para el periodo 1977-87, en el sector sur de la unidad. En la actualidad los niveles se están recuperando por disminución de la explotación. En el sector norte, sin embargo, los descensos aunque más tardíos, se mantienen hasta la actualidad, con valores acumulados de hasta 10 metros para el periodo 1995-2001. Aunque no existe declaración de sobreexplotación, el acuífero se encuentra sometido a una explotación intensiva, al menos en el sector suroriental, en el entorno de la población de Los Gallardos (DGOHCA-ITGE, 1997).



Desde el punto de vista hidroquímico, las aguas presentan facies cloruradas-sulfatadas sódico-cálcico-magnésica, no apta para el abastecimiento urbano, con una conductividad eléctrica media de unos 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aunque existe una clara zonación de la calidad. Así, en el sector norte de la unidad, (punto acuífero 244170114), la conductividad eléctrica varía entre 500 y 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que corresponde a una salinidad de 400 a 550 mg/L, mientras que en el borde meridional se llegan a alcanzar los 4.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en periodos de fuertes descensos piezométricos.

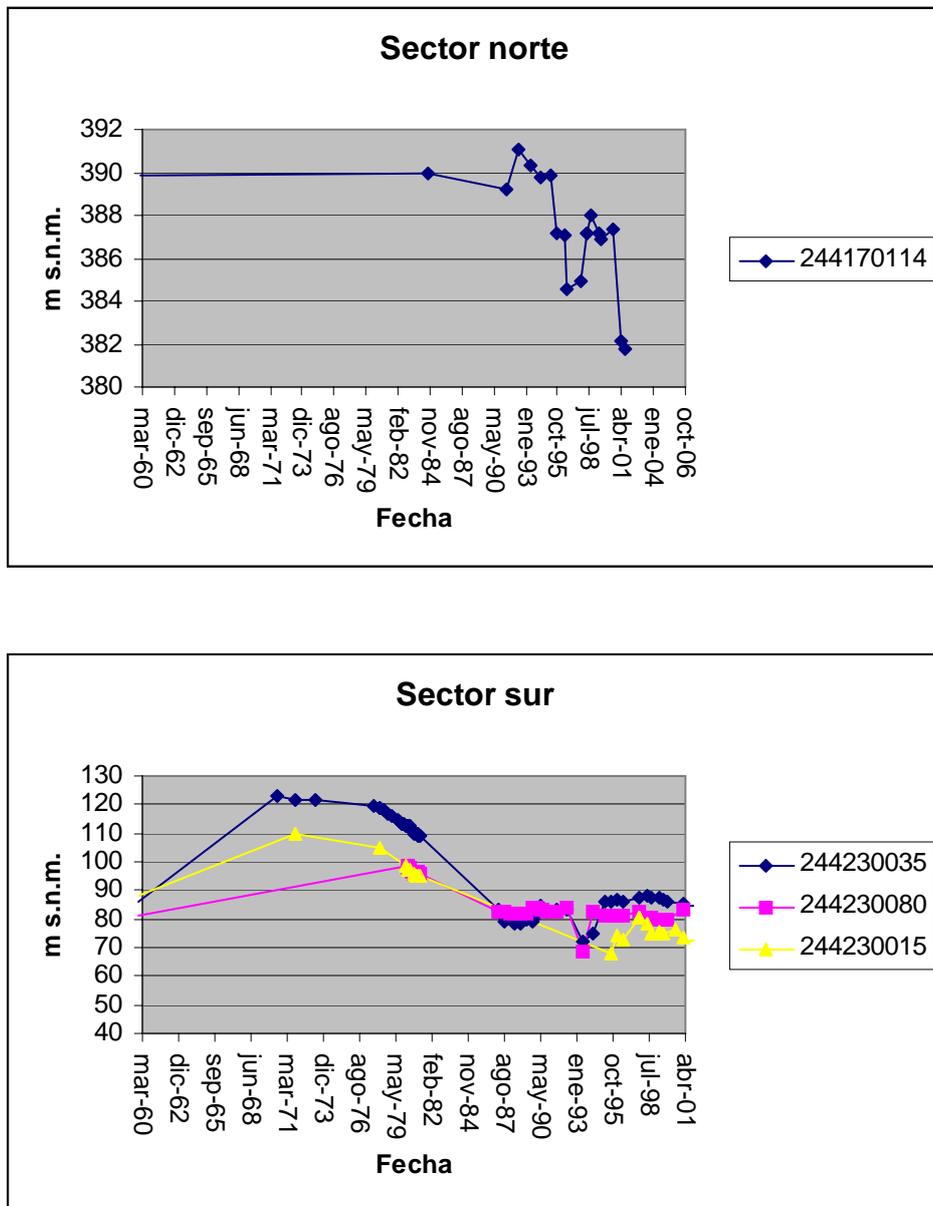


Gráfico 2. Evolución piezométrica detallada en los sectores norte y sur de la unidad hidrogeológica 06-07.

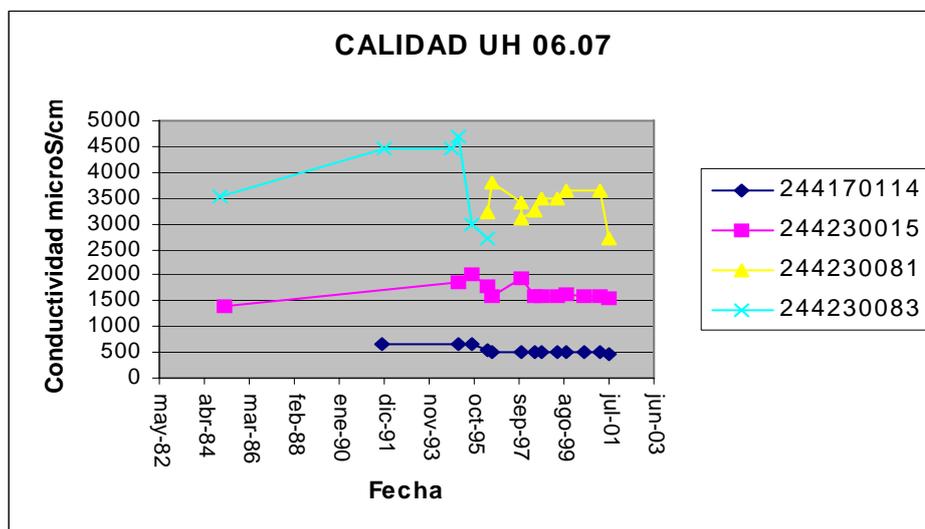


Gráfico 3. Evolución de la conductividad en la UH 06.07 Bédar-Alcornia

El diagnóstico que se puede establecer de la unidad es: 1) se han producido descensos piezométricos casi continuados desde los años 80, más acusados en el borde sureste, en el sector de los Gallardos, donde se concentran la mayor parte de las extracciones, lo que ha afectado negativamente a la calidad de las aguas subterráneas. 2) en la zona de Bédar, donde se explota el acuífero carbonatado triásico más alejado de los bordes terciarios donde es frecuente la presencia de evaporitas, la calidad se ha mantenido casi constante a pesar de haber sufrido importantes descensos desde los años 90.

De acuerdo con estos datos, se considera que desde un punto de vista cuantitativo no es sostenible un incremento de las extracciones, ya que los bombeos al menos igualan los recursos renovables, lo que produce un rápido descenso del nivel en todos los sectores de la unidad. Desde un punto de vista de la calidad del agua subterránea, en el sector meridional los valores de conductividad eléctrica superan o están muy próximos a los 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ establecido como límite por el R.D 140/2003 para aguas de consumo humano, por lo que se descarta la obtención de recursos adicionales para dicho fin, e incluso pueden verse comprometidos los recursos para uso agrícola si se mantienen los descensos. De hecho las recuperaciones de la calidad se producen en periodos donde disminuyen las extracciones por problemas de salinidad. En el sector septentrional las aguas subterráneas mantienen buena calidad incluso en periodos de descensos importantes, por lo que desde un punto de vista composicional es posible la obtención de recursos para abastecimiento urbano.



5. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.08. RÍO AGUAS

Esta unidad sufrió sustanciales modificaciones en la redefinición realizada recientemente en 2004; ésta radica principalmente en la integración del aluvial del tramo bajo del río Aguas, que en la antigua delimitación se incluía en la U.H. 06.06 Bajo Almanzora, y la incorporación del sector suroccidental que anteriormente se incluía situaba en la U.H. 06.09 Campo de Tabernas. El criterio principal utilizado para redefinir esta unidad fue la conveniencia de englobar la mayor parte de los acuíferos de la cuenca del río Aguas que tienen una evidente conexión hidráulica, incluyendo por la zona occidental los sedimentos aluviales cuaternarios de la cuenca del río Aguas y que anteriormente se englobaban en la unidad hidrogeológica del Campo de Tabernas, que tiene relación con la cuenca del río Andarax. De este modo se incorporaron nuevos términos cuaternarios, miocenos y triásicos carbonatados.

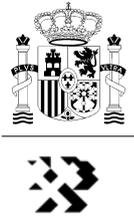
Este sistema hidrogeológico tiene una tipología litológica muy diversa. Está constituido en primer lugar por arenas, gravas, limos y conglomerados cuaternarios-pliocuaternarios, correspondientes a los sedimentos aluviales del río Aguas, en su trazado oriental, así como sus principales ramblas tributarias. También se integran en esta unidad algunos términos pliocenos/miocenos (conglomerados, arenas y calcarenitas) y miocenos (conglomerados, arenas y areniscas). La zona con mayores rendimientos hidráulicos se encuentra en los sedimentos miocenos carbonatados y detríticos ubicados al norte de la unidad. Una singularidad de esta unidad, y que merece una mención aparte, es la presencia de los yesos miocenos, en la cuenca terciaria de Sorbas que dan lugar al karst del mismo nombre. Se incluyen también algunos afloramientos de materiales carbonatados triásicos al norte de la sierra Cabrera, en el sector oriental próximo a la costa.

El espesor de los términos neógenos es muy variable, aunque se estima un promedio de 200-300 m de los que 35 a 75 m se encuentran saturados.

Se trata de acuíferos de carácter libre, aunque localmente se pueden encontrar semiconfinados. No se dispone de ensayos de bombeo que permitan cuantificar los parámetros hidráulicos de estos materiales.

Los recursos medios estimados de la unidad proceden fundamentalmente de la infiltración de la precipitación directa sobre los materiales permeables y de la infiltración de la escorrentía superficial (3-4,5 hm³/año), de la recarga lateral subterránea (1,2-2,5 hm³/año, y de los retornos de riego y pérdidas de las redes de distribución urbanas (0,5-1 hm³/año). Las principales salidas del sistema se producen por bombeos (2 hm³/año), descargas de galerías y manantiales (2,5-3,5 hm³/año), y descargas laterales subterráneas (1,5-3 hm³/año).

Asociadas a esta unidad hidrogeológica, existe una zona húmeda y dos manantiales significativos: Los Molinos del río Aguas (al este de Sorbas) y la Fuente del Lentisco (varios kilómetros aguas arriba de la confluencia con el río Jauto).



La evolución temporal de niveles piezométricos (gráficos 4 y 5), presenta una tendencia ligeramente descendente en el entorno de Sorbas y bastante acusada en la zona occidental, con una tasa anual de unos 2 m/año de descenso promedio.

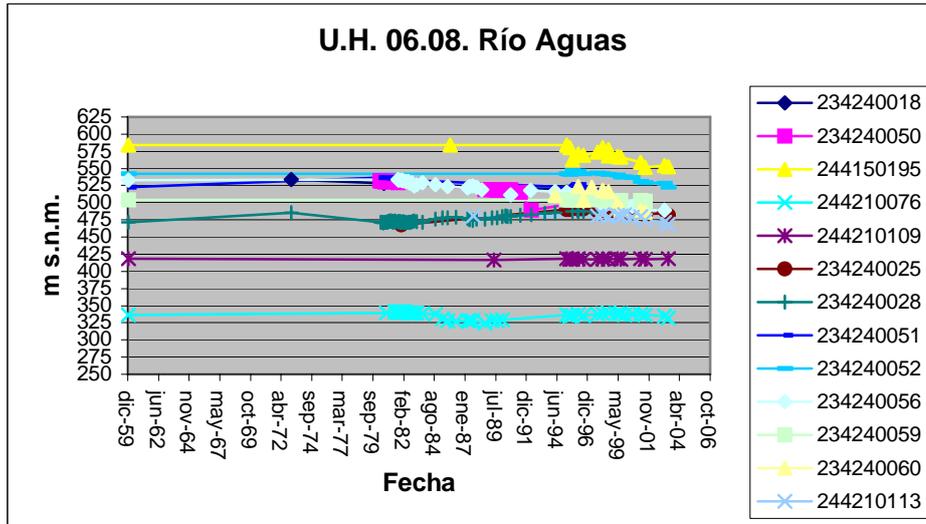


Gráfico 4. Evolución piezométrica general de la UH. 06.08. Río Aguas

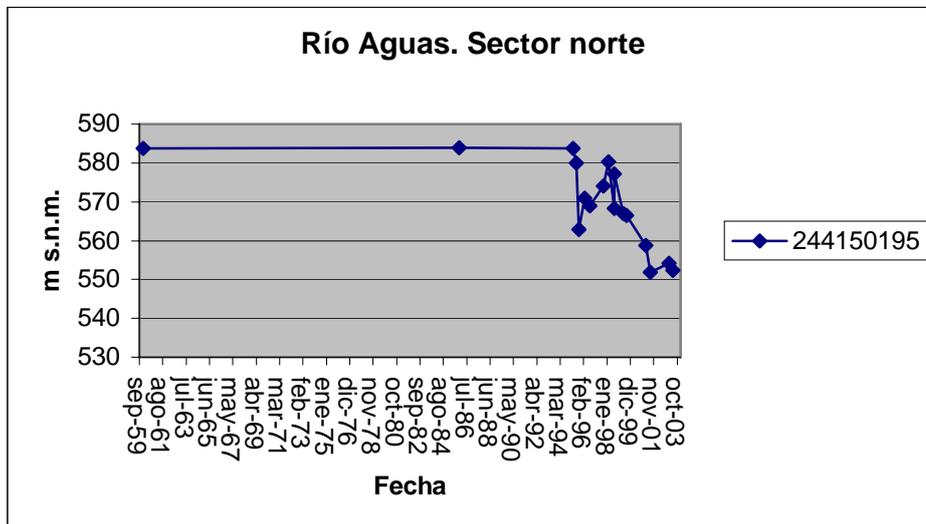


Gráfico 5. Evolución piezométrica en el sector norte de la UH. 06.08. Río Aguas

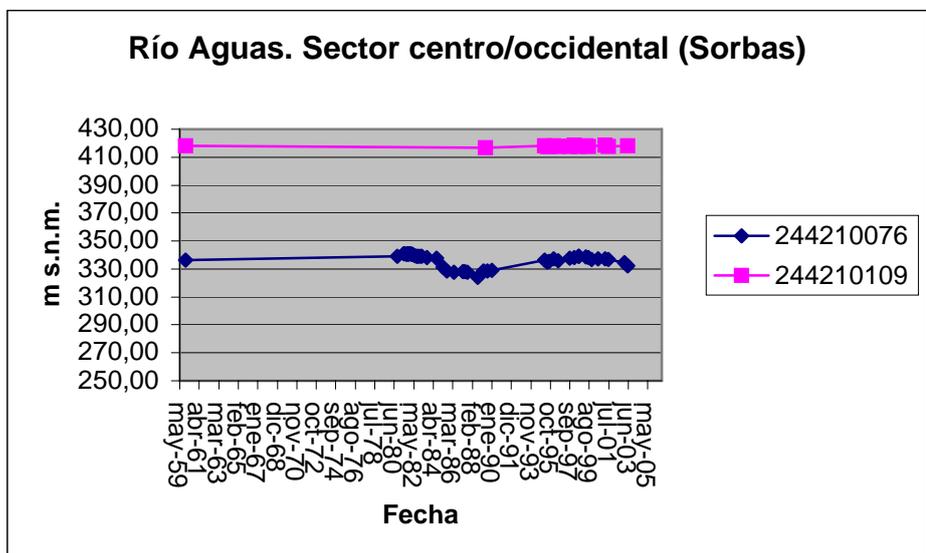
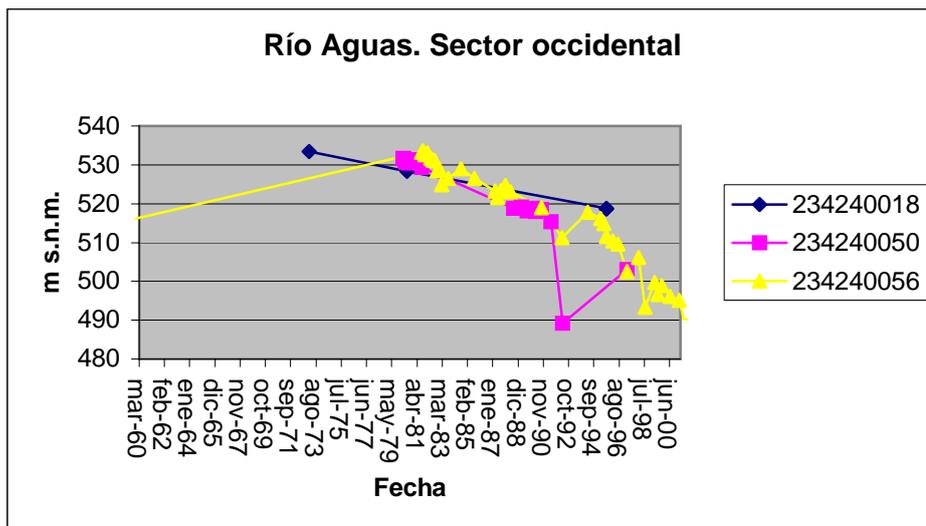


Gráfico 6. Evolución piezométrica en el sector occidental de la UH. 06.08. Río Aguas

La hidroquímica (gráfico 7) es muy variable de unos sectores a otros, así como entre los distintos tramos captados en los acuíferos neógenos. De forma general se puede establecer que existen fluctuaciones estacionales y un empeoramiento de la calidad en el sentido del flujo subterráneo de oeste a este. En las zonas yesíferas (sector de Sorbas) destacan las altas concentraciones salinas (4-6 g/L). Predominan las facies

sulfatadas o sulfatadas-bicarbonatadas cálcico-magnésicas. Los acuíferos carbonatados triásicos suelen tener un TSD de 1 g/L.

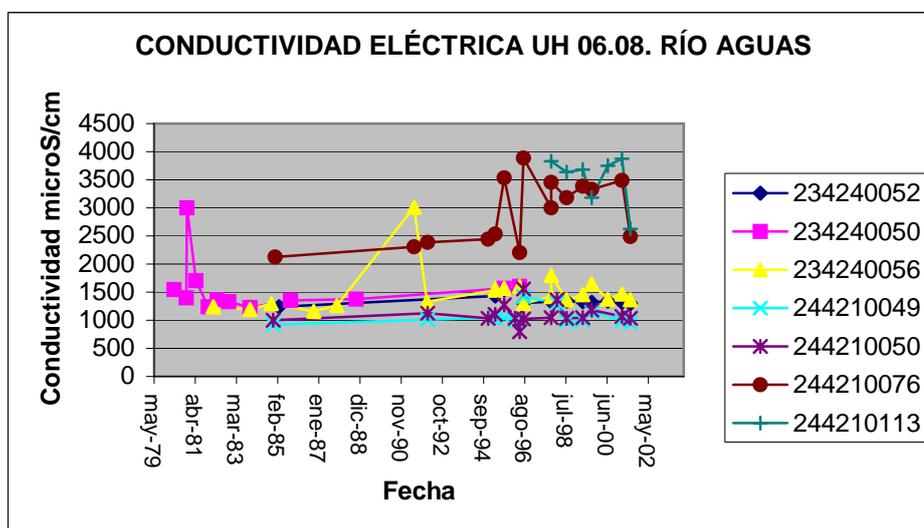


Gráfico 7. Evolución de la conductividad eléctrica en las aguas subterráneas de la UH 06.08.

Los principales problemas de contaminación están relacionados con el vertido de aguas residuales, la aplicación excesiva de fertilizantes y sobre todo por la lixiviación desde horizontes salinos miocenos, como consecuencia de los bombeos.

El diagnóstico del estado de la unidad es el siguiente:

1º Los sectores occidentales y septentrionales de la unidad, correspondientes al acuífero carbonatado mioceno, son los únicos donde la calidad del agua es apta para el consumo humano, y son los más intensamente explotados, de manera que se producen descensos continuados del orden de 2 m/año. Esta situación es indicativa de un estado no sostenible de la explotación a largo plazo, desde un punto de vista cuantitativo.

2º En los sectores norte y central, la calidad de los recursos extraídos es deficiente para abastecimiento humano debido a la alta salinidad.

Por ello no parece posible obtener recursos adicionales para abastecimiento humano sin comprometer la calidad del acuífero calcarenítico mioceno. Del mismo modo la obtención de recursos para este mismo fin, en el sector yesífero central, no es viable debido a problemas de salinidad.

La única opción para obtener nuevos recursos es el acuífero calcarenítico mioceno en el sector oriental, al sur de la confluencia de los ríos Jauto y Aguas, si bien este sector de la unidad se aleja de la zona de abastecimiento indicada en las especificaciones de ACUAMED. La ausencia en esta zona de información previa, sobre todo en lo relativo a datos históricos de piezometría y calidad, dificulta la toma de decisiones y hace necesario emprender un estudio hidrogeológico detallado del mismo.



6. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.09. CAMPO DE TABERNAS

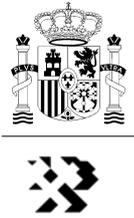
Integra una serie de materiales detríticos de cobertura de gran variabilidad litológica y complejas relaciones entre los mismos. En la modificación de los límites de las unidades hidrogeológicas de 2004, se ha desplazado ligeramente hacia el sur, con el objeto de incluir parte de los términos aluviales cuaternarios y miocenos, así como los términos carbonatados triásicos y la rambla de Tabernas. Se excluye sin embargo por el oeste el cuaternario del sector de Gergal, incluyéndose ahora en la Unidad Hidrogeológica 06.10 Cuenca del Río Nacimiento.

Los acuíferos del Campo de Tabernas se sitúan en la depresión neógena-cuaternaria existente entre las sierras de Alhamilla y Filabres, en las proximidades de la población de Tabernas, sin que exista relación de continuidad por el este con los sedimentos del río Aguas, por lo que el límite entre ambas unidades se debe establecer en la divisoria de aguas.

El drenaje superficial se produce a través de la rambla de Tabernas, la cual resulta de la confluencia de las ramblas de Galera, Los Molinos y Lucaicena, siendo en conjunto la cuenca tributaria de la del río Andarax.

Sobre un sustrato paleozoico/triásico atribuible a los complejos Nevado-Filábride y Alpujárride, en su mayor parte constituido por esquistos de baja permeabilidad, se halla una formación basal conglomerática continental, con matriz arenoso arcillosa, atribuida al Mioceno medio-superior, que presenta fuertes variaciones de espesor y que aflora extensamente en Tabernas, con más de 450 m de potencia. Le sigue una formación del Mioceno superior, esencialmente margosa de hasta 1.000 m de espesor con intercalaciones de areniscas y conglomerados, y donde hacia el techo se individualizan calcarenitas, calizas arrecifales y yesos. Las calizas arrecifales y las calcarenitas llegan a tener espesores de 75 m y afloran en el borde nororiental de la depresión. Los paquetes de yesos pueden alcanzar los 50 m de espesor y afloran en el extremo oriental de la unidad junto a la divisoria de aguas con la cuenca del río Aguas. Sobre las formaciones anteriores se individualiza una formación calcarenítica con niveles de areniscas, conglomerados y margas atribuida al Mioceno-Plioceno, representada de forma marginal en el extremo oriental del Campo de Tabernas, aunque presenta mayor desarrollo en la cuenca del río Aguas. Sobre esta formación yacen sedimentos plio-cuaternarios, constituidos por conglomerados, arenas y arcillas, con fuertes variaciones de facies y espesor. El Cuaternario antiguo ocupa la práctica totalidad del sector central del Campo de Tabernas. Incluye gravas, arenas y arcillas con eventuales caliches. Finalmente los depósitos aluviales ocupan los cauces de las ramblas.

Desde un punto de vista hidrogeológico, los principales acuíferos están formados por conglomerados, gravas y arcillas cuaternarios-pliocuaternarios, con un espesor medio de 20-50 metros, de los que se encuentran saturados hasta un máximo de 30 m y por términos miocenos constituidos por conglomerados, arenas, calcarenitas y yesos con espesor de 50-100 m de los que 40 a 50 m se encuentran saturados. Esta unidad también incorpora algunos retazos de afloramientos de materiales carbonatados



triásicos bien representados al norte de Sierra Alhamilla. De un modo muy general el substrato impermeable de todos lo niveles acuíferos es la formación margosa miocena, que junto con los esquistos del basamento bético aflorantes al norte y sur del Campo de Tabernas, definen los límites de esta unidad hidrogeológica por todos sus bordes, excepto por el este, donde los niveles permeables se prolongan hacia la cuenca del río Aguas.

Se trata de acuíferos de carácter libre que presentan gran variabilidad en sus características hidráulicas. El acuífero mioceno aparece localmente confinado.

Los recursos medios estimados proceden fundamentalmente de la infiltración de la precipitación directa sobre los acuíferos (1-2 hm³/año), de la infiltración desde la escorrentía superficial (2-3 hm³/año) y de los retornos de riego y pérdidas de las redes de abastecimiento (1 hm³/año). Las principales salidas se producen por bombeos (1-2 hm³/año) y descargas laterales subterráneas (2-5 hm³/año).

Los niveles piezométricos presentan una tendencia estable (gráfico 8), aunque en sectores próximos a cauces, se aprecian importantes recuperaciones en años húmedos. El flujo subterráneo se establece hacia el oeste, coincidiendo con la escorrentía superficial, aunque en su extremo más oriental, no se descartan algunas descargas hacia el este a los acuíferos del Alto Aguas.

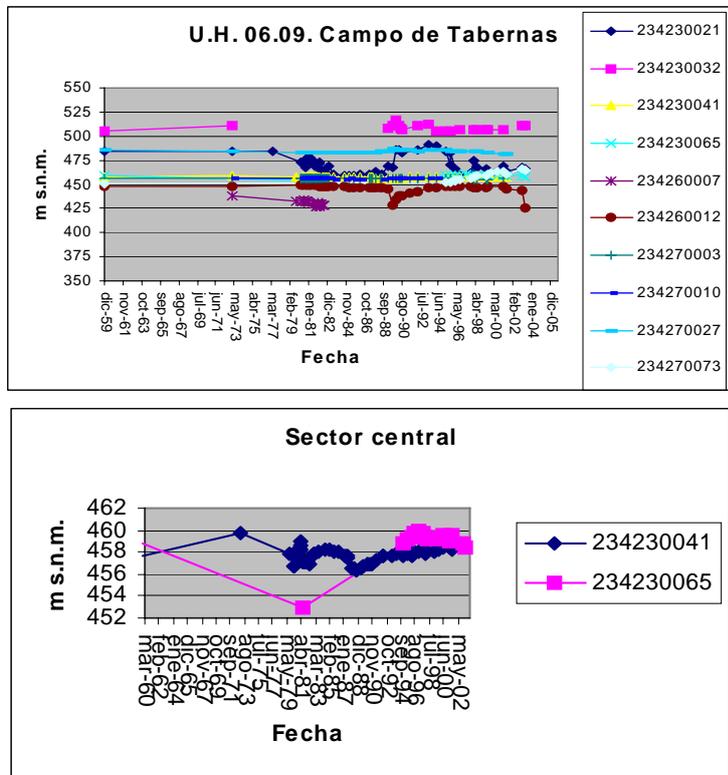


Gráfico 8. Evolución piezométrica en la UH. 06.09. Campo de Tabernas



En lo que se refiere a las características hidráulicas de los acuíferos solo puede decirse que se han detectado caudales específicos de 1 a 3 L/s/m en el acuífero cuaternario, lo que equivale aproximadamente a una transmisividad de 100-300 m²/día, y de 6 a 7 L/s/m en un sondeo que capta yesos miocenos y materiales detríticos pliocenos.

El carácter hidroquímico es muy variable, según los sectores y tramos captados (cuaternario o mioceno) (gráfico 9). Las salinidades son generalmente altas especialmente en las áreas yesíferas, predominando las facies sulfatadas cálcico-magnésicas, cloruradas sódicas y bicarbonatadas sódicas. Estas últimas corresponden a los acuíferos carbonatados triásicos en facies alpinas, donde las salinidades son menores. Los principales problemas de contaminación están relacionados con el vertido de aguas residuales y aplicación excesiva de fertilizantes. También existen indicios de lixiviación desde horizontes salinos provocados por bombeos.

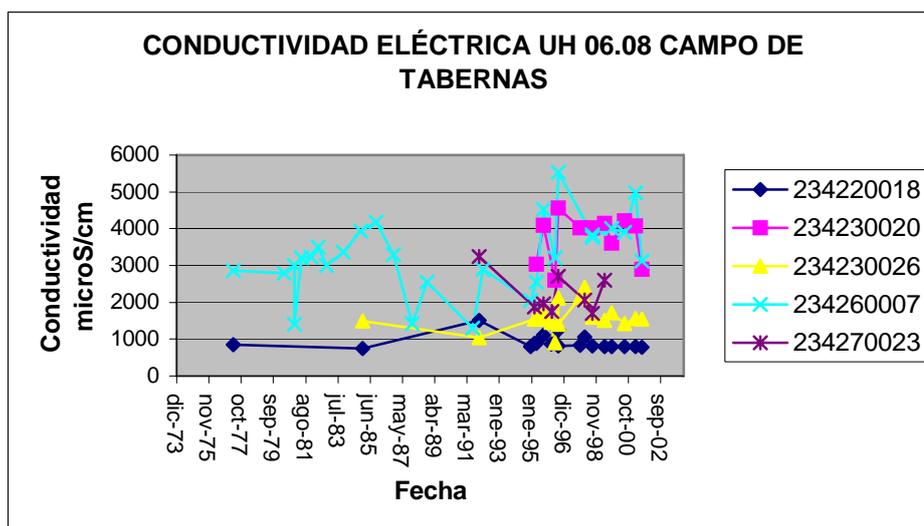


Gráfico 9. Evolución de la conductividad eléctrica en las aguas subterráneas de la UH. 06.08

Por motivos de calidad y rendimiento hidráulico, los materiales de mayor interés para aprovechamiento de agua subterráneas son los cuaternarios en conexión hidráulica con los aluviales de las principales ramblas, en las que hay una alimentación más frecuente.

De acuerdo con los datos expuestos, el grado de explotación del acuífero se puede incrementar a priori en torno a 2 hm³/año, aunque la calidad de los recursos sería bastante deficiente por la alta salinidad de los mismos y casi siempre por encima del límite de conductividad eléctrica de 2.500 µS/cm establecido por el R.D. 140/2003 para aguas de consumo humano.



7. ACUÍFERO DE GÉRGAL. SECTOR ORIENTAL DE LA U.H. 06.10 CUENCA DEL RÍO NACIMIENTO

El acuífero de Gérgal ocupa el sector oriental de la Unidad Hidrogeológica 06.10 Cuenca del río Nacimiento, inmediatamente al oeste de la Unidad Hidrogeológica 06.09 Campo de Tabernas, con la que no existe relación de continuidad.

El acuífero se asienta en los materiales detríticos aluviales existentes en las proximidades de la población de Gérgal, constituidos por sedimentos gruesos (conglomerados, brechas y arenas) que rellenan las depresiones tectónicas del suroeste de Gérgal, y por los sedimentos que ocupan ramblas actuales, formados por bloques, cantos, gravas y arenas procedentes del desmantelamiento de los relieves circundantes. Estos sedimentos son en su totalidad de edad cuaternaria, y yacen sobre un sustrato de baja permeabilidad, que actúa a modo de impermeable de base, constituido por los materiales metamórficos del complejo Nevado-Filábride.

La superficie ocupada por estos materiales es de 27 km², hasta la divisoria con el arroyo de los Arcos que vierte al río Nacimiento, aunque la superficie total de cuenca vertiente al acuífero es de 80 km².

Los datos de piezometría son muy escasos, habiéndose encontrado exclusivamente cuatro valores puntuales correspondientes a mayo de 1972, que reflejaban cotas piezométricas entre 716 y 684 m s.n.m. Por lo tanto no se dispone de series históricas.

Los recursos disponibles de este acuífero se pueden estimar en 0,1-0,3 hm³/año procedentes de la infiltración directa de lluvia sobre los materiales permeables, y en 0,4 a 0,8 hm³/año procedentes de la escorrentía superficial generada en los terrenos poco permeables de la cuenca vertiente y que se estima que se infiltran en su mayor parte, lo que asciende a un total de 0,5-1,1 hm³/año. Al no existir estudios específicos de este acuífero es necesario considerar estos valores con cautela.

8. SUBSISTEMA ACUÍFERO ALCÓNTAR-BACARES. SECTOR ORIENTAL DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.62. SIERRA DE LOS FILABRES

Esta unidad hidrogeológica, de nueva creación en 2004 ya que a pesar de su significativa extensión e interés no fue incluida en la anterior delimitación de unidades hidrogeológicas, está constituida por materiales carbonatados triásicos alpujárrides y nevado-filábrides, dispuestos sobre materiales metapelíticos que actúan como impermeables de base (figura 4). Esta unidad se sitúa en la vertiente septentrional de la Sierra de los Filabres, vertiendo sus aguas hacia la cuenca del río Almanzora, por su margen derecha, principalmente. Dentro de esta unidad se distingue un sector occidental, que coincide con el subsistema acuífero Alcóntar-Bacares, y un sector oriental que corresponde al subsistema Macael-Líjar. El primero de ellos, por su situación geográfica puede ser de interés para los fines del presente estudio.

La potencia mínima de los materiales carbonatados que constituyen este subsistema es de 200 m, cubriendo una superficie de unos 60 km², con precipitaciones de 400 mm/año. Se trata de acuíferos de carácter libre con buenas características hidráulicas, aunque de significativa variabilidad, con valores de transmisividad entre 500 y 2.100 m²/día y coeficientes de almacenamiento en torno al 2%. Las explotaciones por bombeos, en los años 80 eran prácticamente inexistentes, siendo los manantiales y galerías los únicos aprovechamientos. No obstante sería necesario abordar trabajos de actualización del inventario de puntos acuíferos con el fin de confirmar esta información.

El funcionamiento del sistema es simple aunque desconocido con exactitud desde un punto de vista cuantitativo: recibe la infiltración del agua de lluvia directa y de la escorrentía superficial, y la descarga se produce a través de manantiales y galerías (2 hm³/año controlados) así como descargas subterráneas a los aluviales del río Almanzora.

Al total de la unidad, incluyendo los dos subsistemas mencionados, se le asignan unos recursos renovables de 2-5 hm³/año, de los que 2-3 hm³/año proceden de infiltración de la precipitación directa sobre los acuíferos, y 1-2 hm³/año de la infiltración procedente de los cauces.

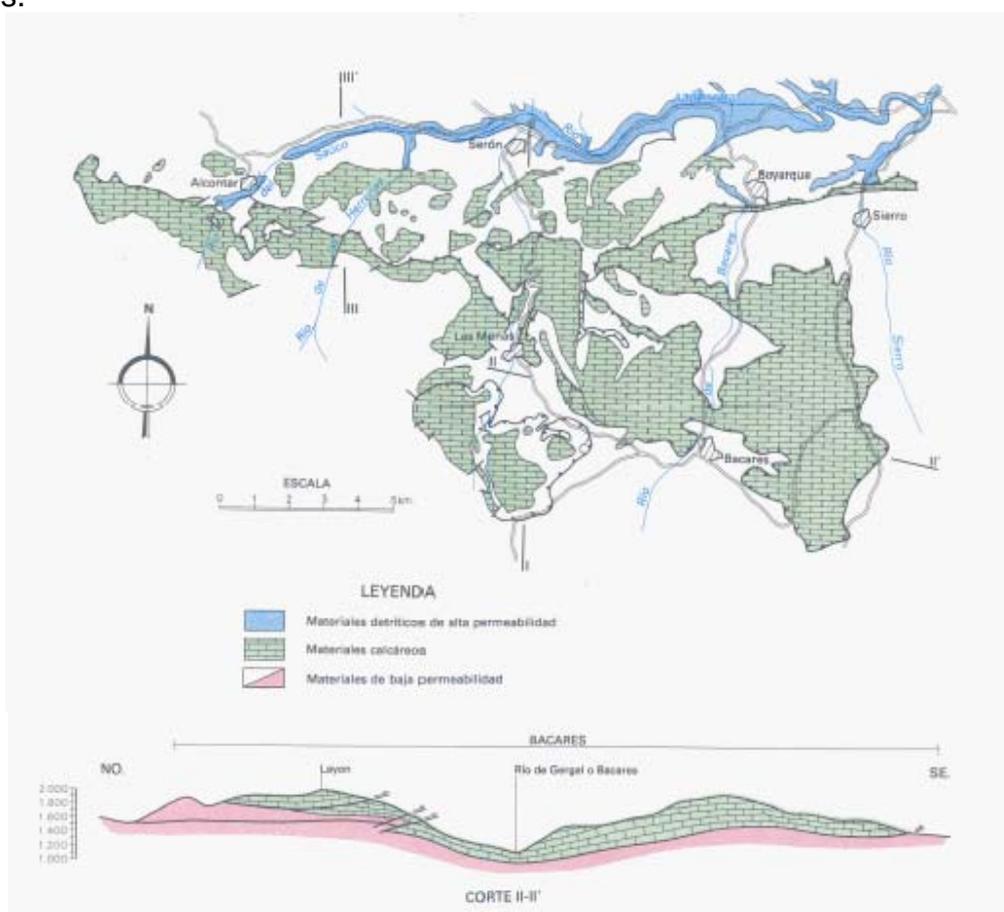


Figura 4. Esquema y corte II-II' del subsistema acuífero Alcántar-Bacares



En el subsistema de Alcóntar-Bacares los niveles piezométricos oscilan entre los 750-1.080 m s.n.m.

Desde un punto de vista hidroquímico, las aguas presentan facies bicarbonatada cálcica y/o cálcico-magnésica, ocasionalmente sulfatadas, con algunos fenómenos de termalismo.

9. CONCLUSIONES

El análisis de los datos existentes de las unidades implicadas en este estudio ponen de manifiesto una serie de aspectos de interés a la hora de establecer un plan de gestión de los recursos hídricos:

- 1) Este sector oriental de la Cuenca Mediterránea Andaluza es uno de los que presentan más baja precipitación de España, con valores medios que oscilan entre 200 y 300 mm/año, y tasas de ETP del orden de 800 mm/año. Teniendo en cuenta que la mayor parte de los recursos subterráneos renovables proceden de la infiltración de la lluvia caída sobre materiales permeables, la tasa de recarga es extremadamente baja.
- 2) El grado de conocimiento de las Unidades Hidrogeológicas es escaso. Faltan estudios de detalle que permitan establecer los datos básicos del balance hídrico. La mayor parte de los datos que se manejan proceden de las estimaciones que se realizaron en el proyecto PIAS en los años 70. La información más fiable procede de los datos aportados por las redes de control de las aguas subterráneas, aunque existen amplios sectores sin datos históricos.
- 3) La interpretación de los datos disponibles permite determinar que en la mayor parte de los acuíferos estudiados la tendencia descendente de los niveles piezométricos y el incremento de la salinidad responde a una situación en la que las extracciones están superando los recursos renovables de los acuíferos, lo que implica una situación de sobreexplotación. Las recuperaciones que se producen ocasionalmente responden a periodos en los que disminuyen las extracciones como consecuencia de la degradación de la calidad o un excesivo abatimiento de la superficie piezométrica. La única excepción, parece corresponder al acuífero de Bacares, en base a los datos de balance hídrico disponibles, aunque la falta de datos de piezometría y calidad no permiten hacer una estimación del estado actual del acuífero.
- 4) Para poder establecer con detalle el nivel de explotación sostenible de estos acuíferos se precisaría un estudio de detalle mediante la obtención de los datos del balance hídrico (entradas y salidas del sistema), y la obtención de datos de piezometría y calidad en una red específica de observación, aunque a priori la situación del aprovechamiento, desde los años 70, parece superar los recursos renovables, por lo que un uso sostenible implicaría una disminución de las extracciones.



10. RECOMENDACIONES

A la vista de los datos expuestos se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Es necesario conocer con mayor grado de detalle los datos básicos del balance hídrico, sobre todo en relación con las salidas. Para ello se precisa realizar una actualización del inventario de puntos acuíferos, así como una evaluación de las extracciones. En el caso concreto del acuífero de Bacares es necesario además hacer una evaluación de la recarga, ya que se desconocen los recursos renovables.
2. En la mayor parte de los acuíferos estudiados las tendencias descendentes de la piezometría y la evolución de la conductividad eléctrica, indican que se están produciendo situaciones de sobreexplotación puntual, por lo que es muy probable que el uso sostenible de las aguas subterráneas lleve a una reducción de los bombeos y a una importación de recursos de buena calidad, al menos para el abastecimiento humano, manteniendo parte de las extracciones de calidad mediocre para el uso agrícola. A este respecto es de gran interés el estudio del acuífero de Bacares, así como considerar la posibilidad de importar recursos externos.

LOS AUTORES DE LA NOTA TÉCNICA

Fdo.: Julio López Gutiérrez

Fdo.: Juan Antonio López Geta



10. BIBLIOGRAFÍA

DGOH-IGME, 1988. Estudio de delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características. Informe 2505 Servicio Geológico.

DGOHCA-ITGE (1997). Catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización. Predefinición del programa de actuación (convenio DGOHCA-ITGE).

IGME, 1986. El agua subterránea en Andalucía.

IGME, 1975. PIAS. Plan de investigación de aguas subterráneas. Cuenca Sur sector oriental.

IGME, 1977. PIAS. Estudio Hidrogeológico de la cuenca Sur (Almería). Informe Final. (Campo de Dalías. Cuenca del Andarax. Cuenca del Almanzora. Cuenca del Antas. Cuenca del Aguas. Cuenca del Adra. Campo de Níjar).

IGME, Confederación Hidrográfica del Sur y Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, 2004. Redefinición de las Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca Sur.

ITGE, 1973. Informe Hidrogeológico del termino municipal de Tabernas. (Provincia de Almería).

ITGE, 1978. Informe Hidrogeológico del Campo de Tabernas (Almería).

ITGE, 1982. Plan de Gestión y Conservación de Acuíferos. Cuenca Sur Sector Oriental Almería. (Río Andarax, Sierra de Gádor, Tabernas, Alto Aguas, Sierra de Bédar, El Saltador, Overa, Sierra de Filabres, Alto Almanzora).

ITGE (1989). Cartografía hidrogeológica escala 1:200.000. Hoja 84/85 (Almería/Garrucha).

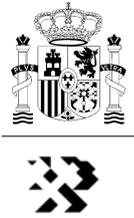
Junta de Andalucía e ITGE (1998). Atlas Hidrogeológico de Andalucía.

SGOP, 1990. Unidades hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares. Síntesis de sus características y mapa a escala 1:1.000.000. Informaciones y Estudios nº 52.

Páginas Web:

<http://aguas.igme.es/uhe/> Unidades Hidrogeológicas de España.

http://www.igme.es/internet/ServiciosMapas/siasweb/prin_sias.htm. SIAS. Sistema de Información del Agua Subterránea. Andalucía.



ANEXOS

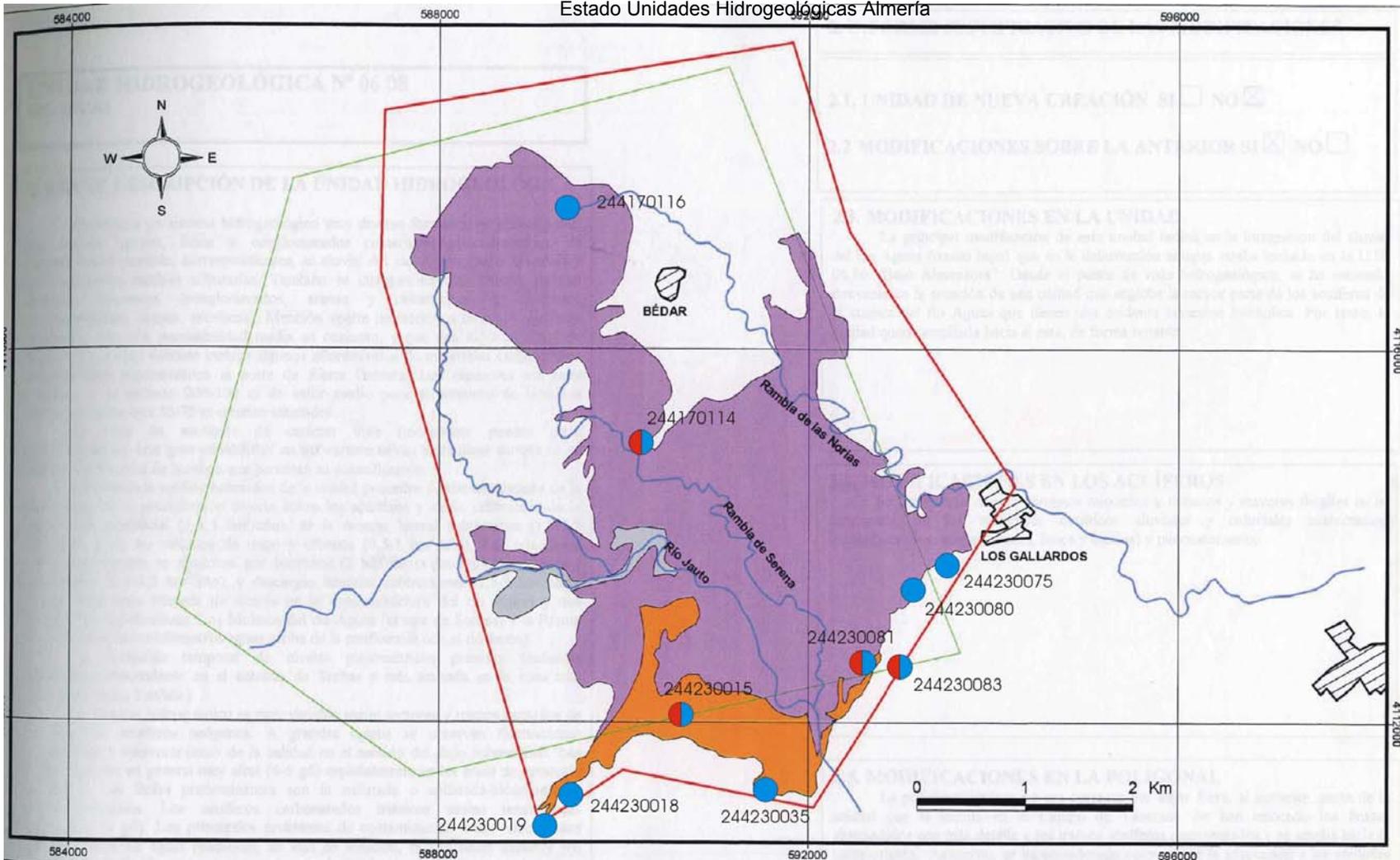
Anexo 1: Mapa de la Unidad Hidrogeológica 06.07. Bédar-Alcornia

Anexo 2: Mapa de la Unidad Hidrogeológica 06.08. Alto Aguas.

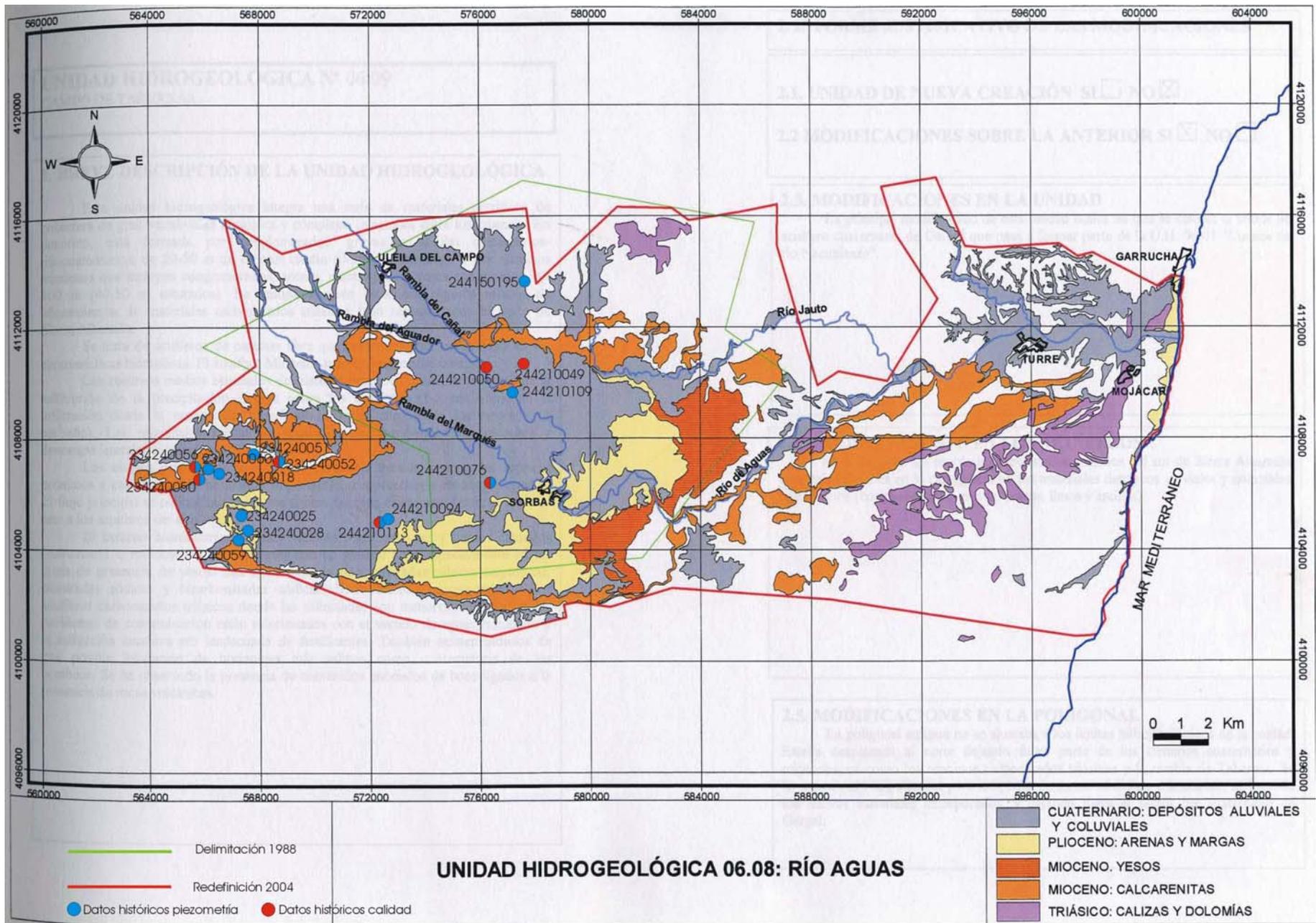
Anexo 3: Mapa de la Unidad Hidrogeológica 06.09. Campo de Tabernas.

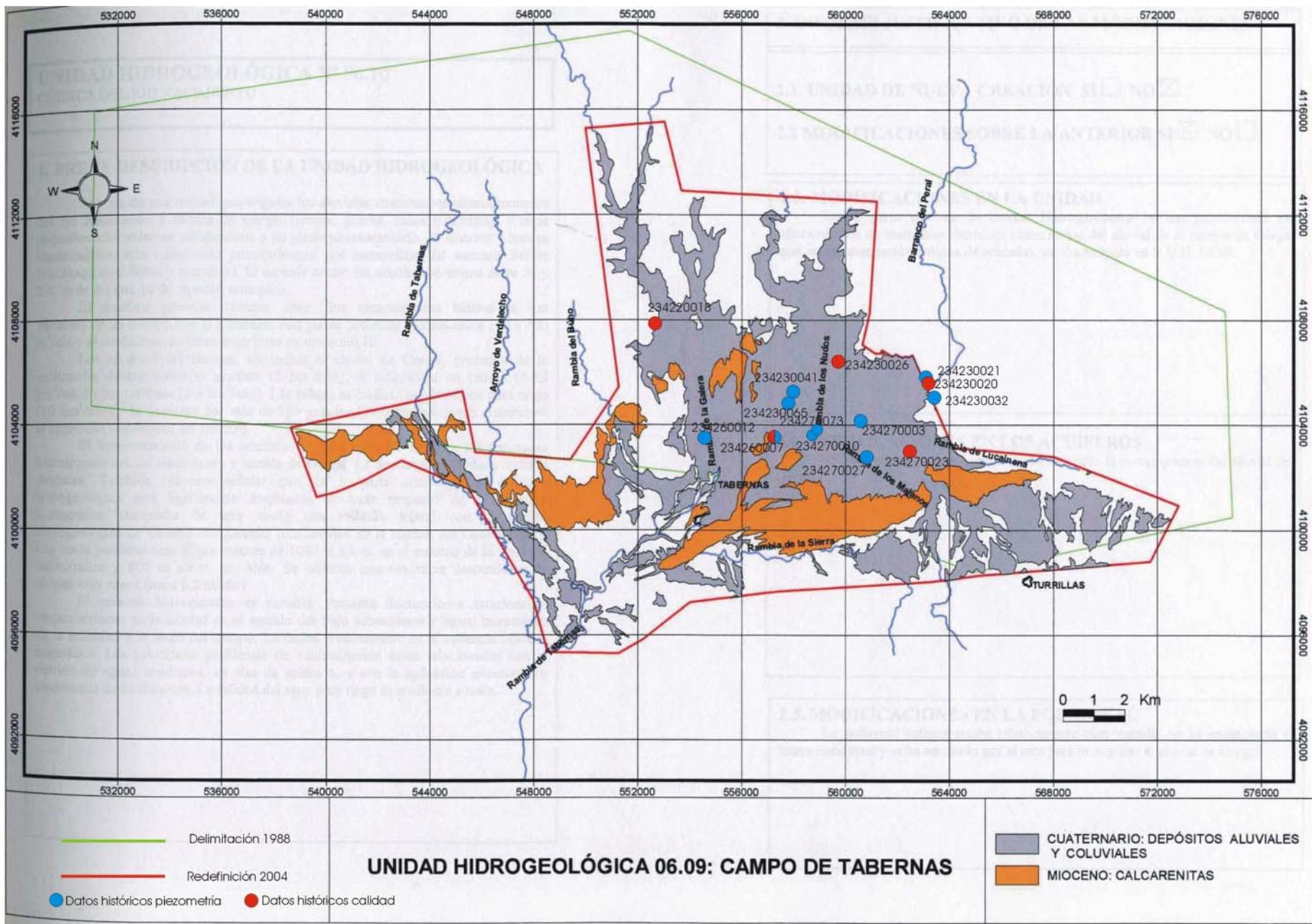
**Anexo 4: Mapa de Unidad Hidrogeológica 06.10. Cuenca del río Nacimiento.
Acuífero de Gérgal.**

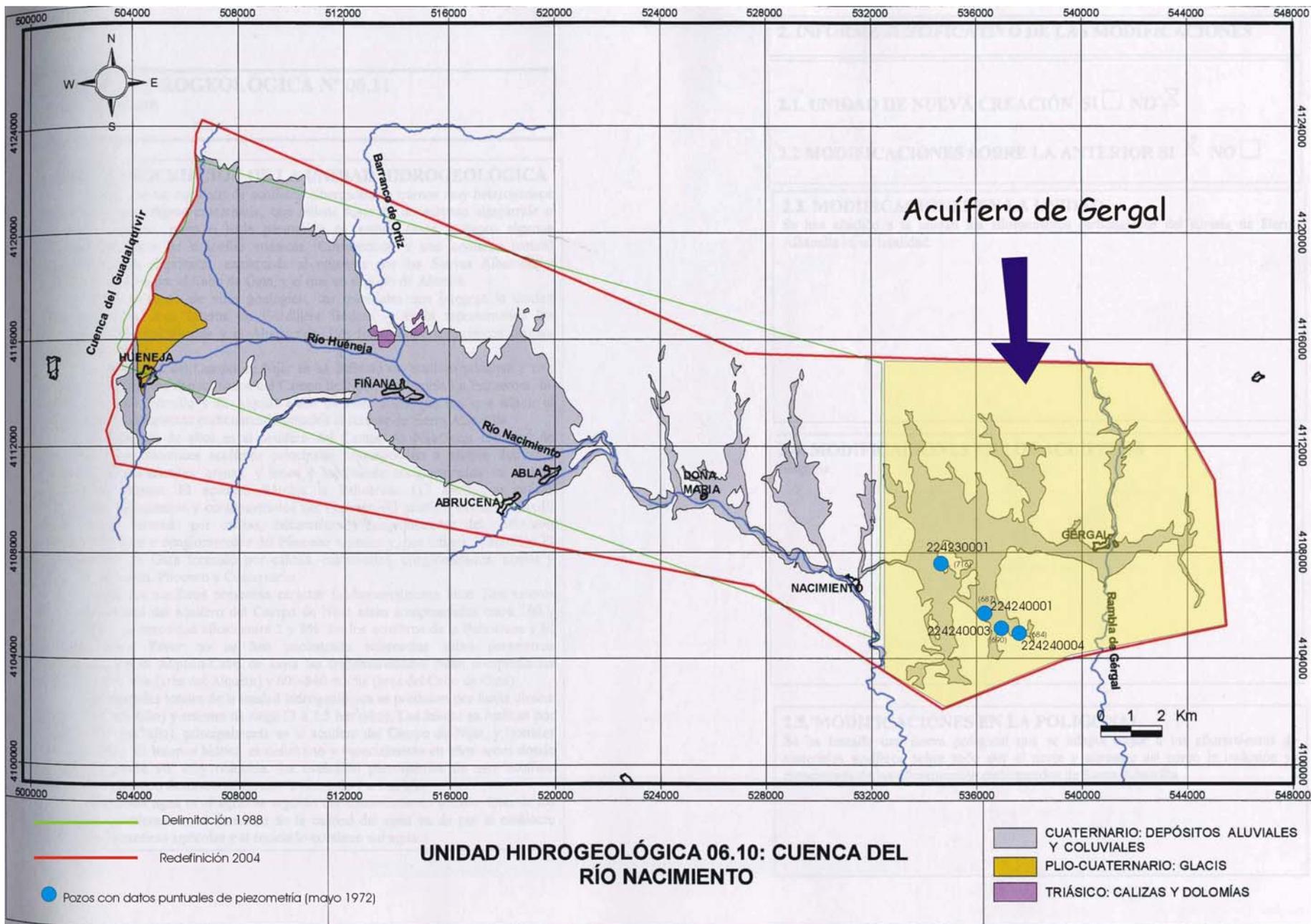
Estado Unidades Hidrogeológicas Almería



<p>— Delimitación 1988</p> <p>— Redefinición 2004</p> <p>● Datos históricos piezometría ● Datos históricos calidad</p>	<p>UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 06.07: BÉDAR-ALCORNIA</p>	<p>□ CUATERNARIO: DEPÓSITOS ALUVIALES Y COLUVIALES</p> <p>■ MIOCENO: CALCARENITAS</p> <p>■ TRIÁSICO: CALIZAS Y DOLOMIAS</p>
--	---	---









Universidad de Granada

**POSIBILIDADES DE EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE DEL
ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ EN EL MARCO DE LAS
ACTUACIONES DE CONSOLIDACIÓN DE LOS
REGADÍOS DEL PLAN GUARO
(PROVINCIA DE MÁLAGA):
FASE INICIAL**

Proyecto:

*Asistencia Técnica a la
Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A.*

Octubre de 2007

El presente Estudio de asesoramiento técnico a la **Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A. (AcuaMed)** ha sido elaborado por el **Instituto Geológico y Minero de España (IGME)** con la colaboración de la **Universidad de Granada (UGR)**. Ha participado el siguiente equipo de trabajo:

Instituto Geológico y Minero de España

Juan Antonio López Geta (*), Dr. Ingeniero de Minas
José Luis García Aróstegui, Dr. en Ciencias Geológicas
José Juárez García, Ingeniero Técnico de Minas

Universidad de Granada (Instituto del Agua)

José Benavente Herrera (*), Dr. en Ciencias Geológicas
Rebecca Bahls, Geóloga
Azzurra Lentini, Geóloga

(*: Responsables del estudio)

CONTENIDO

0. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	1
1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y SELECCIÓN DEL AREA DE TRABAJO	9
3. LABORES REALIZADAS	12
4. INFORMACIÓN HIDROGEOLOGICA PREVIA.....	16
4.1. Antecedentes sobre el acuífero del río Vélez	16
4.2. Evoluciones piezométricas locales	18
4.3. Piezometría: morfología y gradientes	20
4.4. Parámetros hidráulicos	22
5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PERFORACIONES Y DE LOS MATERIALES ATRAVESADOS	24
6. OBSERVACIONES PREVIAS A LOS ENSAYOS	29
7. SECUENCIA DE ENSAYOS HIDRÁULICOS.....	33
8. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE BOMBEO DE 24 HORAS CON CAUDAL CONSTANTE	35
9. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DEL ENSAYO DE BOMBEO Y DE RECUPERACIÓN	36
10. ENSAYO DE INYECCIÓN DE TRAZADOR.....	38
11. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS	41
12. CURVAS CARACTERÍSTICAS Y EFICIENCIA DE LOS SONDEOS	45
13. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DE LAS RECUPERACIONES TRAS LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS.....	48
14. CONSIDERACIONES SOBRE LOS VALORES DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS OBTENIDOS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS (LABORATORIO Y CAMPO).....	49
15. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN ESTACIONARIO EN UN SONDEO-TIPO	50
16. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN TRANSITORIO EN UN SONDEO-TIPO	52
17. OBSERVACIONES HIDRODINÁMICAS POSTERIORES A LOS ENSAYOS .	55
18. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	60

PUNTO.....	62
19. ESTADO ACTUAL DE LA INTRUSIÓN EN EL ACUÍFERO.....	66
20. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL DE EXPLOTACIÓN PLANTEADO .	73
20.1. Balances generales del acuífero y datos experimentales previos	73
20.2. Modelización del ámbito de explotación	76
21. PROPUESTAS DE REDES DE CONTROL	87
21.1. Piezometría.....	87
21.2. Intrusión marina	93
21.3. Red de control de la calidad de las aguas subterráneas	94
21.4. Otras redes de control	97
22. PROPUESTA DE GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS.....	98
23. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

ANEXOS

Anexo 1. Interpretación de ensayos hidráulicos mediante Aqtesolv

Anexo 2. Reportaje fotográfico

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la confianza depositada por **AcuaMed** en el equipo responsable del estudio. Esta circunstancia cabe personalizarla en la excelente predisposición que siempre ha mostrado **D. Fernando Troyano Lobatón**. Se agradece especialmente la colaboración del Director de la oficina en Málaga de dicho organismo, **D. Juan Carlos Díaz Verdoy**, el cual ha sido además el organizador de varias reuniones de seguimiento con objeto de establecer las necesarias conexiones con el trabajo llevado a cabo por el estudio *Pereda 4* (responsable: **D. Carlos Miró**, cuya ayuda y la de sus colaboradores igualmente se agradece). Asimismo se agradece el interés de **D. Fermín López Unzu** (AcuaMed). En todas estas reuniones ha estado presente, por parte de la Delegación en Málaga de la **Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía**, **D. Álvaro López García**, el cual ha suministrado informes técnicos de gran interés para el estudio y ha organizado en Vélez-Málaga unas interesantes jornadas de divulgación sobre nuevas tendencias en la gestión de los recursos hídricos del área. Los autores de este trabajo no pueden dejar de reconocer su decidida actitud de apoyo a los estudios hidrogeológicos en el contexto de esos nuevos esquemas de gestión y le reiteran su agradecimiento.

Al organismo **Cuenca Mediterránea Andaluza** (CMA). En particular, al responsable del Servicio de Hidrología, **D. Alfonso Santos-Olmo**, por permitir y facilitar el acceso a puntos de la red de observación que mantiene dicho organismo, así como por suministrar información hidrogeológica diversa en relación con los controles que ese Servicio lleva a cabo en la mencionada red. Este agradecimiento se extiende también a **D. Alfonso Esteve**, por facilitar la consulta de informes hidrogeológicos previos. Por último, nuestro reconocimiento al Comisario de Aguas de la CMA, **D. Juan Manuel Calvo**, por las facilidades dadas en determinadas fases del trabajo, su apoyo y por las sugerencias respecto a cuestiones a tener en cuenta para la protección de los recursos hídricos subterráneos en el área de estudio.

En ciertas fases del trabajo de campo y determinaciones de laboratorio se ha contado con la amable y eficaz colaboración del **Dr. Iñaki Vadillo**, profesor del Dpto. de Geología y Ecología de la **Universidad de Málaga**, a quien agradecemos su dedicación.

Los profesores de la **Escuela Politécnica de Linares** (Universidad de Jaén), **Dres. María del Carmen Hidalgo, Javier Rey y Julián Martínez** han aportado colaboración material y personal para la realización de perfiles de prospección geofísica en el área y su posterior interpretación. Nuestro reconocimiento por ello.

Durante la realización de los ensayos de bombeo se trabajó en estrecha vinculación con los técnicos de la Empresa **CEMOSA**, responsable de la ejecución de las perforaciones. En particular queremos destacar la amable colaboración prestada por **D. Juan Manuel Rodríguez**.

Los propietarios o encargados de fincas o de comunidades de regantes en cuyas captaciones se han efectuado medidas y muestreos diversos han estado siempre dispuestos a facilitar estas labores, por lo que se les agradece su colaboración. En esta fase de los trabajos es de destacar la ayuda recibida por parte de **D. Juan Gámez Bermúdez** (Comunidad de Regantes del Río Vélez), y a los propietarios y encargado (**D. Francisco Badía**) de la Finca Los Álamos, donde se encuentra ubicado el sensor automático.

0. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sector del acuífero del río Vélez (provincia de Málaga), objeto de los trabajos en los que se centra este estudio, corresponde al tramo de aproximadamente 1 km de longitud situado aguas abajo de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, a una altitud aproximada entre 23 m y 28 m s.n.m.

Este sector incluye cuatro perforaciones realizadas por la Sociedad Estatal AcuaMed. El estudio analiza la información obtenida en la fase de realización de los cuatro sondeos (agosto a octubre de 2006) y, sobre todo, una serie de ensayos hidráulicos realizados a continuación. Esta labor se ha complementado con controles hidrogeológicos diversos (medidas piezométricas, muestreos físico-químicos, registros de conductividad y temperatura en perforaciones, aforos diferenciales en el río Vélez) y prospección geofísica de superficie (tomografía eléctrica) en buena parte de la extensión del acuífero, durante el periodo comprendido entre octubre de 2006 y octubre de 2007. Asimismo se aportan datos sustanciales para el conocimiento del acuífero de cara a plantear su explotación sostenible, si bien se indica la necesidad de otras tareas de detalle que son valoradas de forma aproximada.

Los registros históricos de la profundidad del nivel freático desde el año 1983, muestran que en el sector estudiado, éste oscila entre 3 m y 25 m, aproximadamente. Sin embargo, en los últimos diez años lo usual es que la profundidad esté entre 4 m y 11 m, apreciándose menores descensos en el periodo estival respecto a años precedentes.

En el periodo de cinco meses comprendido entre mediados de octubre de 2006 y mediados de marzo de 2007 se ha registrado un ascenso del nivel piezométrico en el sector estudiado que varía entre 2 y 4 m según los puntos. Desde esa última fecha hasta octubre de 2007 la profundidad se ha incrementado en unos 5 m, alcanzándose valores próximos a los 10 m, lo que está dentro de la tendencia observada en los últimos diez años.

Los mapas de isopiezas incluidos en estudios previos indican que en situaciones de sequía, además de una desaturación media de 13 m en el tramo considerado, parece manifestarse una circulación hacia el aluvial del río Vélez procedente de su margen izquierda. En la situación de niveles altos, el flujo es sensiblemente paralelo al eje fluvial, procedente de sectores del acuífero situados aguas arriba.

Los espesores de aluvial atravesados en cada perforación han sido 46,5 m (S-4), 41 m (S-3), 34 m (S-2) y 10,2 m (S-1). Según esto, los datos previos (CHSE, 1987) que apuntaban a valores cercanos a los 70 m, se han revelado como inexactos. Los valores de espesor saturado son del orden de 5 m (S-1), 30 m (S-2 y S-3) y 40 m (S-4). De acuerdo con ello, el punto S-1 se considera como negativo a efectos de su posible uso como captación.

La testificación litológica detallada de las muestras obtenidas en cada perforación indica que, aunque la heterogeneidad en el detalle es muy elevada, en el conjunto puede asimilarse simplícidamente a un sistema homogéneo, sin capas bien definidas, que conforma un acuífero de carácter libre.

En los sondeos 3 y 4 se han obtenido “muestras integradas”, cuyo tamaño corresponde a una grava fina en ambos casos. La permeametría ofrece valores de 17 m/d y 24 m/d, respectivamente, coherentes con materiales de tamaño entre arenas medias y gravas finas. Mediante la aplicación de la fórmula de Hazen se obtienen valores de permeabilidad de 3 m/d para el S-3 y de 54 m/d para el S-4.

Los ensayos hidráulicos se llevaron a cabo entre los días 18 y 25 de octubre de 2006. La conductividad del agua bombeada a lo largo de las pruebas no experimentó cambios apreciables respecto del valor de 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Del ensayo de trazador resulta un valor de velocidad horizontal de flujo entre 1 y 5 m/d.

Las curvas características obtenidas en los ensayos de bombeo escalonados indican que la relación entre caudal bombeado y descenso producido en el propio pozo se aleja de la linealidad sobre todo a partir de 40 L/s. También se advierte el mejor rendimiento (caudal específico) que presenta el S-4 respecto del S-3 para los

caudales más elevados ensayados. Para un caudal de 40 L/s, la eficiencia que resulta para el sondeo S-3 es del 23 % y la del S-4 es del 47 %.

En los ensayos de bombeo y de recuperación analizados se obtienen generalmente valores de Transmisividad entre aproximadamente 1700 m²/d y 5000 m²/d. La permeabilidad que resulta está entre 50 m/d y 170 m/d, con un valor promedio general aproximado de 100 m/d. Este valor es algo más del doble del estimado a partir del ensayo de trazador y unas cinco veces superior al promedio de las permeametrías. Dentro de que se trata de cifras del mismo orden de magnitud, las diferencias ponen de manifiesto el efecto de escala que resulta de considerar un volumen de terreno muy superior.

Se ha considerado un sondeo-tipo para la zona donde se han realizado las perforaciones, de acuerdo con las características siguientes:

- Permeabilidad: $K = 100 \text{ m/d}$
- Coeficiente de almacenamiento: $S = 0,2$
- Espesor saturado: $h_0 = 25 \text{ m}$
- Caudal constante de bombeo: $Q = 40 \text{ L/s}$
- Eficiencia del sondeo: $E_p = 30 \%$
- Diámetro del sondeo: $d = 500 \text{ mm}$

Se ha estimado, a partir de tales características, la evolución del descenso del nivel de agua al cabo de un mes de bombeo, tanto en el propio pozo de extracción (pasaría de 4 m a 6 m) como a una distancia de 25 m del mismo (pasaría de 0,2 a 0,8 m).

Si se hace la hipótesis de que en el transcurso del bombeo se alcanza el régimen estacionario con radio de influencia $R = 500 \text{ m}$, el descenso que se obtiene en el propio pozo de extracción es de casi 6 m, mientras que a 25 m del mismo pasa a ser de unos 70 cm.

Antes de acometer la perforación de nuevas captaciones, se considera muy aconsejable la realización de estimaciones de profundidad del sustrato. Tales estimaciones pueden basarse (deseablemente) en datos directos, como son los

ofrecidos por los sondeos de reconocimiento, aunque como alternativa más económica, pero menos resolutive, se puede tratar de utilizar técnicas geofísicas.

En relación con la idea anterior, AcuaMed encargo a la empresa CEMOSA la realización de un perfil sísmico longitudinal, prácticamente coincidente con el eje del cauce, paralelo a la línea que une los sondeos S-1 y S-4. De dicho perfil, y de los datos obtenidos en los sondeos, se desprende que: a) la profundidad del sustrato hacia aguas arriba no se incrementa; b) hay un mayor espesor local de aluviones entre los sondeos S-3 y S-4; c) el sustrato parece aumentar su profundidad hacia la margen izquierda del cauce. En función de ello, parece recomendable seleccionar un punto entre los sondeos S-3 y S-4 para ubicar una nueva captación.

Un perfil de tomografía eléctrica realizado en dirección paralela a la línea de sondeos, pero desplazado unos 50 m hacia la margen izquierda del cauce, confirma la existencia de variaciones espaciales significativas en el espesor del acuífero en el sector estudiado.

Si se piensa en realizar perforaciones adicionales en el entorno estudiado, se recomienda desplazarse hacia enclaves situados más al Este del perfil longitudinal de sondeos. En tal caso, se considera de interés contrastar la geometría del sustrato mediante sondeos de reconocimiento, dada la dificultad de realizar perfiles geofísicos eléctricos de longitud suficiente en dirección transversal al cauce.

Como alternativa a tener en cuenta frente a la construcción de nuevos sondeos, se considera de interés la utilización de captaciones existentes al Este del enclave estudiado, como las del sector del Molino de las Monjas, tras una fase previa de contraste de los caudales extraíbles en las mismas y de su rendimiento.

Un muestreo de las características físico-químicas del acuífero, entre el sector de confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa y el borde costero, realizado a mediados de marzo de 2007, ha puesto de manifiesto valores de conductividad eléctrica en las aguas bombeadas comprendidos aproximadamente entre 700 y 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores inferiores se han medido en el sector situado más aguas

arriba, próximo a las perforaciones de AcuaMed. El flujo en el acuífero implica un incremento natural de conductividad y así se alcanzan valores en el sector deltáico del orden de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los caudales que el río presentaba en las fechas del muestreo (entre 150 y 50 L/s, aproximadamente, llegando a descargar al mar) proceden del drenaje del acuífero a partir de las inmediaciones de Vélez-Málaga (aguas arriba el cauce estaba seco) y su conductividad es de alrededor de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de conductividad en el acuífero se han registrado en la vega cerca de Vélez-Málaga y obedecen seguramente a efectos locales de reciclaje de regadíos.

El drenaje del acuífero hacia el cauce del río se midió con detalle a finales de junio de 2007, obteniéndose valores de caudal entre 10 y 30 L/s, pero entonces el flujo en el tramo más próximo a la desembocadura se hacía inapreciable.

Se han efectuado también registros verticales de conductividad en piezómetros situados en el sector deltáico en ambas márgenes del cauce, los cuales, en otras ocasiones, habían indicado presencia de aguas salinas, como el punto IGME-2, de 42 m de profundidad, situado a unos 700 m del mar. El rango de conductividad registrado ha sido de 900 a 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cuando existen registros previos en este punto entre 4000 y 40000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Un perfil de tomografía eléctrica realizado en dirección paralela al cauce del río Vélez, por su margen izquierda, en las inmediaciones de la desembocadura, detecta una lengua de agua salina en el acuífero con espesor de unos 20 m y escasa penetración tierra adentro. En las condiciones actuales, pues, no parecen existir indicios de intrusión marina significativa.

Con los datos de recarga del acuífero en condiciones de año medio (33 $\text{hm}^3/\text{año}$, según JA-ITGE, 1988, un 85% de la cual procede de la infiltración de aguas superficiales) y de salidas por bombeo que se estiman para la situación actual (16 $\text{hm}^3/\text{año}$, pendiente de verificación), la explotación planteada de 6,5 $\text{hm}^3/\text{año}$ no modifica el carácter excedentario del acuífero en condiciones de año medio. Además, el escenario previsto para la mencionada explotación (riegos en la margen derecha) conlleva el que las captaciones reducirán sensiblemente, cuando

no de manera total, su régimen de extracciones. Ello conduciría a un balance hídrico netamente excedentario, en el que las salidas subterráneas hacia el cauce del río en su tramo final y las producidas directamente hacia el mar serían superiores a las actuales (estimadas, de forma tentativa, en 3-6 hm³/año y en 11-14 hm³/año, respectivamente).

En cuanto a datos experimentales previos que permitan valorar la respuesta del acuífero frente a bombeos de cierta intensidad, se puede destacar que de junio a septiembre de 1995, al final de un periodo de sequía en el que no existía suministro de recursos desde La Viñuela, se extrajeron del orden de 16 hm³ y en el sector objeto de estudio (piezómetro P6-2, muy próximo a las perforaciones de AcuaMed) el descenso producido fue de 8,2 m.

Se ha realizado un modelo de flujo subterráneo en régimen permanente de la parte de acuífero en que se ha centrado el estudio, correspondiente a una superficie de aluvial de 5 km². La recarga media estimada es de 10,5 hm³/año. Se ha simulado el efecto de bombear 6,5 hm³/año. En primer lugar, a partir de cinco captaciones situadas en el sector de las perforaciones de AcuaMed, y luego a partir de ocho captaciones distribuidas entre dicho sector y el final del aluvial del río Vélez, inmediatamente antes de su confluencia con el Benamargosa. En el primer caso se estiman descensos máximos de 7-8 m centrados en el enclave de los bombeos. El incremento en el número de captaciones y su distribución en diferentes enclaves de bombeo, circunstancia que se reproducía en la segunda simulación, trae como lógica consecuencia la disminución de los descensos máximos bajo los enclaves de extracción, aunque son más extensos los sectores del acuífero afectados por las depresiones piezométricas.

Ante un escenario de explotación controlada de los recursos subterráneos, se considera básico acometer un estudio hidrogeológico detallado del acuífero, deseablemente apoyado por un modelo de flujo y transporte de solutos en régimen transitorio. Esta herramienta permitiría, entre otros aspectos, cuantificar salidas subterráneas al río y al mar, evaluar descensos piezométricos y determinar variaciones espacio-temporales de la interfase agua dulce-agua marina producidos

por los bombeos en distintas condiciones hidrometeorológicas, particularmente las adversas (periodos de sequía).

En cualquier caso, resulta obligado mantener controles sobre el buen estado cuantitativo y cualitativo de la masa de agua subterránea del río Vélez, particularmente frente a un esquema de explotación controlada de sus recursos. Aunque esto ya se viene realizando por el Organismo de Cuenca, en el presente estudio se revisa el estado de las redes de control (de piezometría, de calidad de las aguas subterráneas y de intrusión marina) y se proponen actuaciones para restituir puntos desaparecidos o mejorar el estado de los existentes que hayan experimentado algún deterioro que pueda afectar a su representatividad. El diseño de redes propuesto para el acuífero se complementa con recomendaciones de afloros en cursos superficiales naturales y artificiales para completar la evaluación del funcionamiento del acuífero (recarga y descarga) así como para establecer cuantitativamente las relaciones río-acuífero.

Por último, se considera necesario para la correcta gestión de la masa de agua subterránea disponer de estimaciones fiables sobre los volúmenes bombeados actualmente del acuífero en las diferentes captaciones, conocer la naturaleza y el estado administrativo de éstas así como la distribución temporal de los caudales extraídos y el uso a que se destinan estos recursos.

1. INTRODUCCIÓN

La Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A. (AcuaMed), tras un acuerdo alcanzado a finales de 2005 con la Delegación de la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía y representantes de las Comunidades de Regantes del Plan Guaro-Axarquía (Málaga), ha instado la realización de un Proyecto Informativo de las actuaciones necesarias para la reutilización de aguas residuales en la Costa del Sol oriental y consolidación de los regadíos del citado plan. De este Proyecto se ha ocupado el Gabinete Técnico Estudio Pereda 4.

Entre las actuaciones que se contemplan en el mencionado proyecto se incluye el bombeo en el acuífero del río Vélez, además del uso de recursos regulados en el embalse de La Viñuela y de aguas residuales tratadas de la EDAR de Vélez-Málaga.

Dado que existe un convenio general establecido entre el IGME y AcuaMed en materias relacionadas con la evaluación y gestión de recursos hídricos subterráneos, y con objeto de asesorar a AcuaMed en materia hidrogeológica en este caso concreto, se ha constituido un equipo con personal del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Universidad de Granada (UGR), debido a la experiencia acreditada de personal de ambos organismos en investigaciones previas en el área. Se genera así el Proyecto denominado “Apoyo al asesoramiento a AcuaMed sobre las posibilidades de bombeo en el acuífero del río Vélez (provincia de Málaga)”. Se trata de una Asistencia Técnica al IGME por parte de la UGR- concretamente de personal adscrito al Instituto del Agua de dicha universidad- mediante contrato suscrito entre el IGME y la Fundación Empresa-Universidad de Granada.

El presente informe constituye la materialización de la mencionada Asistencia Técnica y se centra en el estudio detallado de una serie de ensayos hidrogeológicos llevados a cabo en octubre de 2006 y en los resultados de campañas de campo posteriores, realizadas a finales de marzo, principios de mayo, finales de junio y a lo largo de julio de 2007.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y SELECCIÓN DEL AREA DE TRABAJO

El objetivo principal es obtener el máximo de información hidrogeológica sobre el acuífero del río Vélez en el sector seleccionado, correspondiente al tramo de aluvial de aproximadamente 1 km de longitud situado aguas abajo de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, los principales de la cuenca. También se desea obtener criterios preliminares acerca de la factibilidad del bombeo de 6,5 hm³/año en el acuífero, que es la cifra que se ha planteado en el Proyecto Informativo mencionado en el apartado anterior.

Complementariamente, en el presente estudio se hace una valoración sobre el estado actual de la salinidad de las aguas subterráneas en el sector deltáico del acuífero, dado que en esta zona se han producido en ocasiones previas evidencias de salinización de captaciones por intrusión marina. Por último, se incluye una propuesta de redes de control del acuífero, de piezometría y de calidad de las aguas subterráneas, para verificar el mantenimiento de su buen estado cuantitativo y cualitativo frente a eventuales actuaciones que modifiquen su estado hidrodinámico actual.

El acceso más inmediato al área de trabajo es a partir del puente de la carretera de Vélez-Málaga a Benamocarra, situado inmediatamente aguas debajo de dicha confluencia (figura 1.1).

Este sector incluye cuatro perforaciones realizadas por la empresa CEMOSA a instancias de AcuaMed. El estudio se centra, precisamente, en la información obtenida en la fase de realización de los cuatro sondeos (agosto a octubre de 2006) y, sobre todo, en una serie de pruebas de bombeo y recuperación realizadas a continuación, complementado con otros trabajos realizados entre octubre de 2006 y octubre de 2007.

Desde un principio, fue voluntad de la Dirección Técnica de AcuaMed no realizar sondeos con diámetro de investigación, sino plantear directamente un diseño de los mismos (filtros comerciales con diámetros de 400 mm alternantes con tramos ciegos, centradores, empaques de grava, etc.) adaptado a su eventual puesta en

explotación si las circunstancias así lo aconsejasen. Esta es la razón de que en la mayor parte de las perforaciones se seleccionase el diámetro de 550 mm.



Figura 2.1. Vista aérea del sector estudiado, al sur de de la carretera de Vélez-Málaga (hacia la derecha de la foto) a Benamocarra (hacia el extremo superior izquierdo de la foto). Destaca, entre la carretera y el cauce del río Vélez, la plantación de aguacates de la finca de Los Alamos, surcada por caminos que se cruzan perpendicularmente.

Además de lo anterior también se optó, debido a imperativos de tiempo que obligaban a reducir al máximo los trámites administrativos, por seleccionar un emplazamiento para los sondeos dentro de la zona de Dominio Público Hidráulico (DPH) y aguas arriba de la EDAR de Vélez Málaga. Se buscó dentro de la zona de DPH un sector con acceso a maquinaria lo más fácil posible y cierta elevación respecto del cauce, en el que, además, existiera cerca algún piezómetro en buenas condiciones de la red de la Cuenca Mediterránea Andaluza. Se consideró asimismo la información previa sobre los espesores atravesados cuando tales piezómetros

fueron perforados, en el sentido de seleccionar aquellos enclaves en que se habían localizado los valores más elevados.

Las anteriores condiciones condujeron a seleccionar para los sondeos 1, 2 y 3 un sector a lo largo de la margen izquierda del río, en el paraje de la Acequia del Jueves, junto al denominado “perfil 6” (P6) del estudio de CHSE (1987), donde los datos previos indicaban espesores de aluvial de hasta 70 m. El sondeo 4 se hizo en la misma margen pero algo más distante hacia aguas abajo (figura 2.2).



Figura 2.2. Detalle de la foto de la figura 2.1 que incluye la situación de las perforaciones (S1 a S4) y otros puntos cercanos. La flecha señala la dirección del río.

El sector seleccionado se encuentra a una altitud aproximada entre 23 m (sondeo 4) y 28 m (sondeo 1). En su extremo inferior se produce la confluencia, por la margen izquierda del río Vélez, del Arroyo del Mineral, cauce de régimen esporádico cuya cuenca vertiente ocupa una extensión de unos 10 km², actualmente ocupada en parte por terrenos urbanos de Vélez-Málaga.

3. LABORES REALIZADAS

Además de la explicación sobre el terreno a la Dirección Técnica de AcuaMed y otros técnicos implicados en el mencionado Plan Guaro acerca de las características generales del acuífero, incluyendo la selección del emplazamiento de los sondeos, se ha llevado a cabo la recopilación de datos previos orientada a los objetivos del presente estudio, así como la participación en varias reuniones de seguimiento.

Aparte de lo anterior, se han efectuado reconocimientos de campo tendentes a la medida de los niveles de agua en una serie de puntos situados alrededor de los sondeos de manera previa y con posterioridad a las pruebas de bombeo, así como la instalación de un equipo registrador (“data-logger”) de profundidad del nivel y de temperatura del agua en uno de ellos, concretamente el piezómetro P6-S2 de la CMA, protegido por una caseta, y posterior extracción de los datos registrados. En la figura 3.1 se indica la situación de estos puntos de control.

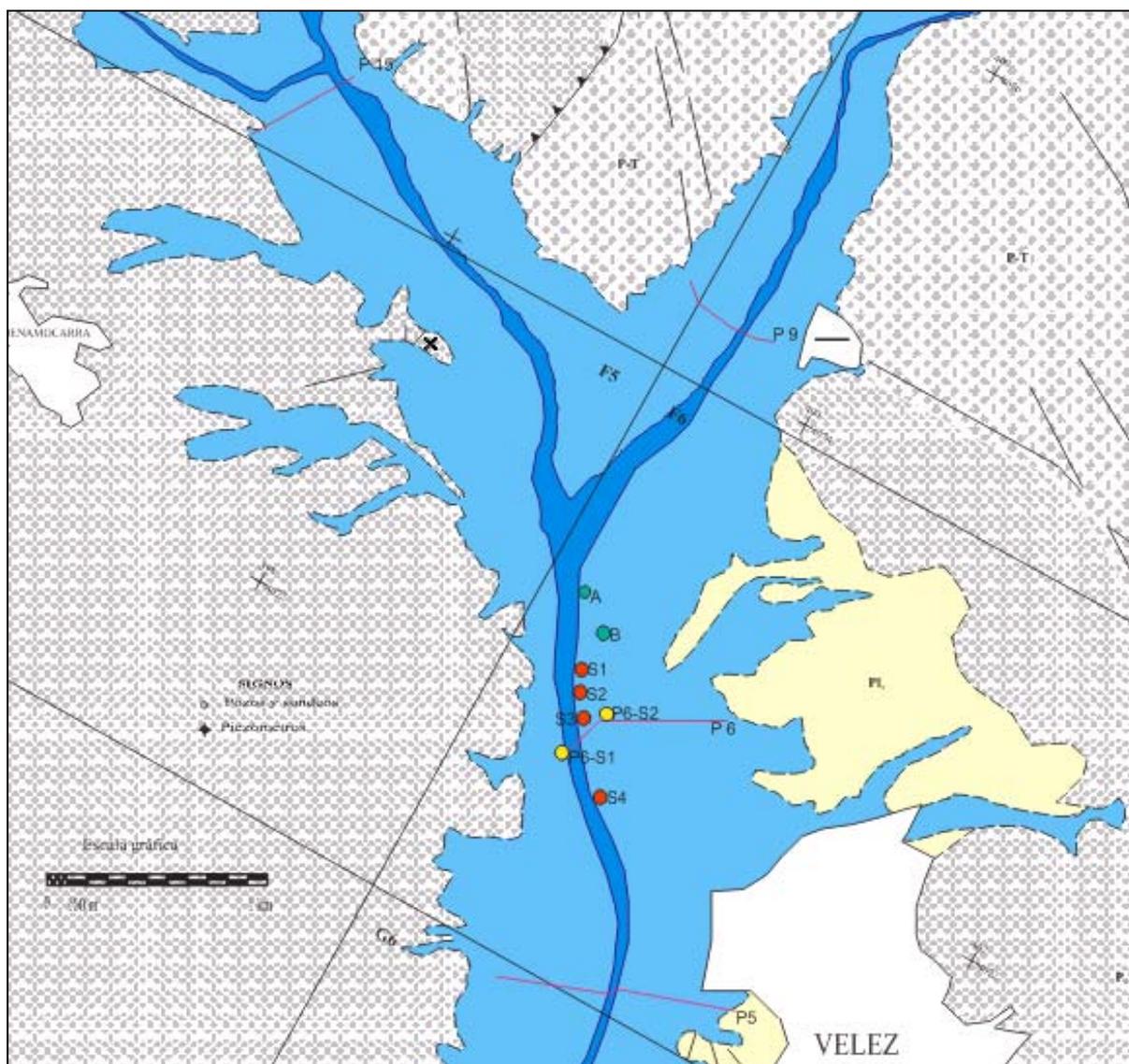


Figura 3.1. Mapa hidrogeológico, situación de puntos y localización aproximada de los perfiles de piezómetros de la CMA (CHSE, 1987). En azul: materiales aluviales (permeabilidad alta). En amarillo: materiales arenoso-arcillosos pliocenos (permeabilidad media-baja). En gris: materiales esquistosos (permeabilidad baja). En blanco: zonas urbanas.

También se ha colaborado con los técnicos de CEMOSA en la medida de niveles piezométricos durante los bombeos y recuperaciones, realizándose en coordinación con tales pruebas un ensayo de inyección de salmuera en el punto S-2 y control de su dispersión en la columna del propio sondeo mientras se bombeaba en el S-3.

Se ha medido en varias ocasiones la conductividad y temperatura del agua bombeada.

Se han interpretado los datos de las pruebas de bombeo y recuperación por procedimientos gráficos manuales y, en una segunda fase, mediante la utilización del código AQTESOLV (www.aqtesolv.com) en diferentes versiones, con objeto de estimar los parámetros hidráulicos del acuífero y de contrastar modelos geométricos (carácter del sustrato, límites, etc.) y de naturaleza del mismo (condiciones de confinamiento o freáticas, con o sin efecto de drenaje diferido). Se han cotejado los resultados de estas pruebas con las permeametrías realizadas por CEMOSA en muestras integradas de los sondeos 3 y 4.

Se han obtenido valores de conductividad hidráulica a partir de la granulometría efectuada por CEMOSA de muestras integradas en los sondeos 3 y 4.

Se ha analizado el funcionamiento del acuífero, tanto a partir de antecedentes como de observaciones en las circunstancias actuales. En particular, se ha modelizado el balance y el flujo en el sector del acuífero que incluye las perforaciones realizadas y su entorno, lo que representa casi el 30 % de su extensión total. Para ello se ha utilizado el código PMWIN ("Processing Modflow", versión 5.3.0 desarrollada por Chiang and Kinzelbach en 1991-2001).

A finales de marzo de 2007 se han efectuado medidas "in situ" de profundidad del nivel, concentración de O₂ disuelto, conductividad y temperatura del agua bombeada en una serie de captaciones. También se ha procedido a la toma de una serie de muestras de agua para la caracterización de su calidad química y su posterior análisis en los laboratorios del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. En algunos piezómetros del sector deltaico del acuífero se han efectuado perfiles de conductividad y temperatura, con el objetivo principal de ilustrar sobre eventuales variaciones en la vertical de la salinidad del agua subterránea. Este tipo de datos y otras medidas "in situ" (aforos seriados en el río, por ejemplo) se han obtenido en otras campañas de campo realizadas entre principios de mayo y primeros de octubre de 2007.

Se han efectuado mapas y gráficos variados para facilitar la interpretación de los resultados y su visualización. Finalmente, se ha confeccionado el presente avance del informe.

Las tareas anteriores quedaron definidas en el correspondiente acuerdo de asesoramiento específico entre AcuaMed y el IGME de la siguiente manera:

- Supervisión técnica de la ejecución de sondeos y ensayos de bombeo (escalonados y a caudal constante), e interpretación hidrogeológica de resultados
- Estudio y análisis de antecedentes
- Campaña de medidas del nivel piezométrico y adquisición e instalación de data logger para el control piezométrico del acuífero
- Campaña de registros de conductividad y temperatura en piezómetros y captaciones del delta
- Campaña de toma de muestras y analítica de parámetros de calidad fisicoquímica de las aguas superficiales y subterráneas
- Campañas de medidas del flujos subterráneos y ensayos de trazadores
- Campañas de prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para la mejora del conocimiento de la geometría del sustrato en el sector de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa
- Divulgación de las características hidrogeológicas del acuífero de Vélez y participación en jornadas de concienciación sobre el uso sostenible de los recursos hídricos
- Desarrollo de un modelo de flujo sencillo en el entorno de las captaciones.
- Redacción de Memoria final, Anexos y planos.

4. INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA PREVIA

4.1. Antecedentes sobre el acuífero del río Vélez

Las primeras investigaciones hidrogeológicas sistemáticas del acuífero de Vélez fueron realizadas por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), a mediados de los años setenta, en el marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS). De forma paralela, el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) llevó a cabo numerosos sondeos de investigación en el delta del río Vélez que pusieron de manifiesto, entre otros aspectos, la existencia de dos tramos acuíferos.

En los estiajes de los primeros años de la década de los ochenta se produjeron descensos importantes de los niveles de agua en la zona del delta, y se incrementó la salinidad en las captaciones para el abastecimiento a Torre del Mar y a la costa occidental de Vélez Málaga. Estos efectos de la intrusión marina y el análisis de la afección a los recursos hídricos que pudiera provocar la construcción del embalse de la Viñuela promovieron la realización del “Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa” (CHSE, 1987), que llevó a cabo la Confederación Hidrográfica del Sur de España entre los años 1984 y 1986.

Durante el año 1987, el Instituto Geológico y Minero llevó a cabo el “Estudio de las posibilidades de lucha contra la intrusión marina mediante la utilización de barreras artificiales en el acuífero de Vélez” (ITGE, 1988), donde se analizó la posibilidad de ejecución de una pantalla semi-impermeable, perpendicular al cauce y situada unos 1.100 m de la desembocadura. En este proyecto se efectuó, además, un ensayo puntual de inyección de lechada de cemento-bentonita y se obtuvo una reducción de la permeabilidad media de tan sólo el 37% respecto a valor inicial.

Entre los años 1990 y 1992, la colaboración científica mantenida entre el Instituto del Agua de la Universidad de Granada, el Departamento de Geología de la Universidad de Málaga y el Instituto de Geología, Geofísica y Geoinformática de la Universidad Libre de Berlín, permitió que se realizaran nuevos trabajos de investigación sobre el acuífero del río Vélez (Winchenbach, 1993).

Entre los años 1995 y 1997 se llevó a cabo el proyecto de "Seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad" (CHSE, 1997).

Entre 1993 y 1997, la Universidad de Granada, desarrolló los trabajos de investigación que dieron lugar a la tesis doctoral "Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)" (García-Aróstegui, 1998). Algunos resultados han sido objeto de publicación en revistas especializadas (García-Aróstegui et al., 1998 y 2000).

Entre los años 2003 y 2005 se han llevado a cabo diferentes trabajos y recopilaciones de datos previos en el marco del Proyecto Europeo "Sustainable Water Management in Mediterranean Coastal Aquifers, SWIMED", coordinado por uno de los autores de este trabajo (J. B. H.), en el que este acuífero costero ha sido seleccionado junto a otros de Italia, Marruecos, Túnez y Palestina debido a sus características favorables, particularmente el nivel de información hidrogeológica sobre el mismo que se ha ido generando en los últimos treinta años mediante los estudios que se han descrito.

A finales de 2005 se han reactivado las actuaciones para la consolidación de los regadíos del Plan Guaro, mediante el acuerdo entre la Sociedad Estatal AcuaMed, la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía y representantes de los usuarios.

Frente a estos importantes estudios se pueden citar los trabajos de recopilación que, a manera de fichas sintéticas para los principales acuíferos, entre los que se incluye el del río Vélez, se exponen en los documentos denominados "Atlas Hidrogeológicos" de Málaga y de Andalucía (DPM-IGME, 1988 y JA-ITGE, 1998, respectivamente). Recientemente, se ha realizado la segunda versión del Atlas Hidrogeológico de Málaga.

En todos estos estudios se presentan diferentes datos y resultados que permiten establecer algunas de las características hidrogeológicas del acuífero, tanto en general como en el sector objeto del presente trabajo.

4.2. Evoluciones piezométricas locales

En la figura 4.1 se representan datos de la evolución temporal de la profundidad del agua en el piezómetro P6-2 desde 1984 hasta 2006. Se advierte un descenso importante en los veranos de 1989 y 1995, de unos 20 m y 25 m, respectivamente. Corresponde al final de periodos secos que fueron interrumpidos por precipitaciones muy abundantes, por lo que se aprecia en los dos casos una recuperación hasta valores mínimos de profundidad: entre 3 y 4 m. También ha habido descensos apreciables en los veranos de 1985, 1992 y 1993.

Según lo anterior, el rango máximo de variación de nivel de agua medido en el sector objeto de estudio es de unos 22 m (entre 3m y 25 m, aproximadamente).

También se advierte en la figura 4.1 que desde el año 1996 hasta el 2006 las oscilaciones son de menor amplitud que en situaciones previas, sin que sean patentes los importantes descensos veraniegos a que antes se ha hecho alusión. Esto podría indicar que la magnitud de los bombeos estivales se ha reducido.

En estos últimos diez años la amplitud usual de las oscilaciones piezométricas en el sector de estudio es, pues, de unos 7 m (entre 4 m y 11 m, aproximadamente).

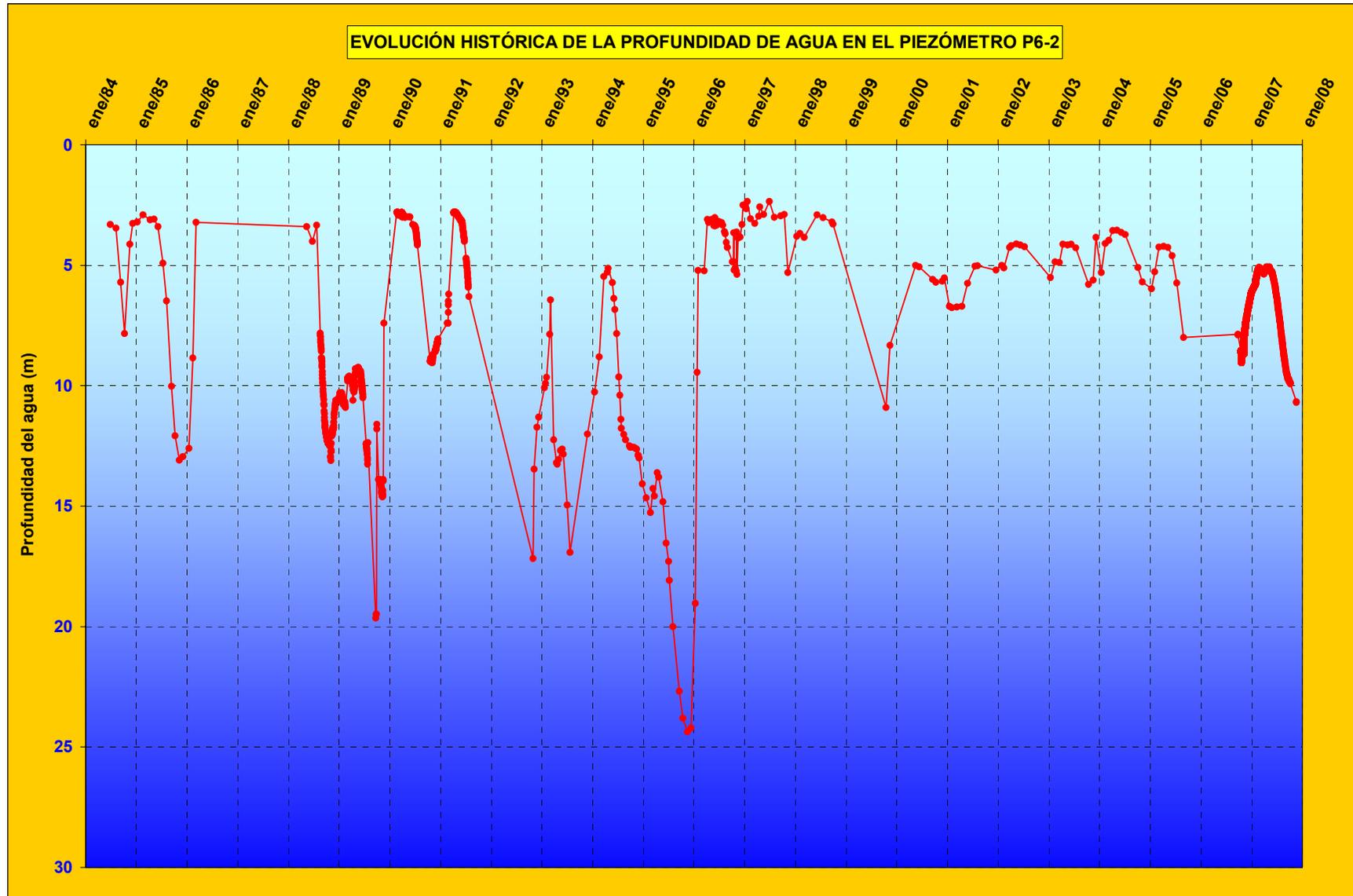


Figura 4.1. Evolución de la profundidad del nivel de agua en el piezómetro P6-2.

4.3. Piezometría: morfología y gradientes

En la figura 4.2 se presentan dos mapas de líneas isopiezas del acuífero correspondientes a dos situaciones con características hidrológicas antagónicas: julio de 1995 y enero de 1997. La primera traduce el estado hidrodinámico del acuífero en un mes de verano en un periodo de importante sequía. La segunda corresponde a un mes de invierno en un periodo de pluviosidad anormalmente alta. Se incluyen asimismo algunos puntos de control que permiten identificar los perfiles transversales de sondeos a que antes se ha hecho alusión.

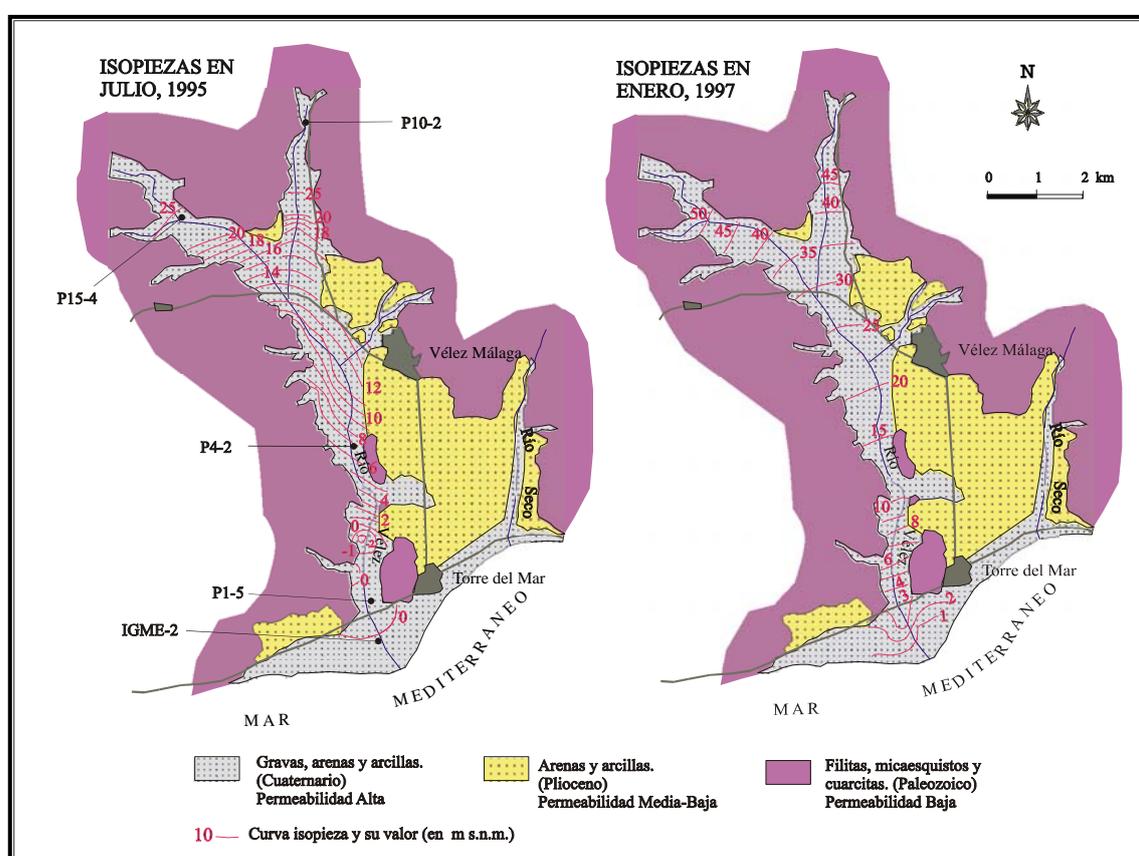


Figura 4.2. Mapas de isopiezas en julio de 1995 y enero de 1997 (García Aróstegui, 1998).

Si se considera el tramo de acuífero comprendido entre la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa y el perfil 4 (prácticamente a mitad de distancia entre Vélez-Málaga y Torre del Mar), cuya longitud es de unos 3,3 km a lo largo del cauce, se aprecia que la morfología de las isopiezas es bastante diferente en ambas situaciones, pues en la que representa niveles excepcionalmente altos (enero de

1997, cota media del nivel en el tramo: 23 m) se manifiesta un flujo sensiblemente paralelo al cauce principal, caracterizado por un gradiente hidráulico del 0,45 %, mientras que en la de niveles muy bajos (julio de 1995, cota media del nivel en el tramo: 10 m) la componente general de flujo en el valle aluvial es lateral, indicando una circulación de Noreste a Suroeste, con un gradiente hidráulico del 0,4 % (del 0,15 % según la dirección del cauce principal).

Por lo tanto, en la situación de sequía, además de una desaturación media de 13 m en el tramo considerado, parece manifestarse una circulación hacia el aluvial del río Vélez procedente del conjunto de la margen izquierda del río Vélez formado por los afloramientos pliocenos, el arroyo del Mineral y el área urbana de Vélez-Málaga. Esta circulación no se identifica en la situación de niveles altos, al ser verosímilmente su magnitud muy reducida respecto a la del flujo paralelo al eje fluvial, procedente de sectores del acuífero aluvial situados aguas arriba, que existe en esa situación.

Para el perfil 6, junto a las perforaciones realizadas, en la situación de niveles altos el gradiente según el cauce es del 0,54 %. En niveles bajos la dirección del cauce coincide aproximadamente con la de las líneas isopiezas, indicando un flujo del NE al SO, según se ha dicho, con un gradiente del 0.45 %.

Para el perfil 5, junto a Vélez-Málaga, en la situación de niveles altos el gradiente según el cauce es del 0,4 %. En niveles bajos ocurre lo mismo descrito para el P6, con un gradiente del 0.48 %.

Aunque entre el P6 y el P5 en niveles bajos la dirección del cauce no es la del flujo principal en el acuífero, según se ha citado repetidamente, se ha estimado un gradiente en esa dirección de 0,087 %, es decir, unas cinco veces inferior a la situación de niveles altos.

En el sector costero del acuífero también se advierten diferencias. En la situación de niveles altos se aprecia con claridad un gradiente piezométrico hacia el mar, indicando la descarga del acuífero a través de ese límite. En la situación de niveles bajos se advierte, por el contrario, que la cota cero está a unos 3 km tierra adentro

del borde costero y que existen depresiones locales que traducen la existencia de conoides de bombeo.

Si se considera la piezometría de los aluviales de los ríos Vélez y Benamargosa inmediatamente antes de su confluencia, se deducen flujos que discurren, en general, en la dirección de los cauces. Se miden valores del gradiente en la situación de niveles bajos del 1,2 % (río Vélez) y 0,8 % (río Benamargosa), mientras que en la de niveles altos los valores son 0,93 % (río Vélez) y 0,6 % (río Benamargosa).

En el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (JA-ITGE, 1998), al describirse el acuífero del río Vélez, se incluyen dos mapas de isopiezas que corresponden a situaciones hidrológicas antagónicas, localizadas en octubre de 1985 (niveles bajos) y octubre de 1996 (niveles altos). Existe una gran semejanza general con lo representado en la figura 4.2. En la primera situación es patente un gran conoide de bombeo al Oeste de Torre del Mar, con cotas negativas en su ápice. En la segunda situación, el flujo natural al mar es fácilmente apreciable. En ambas situaciones se advierte la inflexión de las isopiezas al Suroeste de Vélez-Málaga, y no solamente en la de niveles bajos como en la figura 4.2.

La figura 4.3 permite apreciar la situación piezométrica actual en el contexto histórico.

4.4. Parámetros hidráulicos

Los datos previos de que se dispone proceden de 41 ensayos de bombeo realizados entre 1984 y 1985. La transmisividad varía entre valores de 500 m²/día y 6500 m²/día, con un promedio de 2800 m²/día. Se obtienen permeabilidades comprendidas entre 30 y 300 m/día, con una media de 70 m/día. Para el coeficiente de almacenamiento los valores obtenidos son del 1% al 11%, con una media de 5%. En general, los parámetros presentan valores menores hacia la desembocadura.

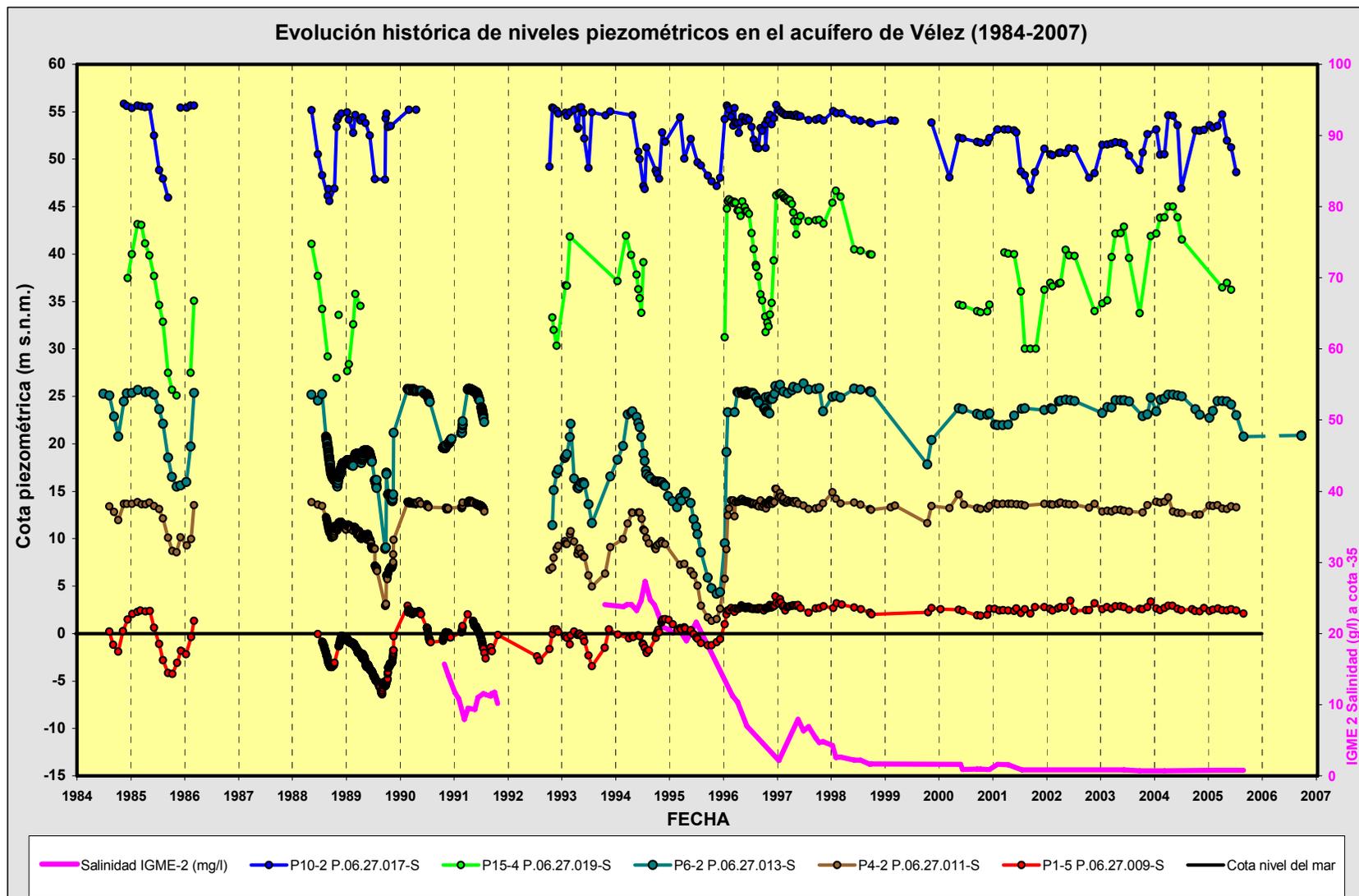


Figura 4.3. Evolución de niveles piezométricos en el acuífero de Vélez.

5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PERFORACIONES Y DE LOS MATERIALES ATRAVESADOS

Estos aspectos se describen detenidamente en el informe de la empresa CEMOSA para AcuaMed, por lo que nos remitimos a dicho documento para información detallada al respecto. A continuación se destacan algunos aspectos de interés para este Estudio.

Las perforaciones han atravesado en sus metros finales, en mayor o menor medida, el sustrato impermeable: 4,5 m en el S-4, 9 m en el S-3, 10,3 m en el S-1 y 16 m en el S-2. Estos materiales esquistosos se encontraban muy alterados en el sector de contacto con el aluvial. Esta zona de mayor alteración presentaba espesores de 2 m (S-4), 4 m (S-3), 8 m (S-2) y 2 m (S-1).

Los espesores de aluvial atravesados en cada perforación han sido 46,5 m (S-4), 41 m (S-3), 34 m (S-2) y 10,2 m (S-1). Según esto, los datos previos que se manejaban sobre esta característica del acuífero, que apuntaban a valores cercanos a los 70 m a escasa distancia hacia el Este (punto P6-2), se han revelado como inexactos. A este respecto, al ser materiales que rellenan paleorelieves erosivos, no es raro que en aluviones se detecten cambios importantes de espesor entre puntos cercanos. Esto también puede responder al efecto de algún accidente tectónico que afecte al sustrato. Estos factores pueden explicar las importantes diferencias en el espesor de aluviones encontradas entre los puntos S-1 y S-2, distantes unos 50 m.

Las circunstancias expuestas en el párrafo anterior hacen muy aconsejable la realización de estimaciones de profundidad del sustrato antes de acometer la perforación de captaciones, para garantizar el éxito de éstas, y no confiar en la información al respecto que puedan ofrecer puntos próximos. Tales estimaciones pueden basarse (deseablemente) en datos directos, como son los ofrecidos por los sondeos de reconocimiento, o, lo que es más económico aunque menos resolutivo, utilizar técnicas geofísicas.

En relación con la idea anterior, la empresa CEMOSA ha realizado un perfil sísmico en el que ha definido la profundidad del sustrato. Lamentablemente, las características del método han hecho imposible la realización de perfiles transversales al cauce del río Vélez, lo que habría permitido comprobar las secciones a través de las que mayoritariamente se produce el flujo subterráneo. El perfil realizado ha sido longitudinal, prácticamente coincidente con el cauce, paralelo, pues, a la línea que une los sondeos S-1 y S-4. De dicho perfil, y de los propios datos obtenidos en los sondeos, se desprende que: a) la profundidad del sustrato hacia aguas arriba no se incrementa; b) hay un mayor espesor local de aluviones entre los sondeos S-3 y S-4; c) el sustrato aumenta su profundidad hacia la margen izquierda del cauce, es decir, en dirección Este.

En el marco del presente proyecto se ha realizado, el 17 de julio de 2007, un perfil geoelectrico (tomografía eléctrica) de unos 600 m de longitud, paralelo a la línea de perforaciones de AcuaMed, aunque desplazado de ella una veintena de metros hacia la margen izquierda, aprovechando las buenas condiciones de la red de caminos existente en la finca Los Alamos (figura 5.1). Es de destacar las importantes variaciones en el espesor de acuífero que refleja dicho perfil, verosímilmente inducidas por fracturas de dirección más o menos ortogonal respecto del mismo.

Si se considera que la profundidad del nivel estático en el sector de los sondeos está comprendida entre 4 y 7 m, resultan valores aproximados de espesor saturado del orden de 5 m (S-1), 30 m (S-2 y S-3) y 40 m (S-4). De acuerdo con ello, el punto S-1 se ha considerado como negativo a efectos de su posible uso como captación.

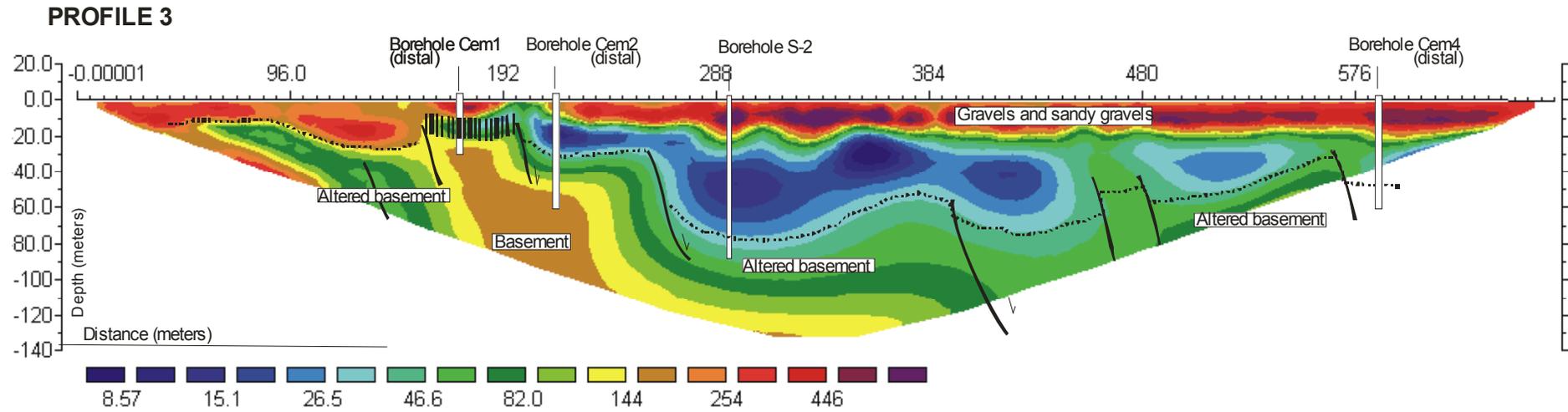


Figura 5.1. Perfil geoelectrico paralelo a los sondeos de AcuaMed (julio de 2007).

La testificación litológica detallada de las muestras obtenidas en cada perforación no aporta información relativa al predominio, en determinados tramos de profundidad, de granulometrías predominantes. Antes bien, el rasgo general parece ser la notable variabilidad de tamaños en la vertical, dentro de un contexto de granulometrías medias y gruesas con niveles de finos de poco espesor intercalados. Es decir, aunque la heterogeneidad en el detalle es muy elevada, en el conjunto puede asimilarse simplícidamente a un sistema homogéneo, sin capas bien definidas. En particular, tampoco se ha identificado dentro de los 10 primeros metros una capa de naturaleza limosa o arcillosa, por lo que, en principio, todo parece indicar que el acuífero es libre.

Basándose los resultados de las testificaciones litológicas, los técnicos de CEMOSA encargados de la realización de los sondeos han optado por no incluir tramos ciegos en la entubación bajo el nivel freático, sino una sucesión de tramos filtrantes desde la situación del nivel freático hasta una determinada profundidad. Esto, complementado con la instalación de un empaque de grava, parece una aproximación correcta al diseño de las captaciones cuando en el detalle existe gran heterogeneidad granulométrica, como pasa aquí.

La longitud del filtro en los tres sondeos potencialmente productivos ha sido de 33 m, según los datos suministrados por CEMOSA. En el S-2 el filtro penetra 3 m en los esquistos más alterados. En el S-3 se queda 3 m por encima de esta formación. En el S-4 se queda 10 m por encima del techo de los esquistos más alterados. El criterio, pues, ha variado de unos sondeos a otros y desconocemos las razones de ello. En el S-4, según lo expuesto, el espesor saturado “efectivo” resulta, por efecto de la longitud del filtro, algo inferior al real: 33 m frente a 40 m.

Para precisar la información hidrogeológica, en los sondeos 3 y 4 se han obtenido sendas “muestras integradas”, entendiéndose por tales las generadas a partir de retirar una misma cantidad de cada bolsa del registro litológico y luego proceder a su mezcla de manera previa a sus análisis granulométrico y permeamétrico. Según el informe de CEMOSA, la proporción de finos (tamiz 0,063 mm) es algo superior en la muestra del S-3 que en la del S-4: 10,6 % frente al 6,7 %. El diámetro

mediano que resulta de las curvas granulométricas (d_{50}) es de 7 mm en la muestra de S-3 y de 10 mm en la de S-4. En ambos casos, este tamaño corresponde a una grava fina. La uniformidad de tamaño de grano es también mayor en esta última: valores aproximados de d_{60}/d_{10} entre 170 (S-3) y 60 (S-4).

En cuanto a la permeametría, se han medido valores bastante similares en ambas muestras: $2 \cdot 10^{-2}$ cm/s (S-3) y $2,8 \cdot 10^{-2}$ cm/s (S-4). Estos valores (equivalentes, respectivamente, a 17 m/d y 24 m/d) son coherentes con materiales granulares de tamaño entre arenas medias y gravas finas.

Es posible, a partir de los datos granulométricos, estimar valores de permeabilidad mediante fórmulas empíricas. En este caso se han empleado la de Hazen, bien adaptada a materiales de tamaño como los que aquí se consideran. Esta fórmula estima la permeabilidad (K) en función del diámetro efectivo (d_{10}) de la curva granulométrica: $K = C \cdot (d_{10})^2$, donde C es un coeficiente cuyo valor es 100 para el caso de arenas gruesas heterométricas, (d_{10}) está expresado en cm y K viene dada en cm/s.

Los resultados de la aplicación de la fórmula de Hazen indican valores de K de $3,6 \cdot 10^{-3}$ cm/s (3 m/d) para el S-3 (d_{10} de 0,06 mm) y de $6,2 \cdot 10^{-2}$ cm/s (54 m/d) para el S-4 (d_{10} de 0,25 mm). Aunque el valor del d_{10} en el caso de S-3 está algo por debajo del límite de aplicabilidad de la fórmula (0,1 mm), los resultados ponen de manifiesto una diferencia de un orden de magnitud entre los dos valores de K obtenidos, siendo mayor para el caso del S-4.

Respecto a la representatividad de las muestras ensayadas, debe tenerse en cuenta que en la técnica de perforación a percusión, la utilizada en los sondeos estudiados, suelen darse condiciones que favorecen el muestreo de las fracciones más gruesas en detrimento de las finas.

6. OBSERVACIONES PREVIAS A LOS ENSAYOS

El 13 de octubre de 2006 se realizó una visita al sector de las perforaciones para identificar puntos de control y medir el nivel estático antes de los ensayos. Los sondeos 1, 2 y 3 estaban ya terminados. Se midió la profundidad del nivel en todos ellos desde el borde de la entubación: 5,68 m (S-3), 6,22 m (S-1) y 6,56 m (S-2). Aún no se les había instalado el tubo superior de 80 cm de longitud provisto de tapa y sistema de apertura con llave Allen con el que quedaron definitivamente equipados antes de los ensayos. En el S-4 no se midió por encontrarse con un problema de atranque en la instalación de la tubería.

De los piezómetros de la red de la CMA que integraban el perfil P6 se localizaron dos: el P6-2, con caseta, dentro de la finca “Los Alamos”, en la margen izquierda, y el P6-1, sin caseta, en la margen derecha. En el primero se había instalado previamente un “data-logger”, según se ha dicho. El nivel estaba a 8,51 m de profundidad en el P6-2 y a 8,57 m en el P6-1.

Además se consideraron dos pozos abiertos (A y B, figura 2.1). El primero de ellos está junto a la carretera de Vélez a Benamocarra, a mano izquierda en dirección a Benamocarra, justo antes de cruzar el puente. Tiene instalación de bombeo. La profundidad de los niveles fue de 8,03 m (desde suelo) y 9,30 m (desde brocal). El segundo pozo está en la mencionada finca Los Alamos, dentro de una caseta, junto a un sondeo que bombea normalmente para el riego de la finca. Según el encargado, se bombea prácticamente a diario, salvo que llueva

El encargado de la finca Los Alamos, en la que se mantiene un control aproximado de la precipitación, apuntó que desde mayo pasado no llovía en el área, si se exceptúa un episodio muy localizado a mediados de septiembre, donde la precipitación fue de unos 70 mm en un día, aunque luego hizo viento fuerte varios días con la consecuencia del secado del suelo, por lo que hubo que proseguir con los riegos.

También cabe señalar el hecho de que, en el momento de esta visita así como a lo largo de los ensayos posteriores, no había flujo en el cauce del río Vélez junto a los

sondeos. Existe, sin embargo, un pequeño caudal, prácticamente inapreciable por cuanto se encuentra remansado, en forma de charcas, enfrente de los sondeos. Este caudal corresponde verosímilmente a las aguas residuales de Benamocarra, que son vertidas directamente al cauce.

Con los datos de altimetría de las diferentes referencias piezométricas que nos han sido suministrados por CEMOSA, se ha obtenido la cota del nivel estático en el sector el 13-10-2006. Varía entre 22,22 m (A) y 19,60 m (S-3). En la figura 6.1 se representa la piezometría en planta.

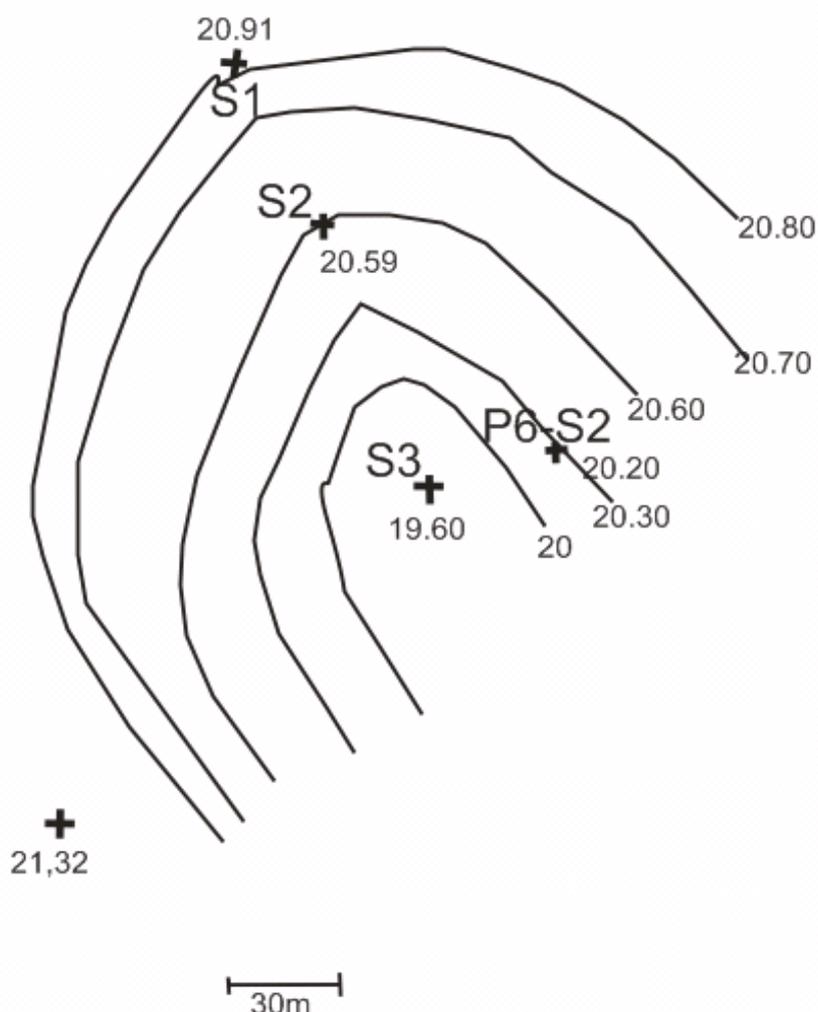


Figura 6.1. Piezometría del 13-10-2006 en el sector estudiado (valores en m s.n.m.), correspondiente al nivel estático previo a los ensayos (trazado suavizado).

En la figura 6.2 se representa la geometría de la superficie freática con fecha 19-10-2006, antes de comenzar los ensayos.

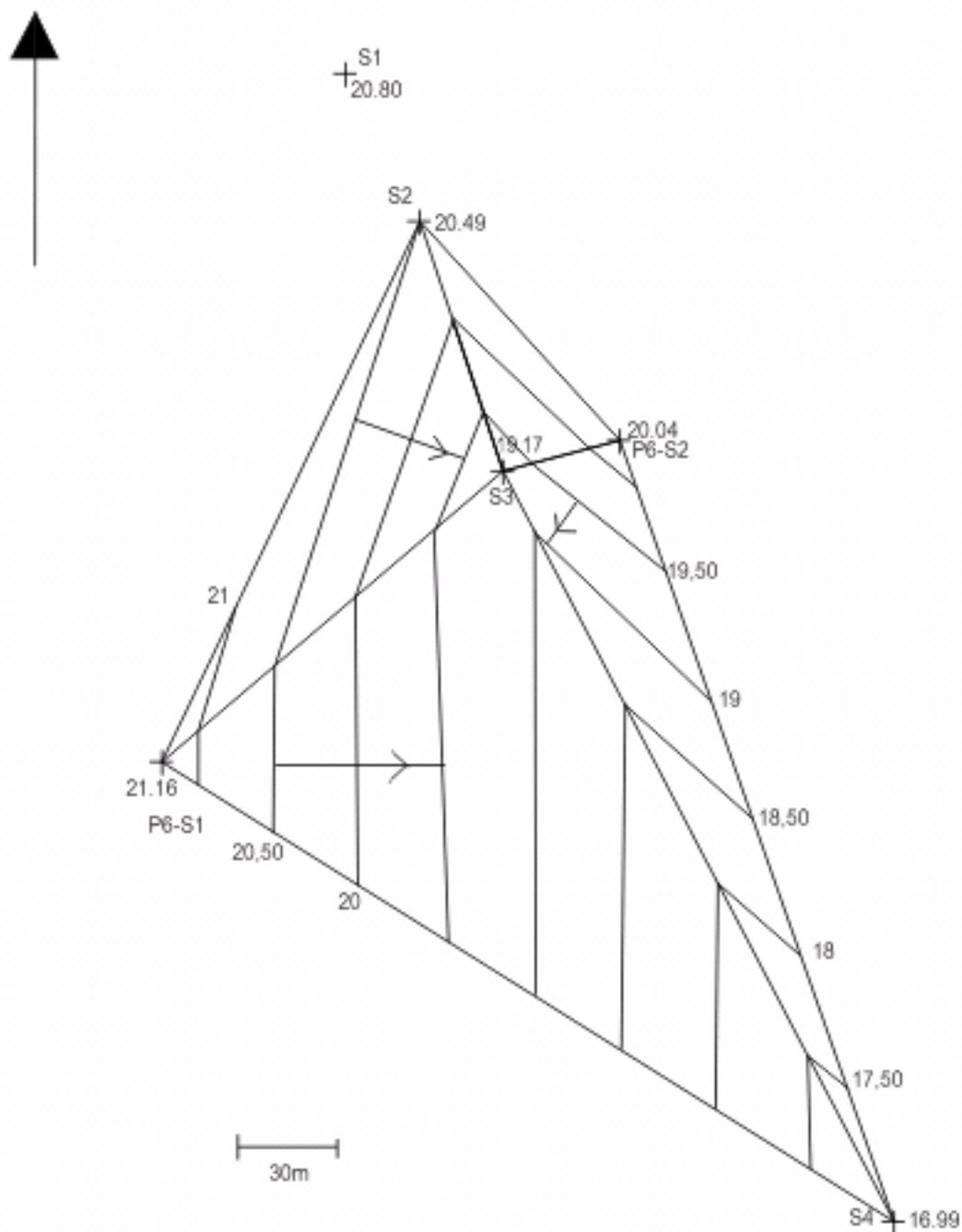


Figura 6.2. Piezometría del 19-10-2006 en el sector estudiado (valores en m s.n.m.), correspondiente al nivel estático inmediatamente anterior a los ensayos (trazado geométrico).

En ambas figuras se aprecia una ligera depresión piezométrica cuyo eje coincide aproximadamente con la línea imaginaria que uniría los sondeos. El origen de esta morfología particular –en caso de que no sea consecuencia de algún error en la nivelación de las referencias suministrada por CEMOSA- podría corresponder a la existencia de una depresión en el sustrato que coincidiese aproximadamente con la alineación de los sondeos, aspecto sobre el que no hay pruebas concluyentes por el momento.

7. SECUENCIA DE ENSAYOS HIDRÁULICOS

Los ensayos se llevaron a cabo entre los días 18 y 25 de octubre de 2006. El ensayo de bombeo de 24 h comenzó a las 9.45 h del día 20. Los dos días previos se realizaron sendos ensayos escalonados, con diferentes incidencias, en el sondeo S-3. El ensayo de trazador se efectuó coincidiendo con el bombeo de 24 h. El día 25 se realizó el ensayo escalonado en el S-4. Esta última prueba fue efectuada bajo el único control de los técnicos de CEMOSA. El resto de las pruebas fueron controladas conjuntamente por personal de CEMOSA y de la UGR.

En la figura 7.1 se representa la evolución de la profundidad del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-2 a lo largo del periodo en que se realizaron los ensayos. Se advierte en la misma como las fases de descenso de nivel van acompañadas de ligeros ascensos de temperatura (pocas décimas de grado).

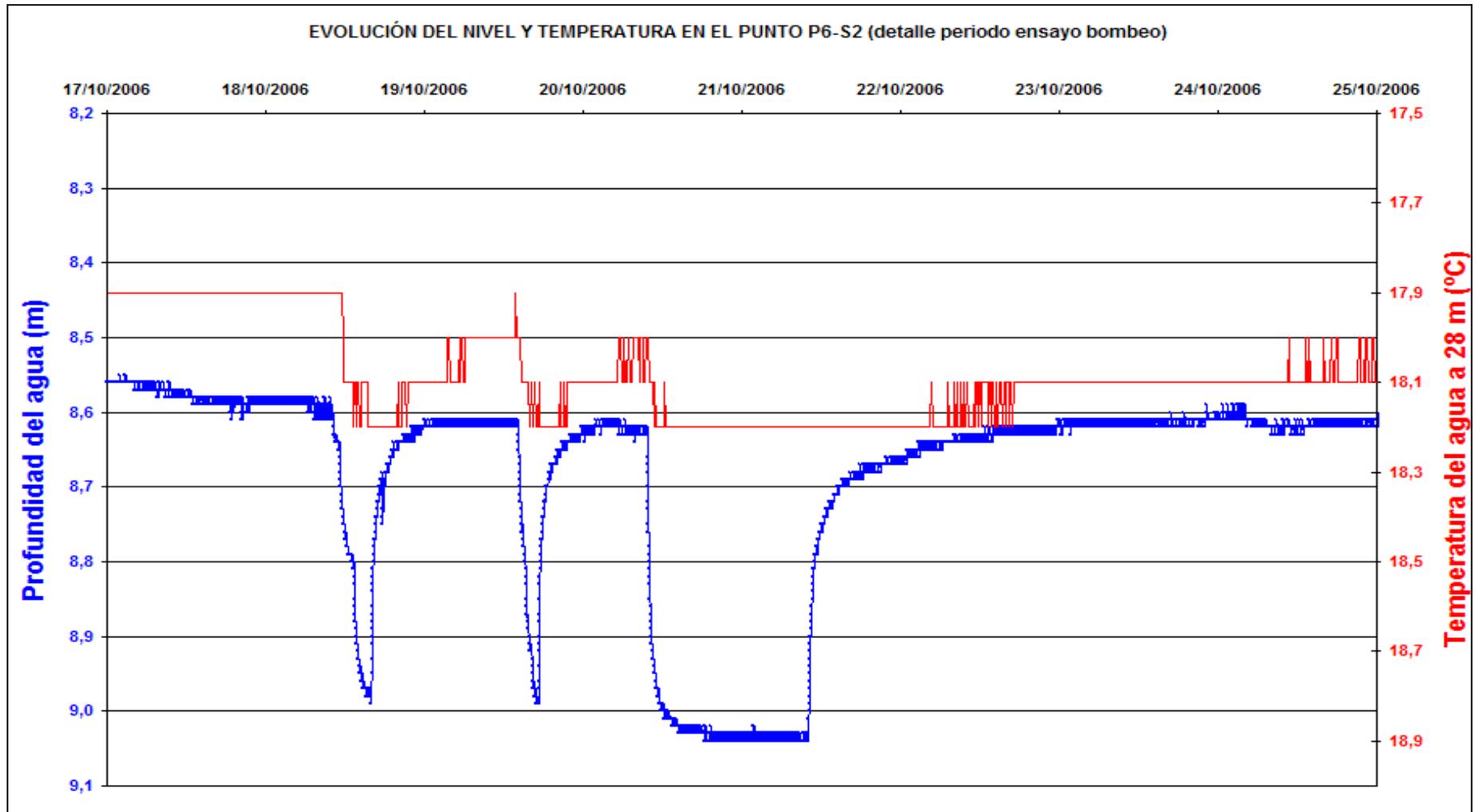


Figura 7.1. Evolución de la profundidad del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-2 a lo largo del periodo en que se realizaron los ensayos

8. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE BOMBEO DE 24 HORAS CON CAUDAL CONSTANTE

Se realizó en el sondeo S-3 el 20 de octubre de 2006. La bomba estaba colocada a 41 m de profundidad. El nivel estático estaba a 6,93 m. Para evitar la recirculación del agua bombeada, se excavó una zanja de unos 50 m de longitud, recubierta luego de plástico, que conducía el agua bombeada hacia el cauce del río (seco por entonces), por debajo del sondeo S-4.

El caudal con el que se comenzó el bombeo, a las 9.45 h, fue de 50 L/s, saliendo agua bastante turbia durante los primeros quince minutos. Pronto se apreció la producción de burbujas de aire, debido seguramente a no conseguirse la columna mínima -de 11 m de agua sobre la bomba- requerida para el correcto funcionamiento de la misma. Ello obligó a hacer ajustes de caudal a la baja. A las 12.30 h se midió una descarga de 40 L/s que se mantuvo hasta el final del ensayo.

La conductividad eléctrica del agua se controlaba periódicamente durante el ensayo, sin mostrar apenas variación alrededor del valor de 840 $\mu\text{S}/\text{cm}..$

La profundidad del nivel de agua se controló en los puntos de observación con diferente frecuencia. Los registros más detallados corresponden a los sondeos S-2 (distancia: 75 m) y S-1 (distancia: 129 m), donde se utilizó un hidronivel eléctrico, y al piezómetro P6-2 (distancia: 36 m), cuyo control se llevó a cabo a partir del “data-logger” allí instalado con anterioridad. Estos datos existen para el piezómetro P6-1, distante 135 m.

También se controló detalladamente la recuperación del nivel a lo largo de tres horas tras la interrupción del bombeo en dos puntos, uno con medida directa (S-2) y otro con registro programado (P6-2).

9. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DEL ENSAYO DE BOMBEO Y DE RECUPERACIÓN

El programa AQTESOLV (www.aqtesolv.com) permite estimar parámetros del acuífero a partir de las medidas de descensos, el caudal de bombeo y la distancia del punto de observación. El modelo de referencia (curva logarítmica descensos-tiempos) puede ser el general, o de Theis, o el de Neuman. El modelo de Theis está establecido teóricamente para acuíferos confinados, aunque es aplicable en acuíferos libres si el descenso es pequeño respecto al espesor saturado, circunstancia que cabe admitir aquí. El modelo de Neuman está concebido para acuíferos libres en tanto que tiene en cuenta el efecto denominado “drenaje diferido”, característico de éstos. Sucede, no obstante, que, si no transcurre un determinado lapso de tiempo, el citado efecto no se manifiesta en su totalidad, y los dos modelos en esa fase de tiempos iniciales coinciden sensiblemente. Esta circunstancia es la que seguramente se ha producido en el presente ensayo en relación con alguno de los puntos de control.

El programa permite visualizar el ajuste automático de los puntos experimentales a los dos modelos teóricos seleccionados y estimar los parámetros hidráulicos del acuífero: transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) y (exclusivamente para el modelo de Neuman) porosidad efectiva (S_y). Los resultados se presentan en Anexos. La permeabilidad puede estimarse como: $K = T/h_0$, donde h_0 corresponde al espesor saturado que, en el caso de los sondeos 2 y 3, es de aproximadamente 30 m. En cuanto a S_y , dadas las características del acuífero resulta lógico pensar en valores entre el 10 % y el 30 %, o incluso mayores.

Para el punto S-1 resultan por ambos modelos valores de T de alrededor de 3500 m^2/d y de S entre el 2 % y el 3 % ($S_y = 2\%$). La permeabilidad que resulta, para un espesor saturado medio de aproximadamente 30 m, es de unos 100 m/d.

Para el punto S-2, alineado aproximadamente entre el S-1 y el pozo de bombeo en dirección paralela al cauce, resultan por ambos modelos valores de transmisividad entre 2100 m^2/d (Neuman) y 2800 m^2/d (Theis). El valor de S es de $2,7 \cdot 10^{-4}$ (Theis)

y el de S_y (Neuman) del 50 %. La permeabilidad media que resulta, para un espesor saturado de aproximadamente 30 m, es próxima a los 80 m/d.

Los puntos P6-1 y P6-2 están aproximadamente alineados con el pozo de bombeo, pero en una dirección transversal a la del cauce. Para el primero, que es del que menos puntos experimentales se dispone, se obtiene un buen ajuste a la curva de Neuman. Es factible también que en este punto, más próximo al borde del acuífero, el espesor saturado sea menor (≈ 20 m?). El valor de T es de unos 170 m^2/d . La permeabilidad que se obtiene para el citado valor de h_0 es de aproximadamente 10 m/d. S_y es del 23 %. Para el P6-2 (“data-logger”) el ajuste al modelo de Neuman permite estimar un valor de $T = 2270 \text{ m}^2/\text{d}$. La permeabilidad que resulta es de 75 m/d. Para S_y resulta un valor del 50 %.

Para los descensos residuales registrados durante la fase de recuperación, el modelo de interpretación es el de Theis para esta circunstancia particular de la hidráulica subterránea. El programa ofrece los ajustes automáticos a la recta teórica y cuantifica T .

La transmisividad obtenida en el punto S-2 es de 1750 m^2/d ($K = 60$ m/d), lo que resulta algo inferior a lo calculado a partir de los datos de descenso durante el bombeo. Para el punto P6-2, el valor de T es de aproximadamente 5000 m^2/d ($K = 160$ m/d), es decir, algo más del doble del resultado del ensayo de bombeo.

10. ENSAYO DE INYECCIÓN DE TRAZADOR

Se preparó una disolución de 400 kg de sal común comercial en una cuba de aproximadamente 10 m³ de agua, dando como resultado una salmuera cuya conductividad era de 72 mS/cm, casi cien veces más que el agua subterránea. Este volumen de disolución se introdujo en el sondeo S-2, el cual contenía un volumen de unos 5 m³ con conductividad de 0,8 mS/cm. La conductividad de la mezcla teórica con el agua del sondeo era de casi 50 mS/cm.

Tras la introducción del trazador, lo que coincidió prácticamente con el comienzo del bombeo en el sondeo S-3 del día 20-10-2006, se hicieron numerosos perfiles seriados de conductividad en el S-2 para identificar el proceso de dilución del trazador. Estos perfiles ponían de manifiesto, además, el flujo vertical del trazador dentro del sondeo debido a su densidad considerablemente superior.

Aunque las condiciones de aplicación del ensayo (método del pozo único) no son las más favorables, se optó por considerar el valor medio de la conductividad a lo largo de la zona filtrante del sondeo y representar su variación con el tiempo. El modelo teórico justifica un decrecimiento exponencial de la concentración de trazador, influenciado, entre otras variables, por la velocidad de flujo del agua subterránea.

En la figura 10.1 se representa el resultado. Las condiciones teóricas se encuentran entre aproximadamente los minutos 35 y 135 del ensayo. En este tramo resulta un valor de velocidad horizontal entre 1 y 5 m/d, lo cual es congruente con los resultados que aparecen en CHSE (1987) para el perfil 6, donde se estiman valores a diferentes profundidades en los cinco sondeos de dicho perfil que están en el rango entre 0,6 m/d (P6-S5 entre 20 y 33 m) y 18 m/d (P6-S2, hasta los 46 m), con un valor medio de 5 m/d.

EVOLUCION DE LA CONDUCTIVIDAD MEDIA EN EL SONDEO S2 (ensayo de trazador)

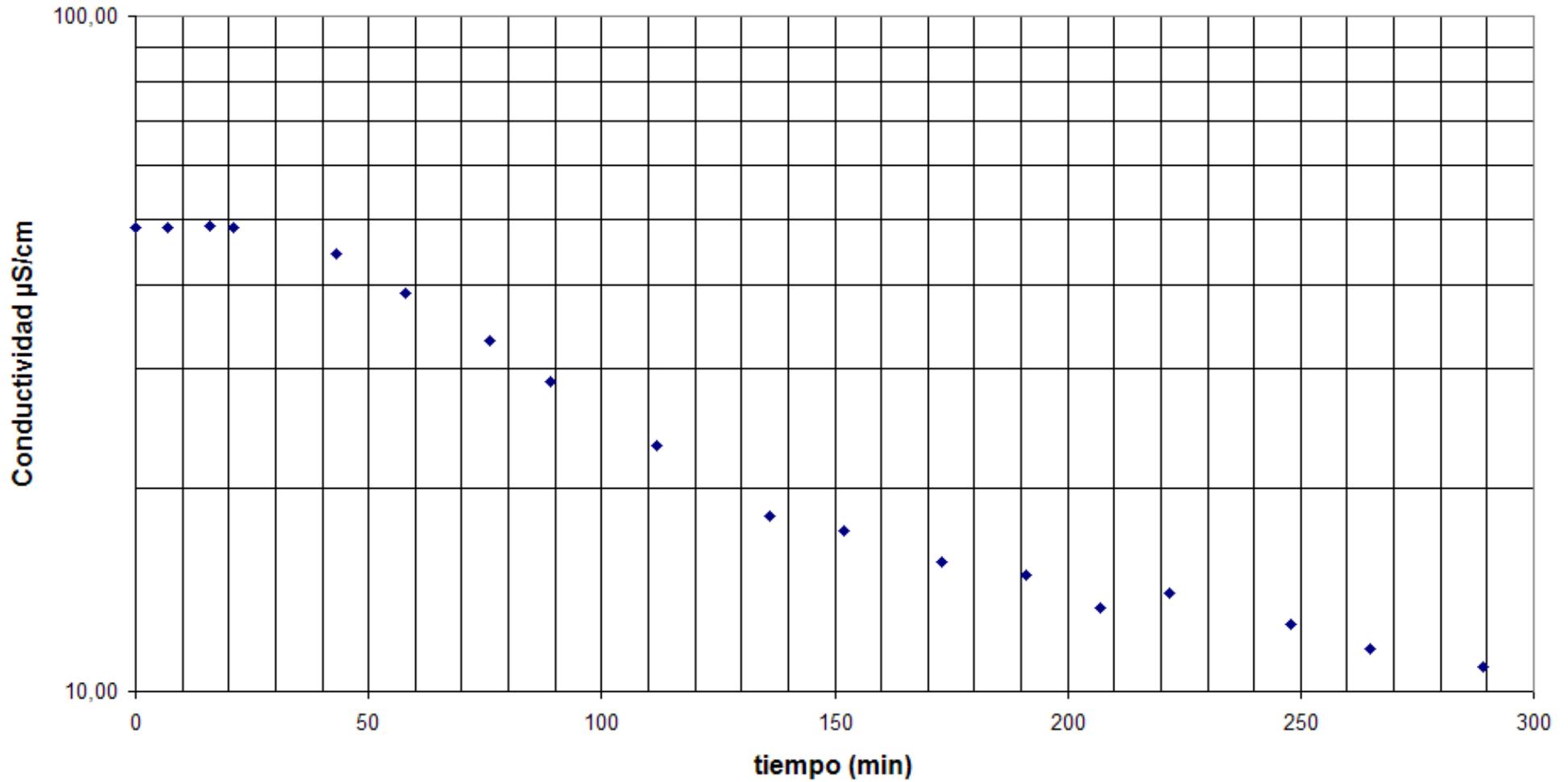


Figura 10.1. Representación gráfica de los resultados del ensayo de trazador.

A partir de los valores de la velocidad horizontal (v) puede estimarse la “velocidad de Darcy” ($q = v \cdot n_e$), admitiendo una porosidad efectiva (n_e) de 0,2: entre 0,2 m/d y 1 m/d.

Si se tiene en cuenta el gradiente hidráulico para la línea de flujo que une el sondeo S-1 con el sondeo en que se bombea (S-3) pasando por el sondeo ensayado (S-2), que es de 0,02, entonces se obtienen valores de permeabilidad entre 10 m/d y 80 m/d.

11. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS

Los ensayos se planificaron con escalones de caudal constante de una hora de duración, comenzando a 15 L/s y aumentando de forma progresiva, sin recuperación entre cada escalón, hasta tratar de llegar a 60 -65 L/s en al menos cuatro escalones (por ejemplo: 15, 30, 45, 60 l/s). El objetivo de no forzar demasiado los incrementos de caudal tenía por fin contribuir al desarrollo natural del sondeo. También se especificó que en los escalones no se buscaría necesariamente la estabilización del nivel. Estas condiciones, sin embargo, no se siguieron estrictamente por parte de los operarios, y prevaleció el criterio de prolongar la duración de los escalones hasta conseguir la estabilización.

El día 18-10-2006 la bomba estaba instalada en el sondeo S-3 a 43 m de profundidad. El sondeo tiene 33 m de filtro y llega a los 38 m de profundidad, El nivel estático estaba a 6,90 m. El ensayo comenzó a las 10:00 con un caudal de 15 L/s. Al cabo de una hora el nivel estaba estabilizado a 7,60 m. Luego se incrementó el caudal a 30 L/s. Como no se estabilizaba el nivel, se prosiguió otra hora, igualmente sin estabilización. Después de 190 min se llegó a un nivel de 10,54 m y el caudal se cambió a 45 L/sec. El caudal entonces comenzó a mostrar irregularidades, con descarga importante de aire. Se concluyó que la bomba no funcionaba adecuadamente y el ensayo se detuvo a la 15:40 con el nivel a 24,77 m. Al cabo de 20 minutos de recuperación el nivel era de 7,56 m. La conductividad del agua bombeada era de 840 μ S/cm.

El 19-10-2006 se instaló una nueva bomba a la misma profundidad. El nivel estático era de 6,91 m. A las 14:10 comienza a bombearse un caudal de 30 L/s. Al cabo de una hora el nivel era de 10,20 m. El caudal se incrementó a 45 L/sec y después de una hora el nivel alcanzó 17,38 m. Se subió a continuación el caudal a 65 L/s. Con este valor se producían irregularidades en la descarga, con frecuente salida de aire, que obligaban a rectificar algo a la baja el caudal. Después de tres horas de bombeo el nivel estaba a 40,85 m. Al cabo de 90 minutos de recuperación el nivel estaba a 7,03 m. La conductividad a lo largo del bombeo no experimentó cambios respecto al valor del día anterior (840 μ S/cm).

El 25-10-2006 se ensayó el sondeo S-4. El filtro tiene 33 m y llega a una profundidad de 35,50 m. El nivel estático estaba a 7,36 m. A las 10:45 comenzó el bombeo con un caudal de 15 L/s. Después de 75 minutos de bombeo se medía un descenso 0,87 m. Luego se dobló el caudal, y al cabo de otros 75 minutos el descenso era de 2,64 m. El caudal se incrementó hasta 50 L/s y el descenso alcanzó 10,92 m. A las 14:05 se incrementó el caudal a 70 L/s, lo que produjo una caída en el nivel de unos 20 m y la descarga de mucho aire, por lo que se decidió reducir el caudal. Durante 25 minutos el caudal fue de 40 L/s, pero a las 17:05 se mantuvo en 50 L/s. Una hora más tarde el caudal alcanzó 55 L/s, seguido de turbulencias en la descarga. 10 minutos más tarde se interrumpió el bombeo con el nivel a una profundidad de 35,0 m. Tras 90 minutos de recuperación, el nivel se encontraba 5 cm más profundo que el nivel estático al comienzo de la prueba.

Como es usual en este tipo de ensayos, en todos los comienzos de escalones de bombeo se advertía la descarga de agua muy turbia, la cual, progresivamente, iba aclarándose a medida que el bombeo avanzaba.

En las figuras 11.1 y 11.2 se incluyen las gráficas de descensos-tiempos (log). Esto último se hace para facilitar la visualización y comprobar ajustes/desviaciones respecto del modelo teórico (recta de Jacob-Cooper).

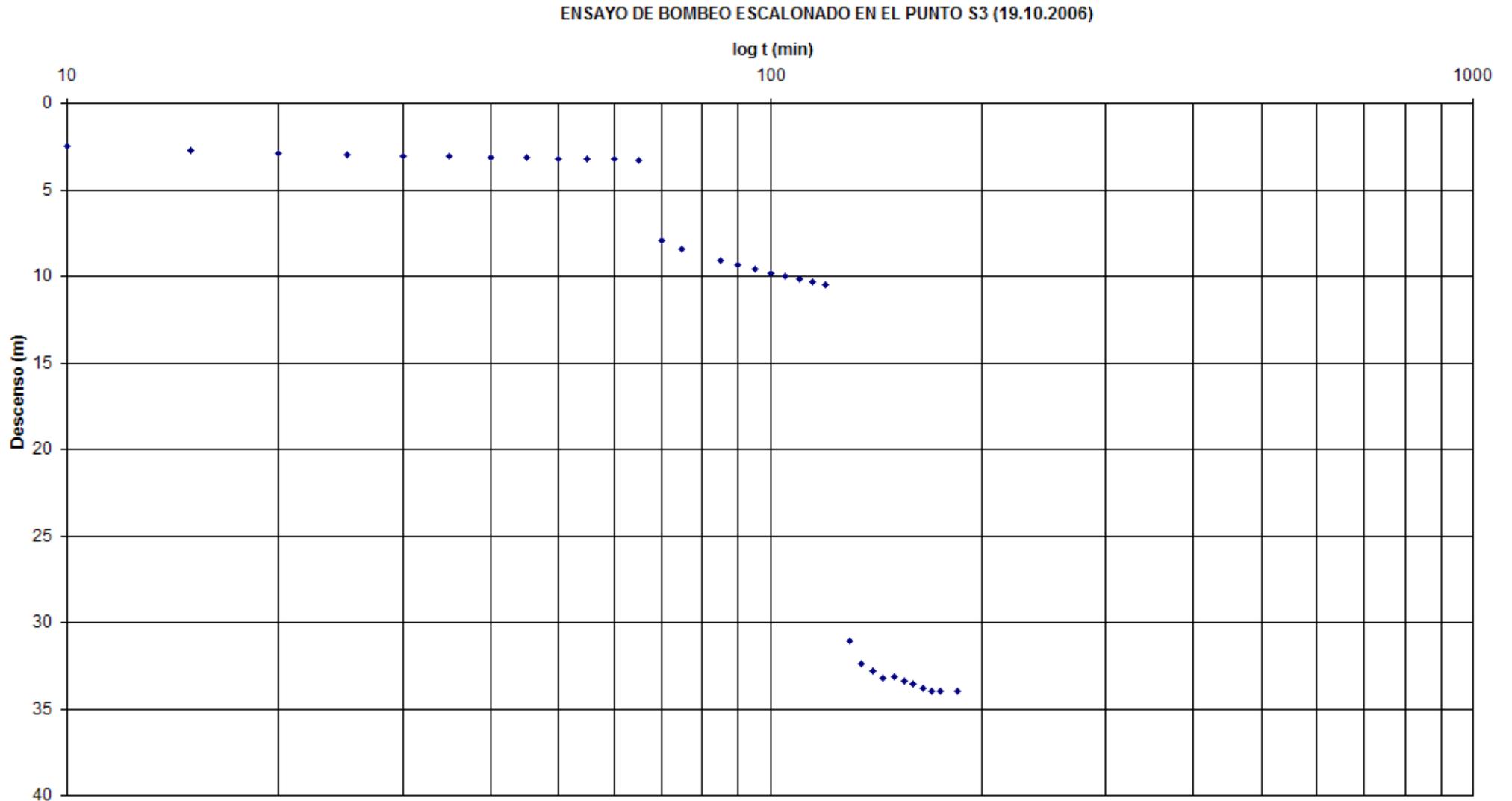


Figura 11.1. Evolución de descensos en el sondeo 3 durante el ensayo de caudales escalonados.

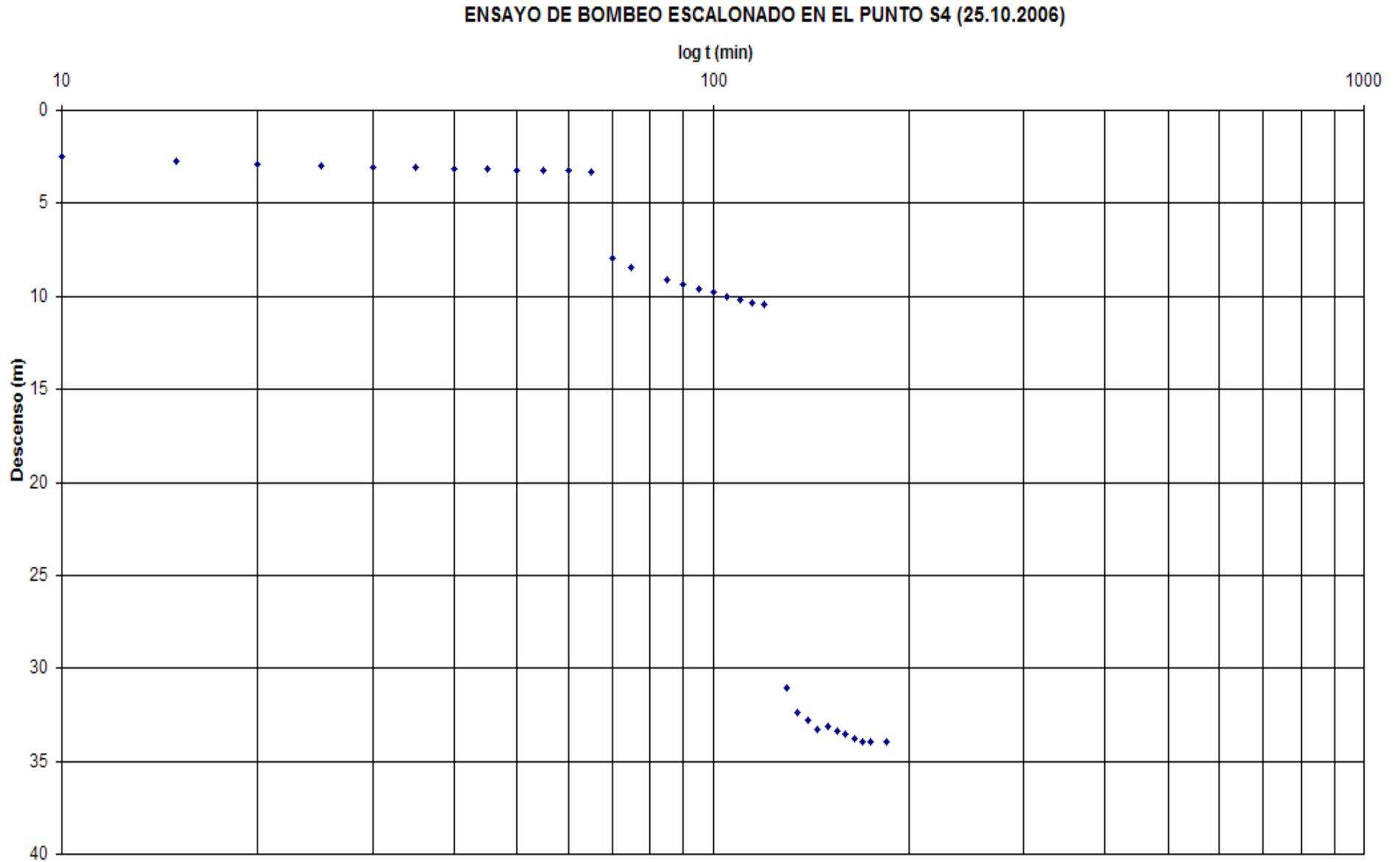


Figura 11.2. Evolución de descensos en el sondeo 4 durante el ensayo de caudales escalonados.

12. CURVAS CARACTERÍSTICAS Y EFICIENCIA DE LOS SONDEOS

En la figura 12.1 se representa gráficamente el descenso asociado a los diferentes escalones de caudal para cada uno de los sondeos ensayados. Para el S-3 no se han considerado los resultados de los dos últimos escalones del ensayo del 18-10 debido a los problemas encontrados que ya se han descrito.

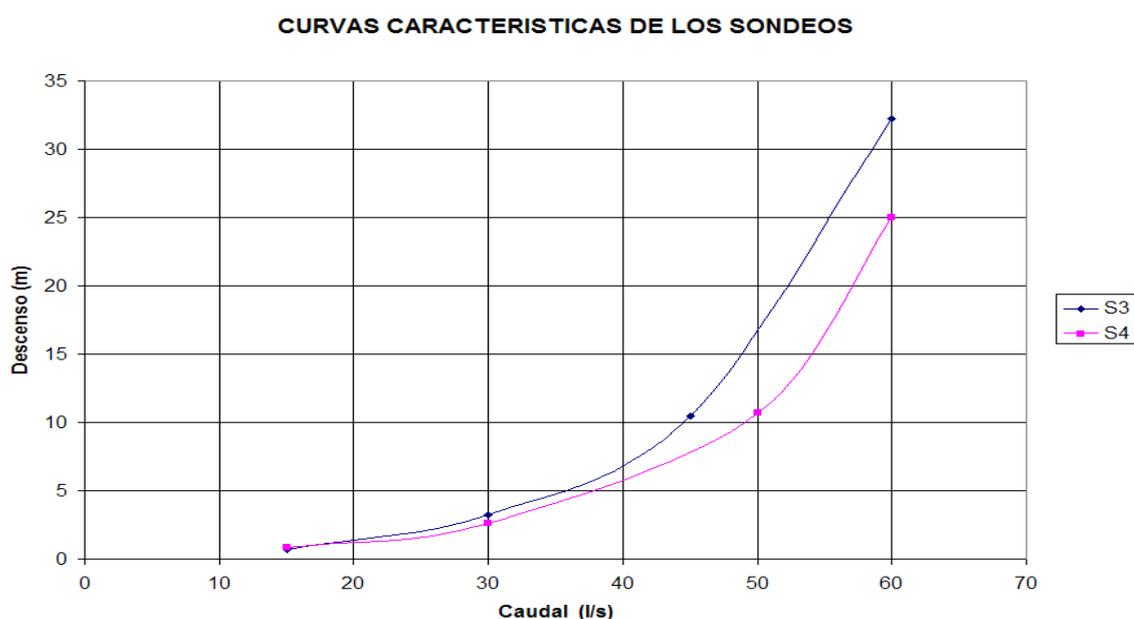


Figura 12.1. Curvas características obtenidas a partir de los ensayos de caudales escalonados.

Las curvas características representadas son orientativas, porque las condiciones de realización de los ensayos no han sido las correctas que se planificaron. Se comprueba, no obstante, que la relación entre caudal bombeado y descenso producido en el propio pozo se aleja de la linealidad sobre todo a partir de 40 L/s. También se advierte el mejor rendimiento (caudal específico) que presenta el S-4 respecto del S-3 para los caudales más elevados ensayados. Así, para un bombeo de 30 L/s, el caudal específico que se obtiene (muy similar en ambos sondeos) es de aproximadamente 10 L/s·m. Al doblar el caudal de bombeo, el caudal específico del S-4 es 2,4 L/s·m y el del S-3 es 1,9 L/s·m.

Se ha tratado de encontrar la expresión analítica para las curvas características de los dos sondeos en el tramo de caudales ensayado. La ecuación que da el descenso en el propio pozo (s_p , en m) en función del caudal de bombeo (Q , en m^3/min) es la de Rorabaugh:

$$s_p = B \cdot Q + C \cdot Q^n$$

donde B es el coeficiente de pérdidas de carga en el acuífero y C es el coeficiente de pérdidas de carga en el pozo. El término $B \cdot Q$ representa el descenso debido al flujo en el acuífero (descenso “teórico”) y el término $C \cdot Q^n$ representa el descenso por las pérdidas de carga en el pozo.

Tras emplear el método gráfico de tanteos en el valor de B , se ha llegado a los siguientes resultados:

$$\text{Para el S-3: } s_p = 0,60 \cdot Q + 0,43 \cdot Q^{2,75}$$

$$\text{Para el S-4: } s_p = 0,875 \cdot Q + 0,36 \cdot Q^{2,82}$$

La eficiencia del pozo E_p se calcula por el cociente entre el descenso real y el descenso teórico expresado como porcentaje. Es función del caudal y se refiere a un tiempo de bombeo dado, en nuestro caso el de duración de cada escalón (aproximadamente una hora). En la figura 12.2 se representa el valor de E_p para tres caudales en cada sondeo. Para un caudal de 40 L/s la eficiencia del sondeo S-3 es del 23 % y la del S-4 es del 47 %.

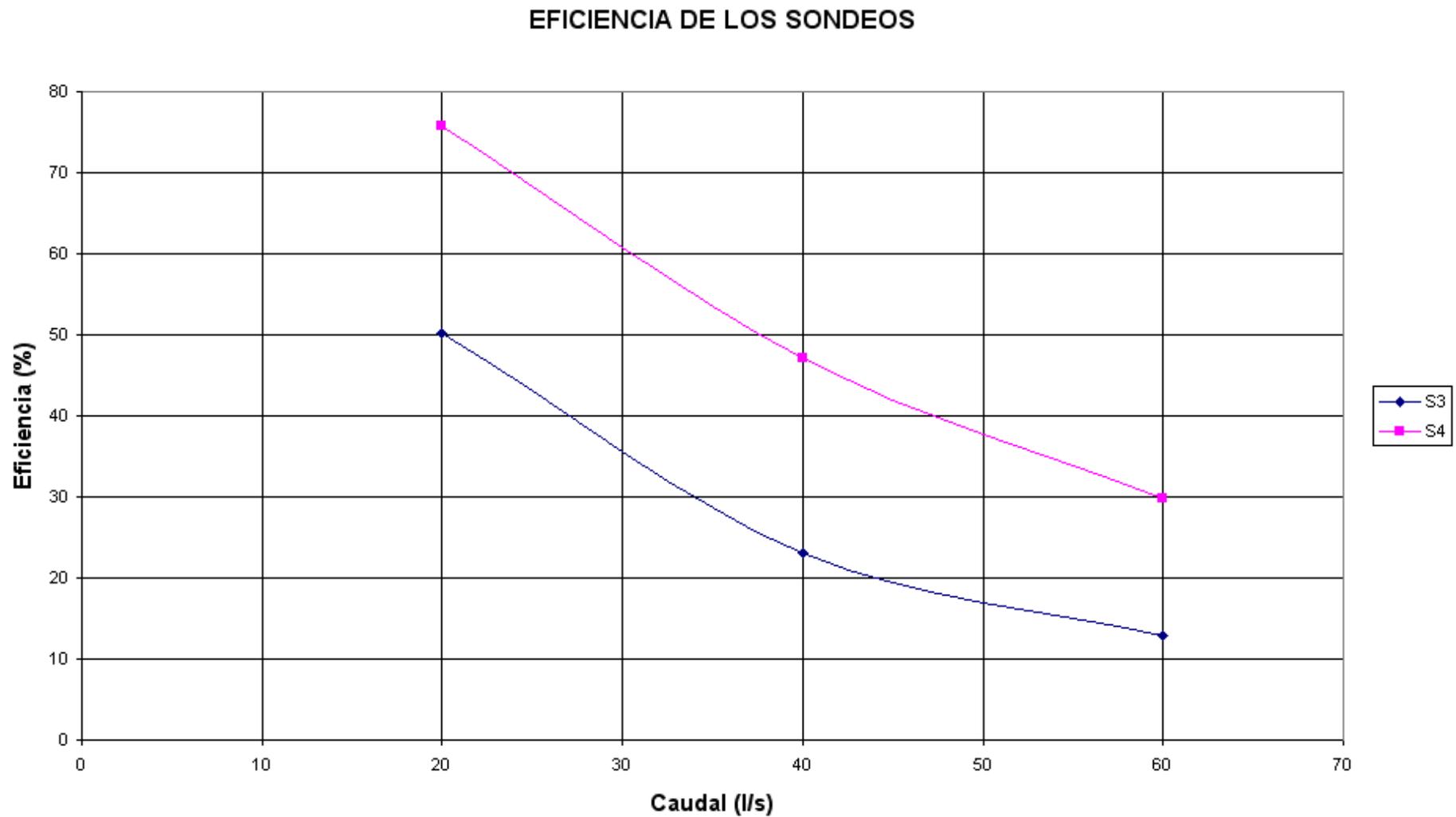


Figura 12.2. Eficiencia de los sondeos 3 y 4 a partir de los resultados de los ensayos de caudales escalonados.

13. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DE LAS RECUPERACIONES TRAS LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS

Los ensayos de bombeo escalonados no son los más idóneos para estimar parámetros hidráulicos de los acuíferos a partir de los descensos medidos en piezómetros próximos, pues la condición de caudal constante de bombeo no se cumple. Los realizados en este estudio, además, tienen el inconveniente de su duración escasa. No obstante, las medidas de recuperación (considerando el caudal medio del bombeo como valor de caudal “constante”) presentan mayor fiabilidad de cara a la estimación de los parámetros, al menos con fines de contrastar los valores obtenidos en otros ensayos más representativos. Así, tras el bombeo escalonado del sondeo S-3 el 19-10-2006, las medidas de recuperación en el sondeo S-2 conducen a un valor de T de 2310 m²/d, lo que implica una K de aproximadamente 80 m/d. En el punto P6-2 el valor de T es de algo más de 5100 m²/d, a lo que corresponde una K de 170 m/d. Los ajustes se pueden ver en los gráficos correspondientes del Anexo.

14. CONSIDERACIONES SOBRE LOS VALORES DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS OBTENIDOS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS (LABORATORIO Y CAMPO)

Con la excepción del punto P6-1, en los ensayos de bombeo y de recuperación analizados se obtienen valores de T entre aproximadamente 1700 m²/d (S-2) y 5000 m²/d (P6-2, recuperación del ensayo escalonado del 19-10, que es un valor menos fiable que los obtenidos en el ensayo de 24 h). La permeabilidad que resulta está entre 50 m/d y 170 m/d, con un valor promedio general aproximado de 100 m/d.

Si se tiene en cuenta que en el punto en que se han obtenido los valores más elevados de T es bastante factible que el espesor saturado sea superior al valor de referencia de 30 m, tal vez del orden de los 50 m o incluso más, según los datos de CHSE (1987), entonces resultaría un valor de K de 100 m/d.

El valor inferior de T de los obtenidos, de unos 170 m²/d, lo ha sido en el P6-1, donde es factible que, de acuerdo con la información disponible, el espesor saturado sea inferior a 30 m, según ha sido apuntado. En cualquier caso, este resultado sugiere un valor de K menor que en el resto de los puntos (unos 10 m/d).

El valor medio general de K de 100 m/d es algo más del doble del valor medio estimado a partir del ensayo de trazador realizado (45 m/d) y unas cinco veces superior al promedio de los dos valores obtenidos en las pruebas de laboratorio (permeametrías). Dentro de que se trata de cifras del mismo orden de magnitud, las diferencias ponen de manifiesto el efecto de escala que resulta de considerar un volumen de terreno muy superior.

15. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN ESTACIONARIO EN UN SONDEO-TIPO

Se ha considerado un sondeo-tipo para la zona donde se han realizado las perforaciones, de acuerdo con las características siguientes:

Permeabilidad: $K = 100 \text{ m/d}$

Espesor saturado: $h_0 = 25 \text{ m}$

Caudal constante de bombeo: $Q = 40 \text{ L/s}$

Eficiencia del sondeo: $E_p = 30 \%$

Si se hace la hipótesis de que en el transcurso del bombeo se alcanza el régimen estacionario con radio de influencia $R = 500 \text{ m}$, pueden estimarse los descensos a diferentes distancias (r) del pozo de bombeo, partiendo de la propia pared de éste ($r_p = 0,25 \text{ m}$), a partir de la fórmula de Dupuit.

La solución se representa gráficamente en la figura 15.1. Se advierte en la figura que en el propio pozo el descenso es de casi 6 m, mientras que a 25 m del mismo pasa a ser de unos 70 cm.

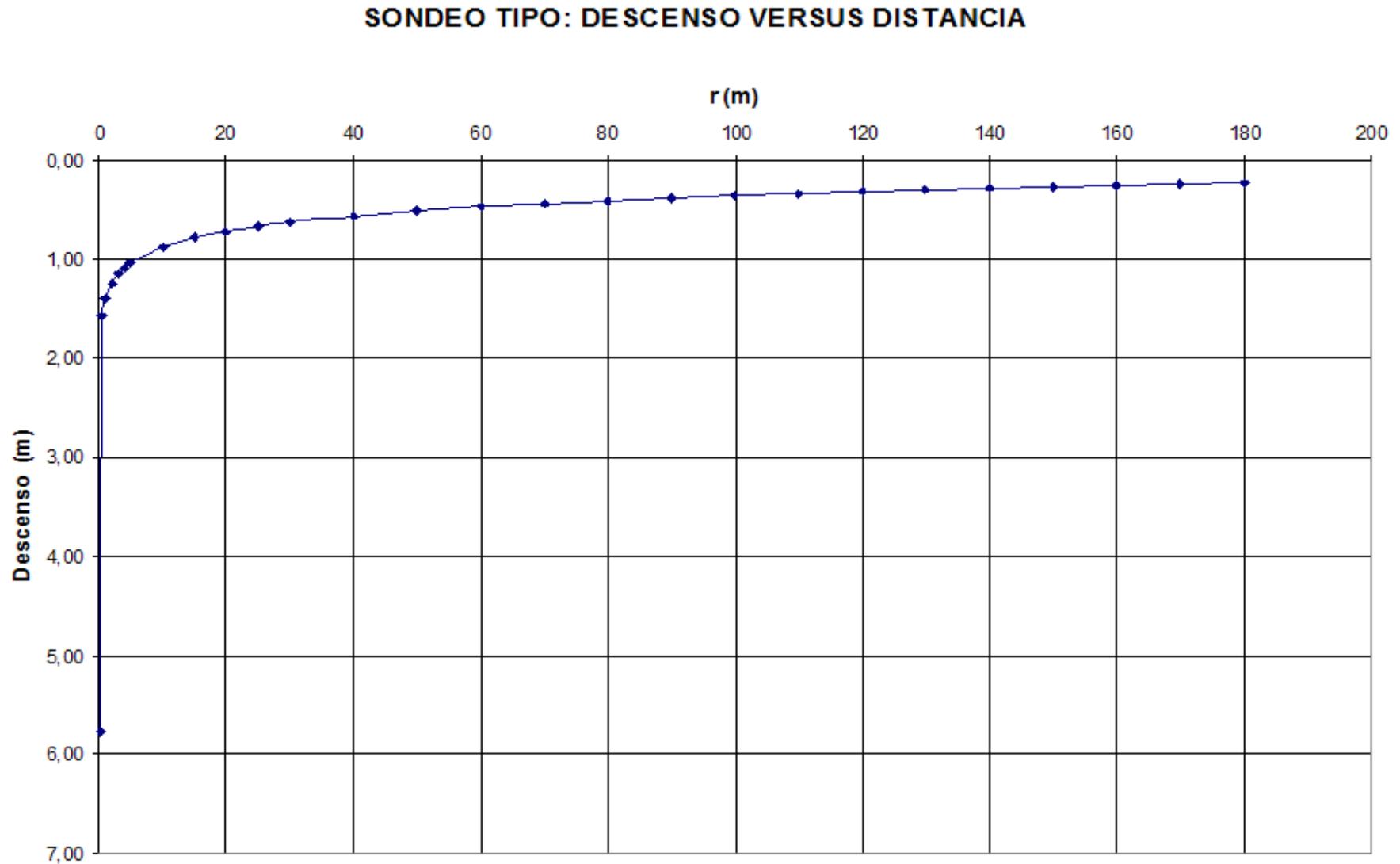


Figura 15.1. Estimación de descensos respecto a la distancia del pozo de bombeo (sondeo-tipo) en régimen estacionario

16. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN TRANSITORIO EN UN SONDEO-TIPO

Con las mismas condiciones expuestas en el apartado anterior, salvo la de la existencia del régimen estacionario, y considerando ahora un valor de coeficiente de almacenamiento de $S = 0,2$, y a partir de la aplicación de la fórmula de Jacob, se ha estimado, en primer lugar, la evolución en el tiempo –a lo largo de un mes de bombeo- del descenso a una distancia de 25 m del punto de bombeo. El resultado se representa en la figura 16.1, donde se advierte un incremento del descenso entre 20 cm y casi 80 cm a lo largo de ese intervalo.

Un cálculo similar, pero ahora para el pozo de bombeo, pone de manifiesto descensos entre 4 m y casi 6 m en ese mismo intervalo (figura 16.2).

SONDEO TIPO:DESCENSO VERSUS TIEMPO (r = 25m)

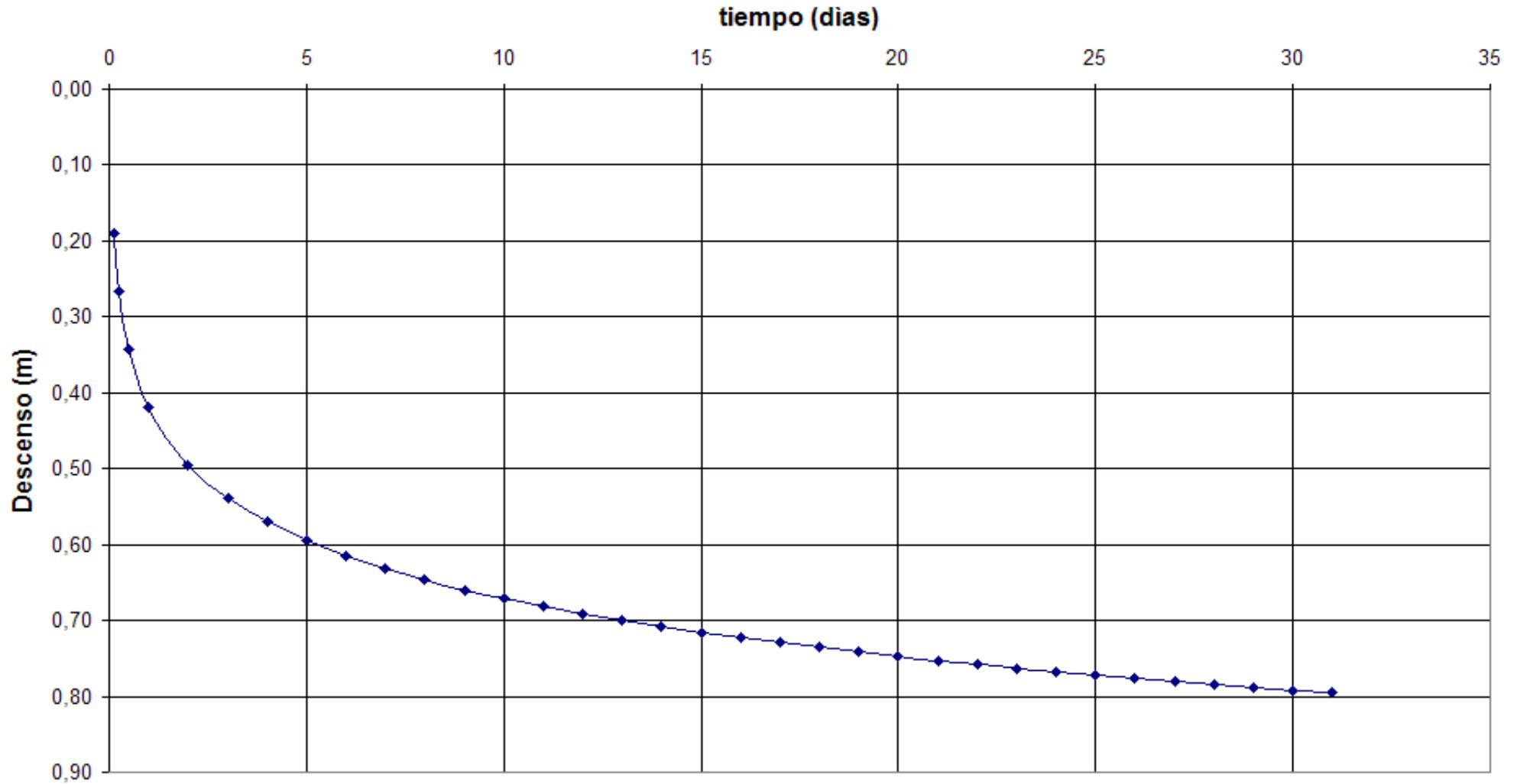


Figura 16.1. Estimación de la evolución del descenso con el tiempo de bombeo en un punto de observación situado a 25 m del sondeo-tipo.

SONDEO TIPO: DESCENSO VERSUS TIEMPO ($r = 0.25 \text{ m}$)

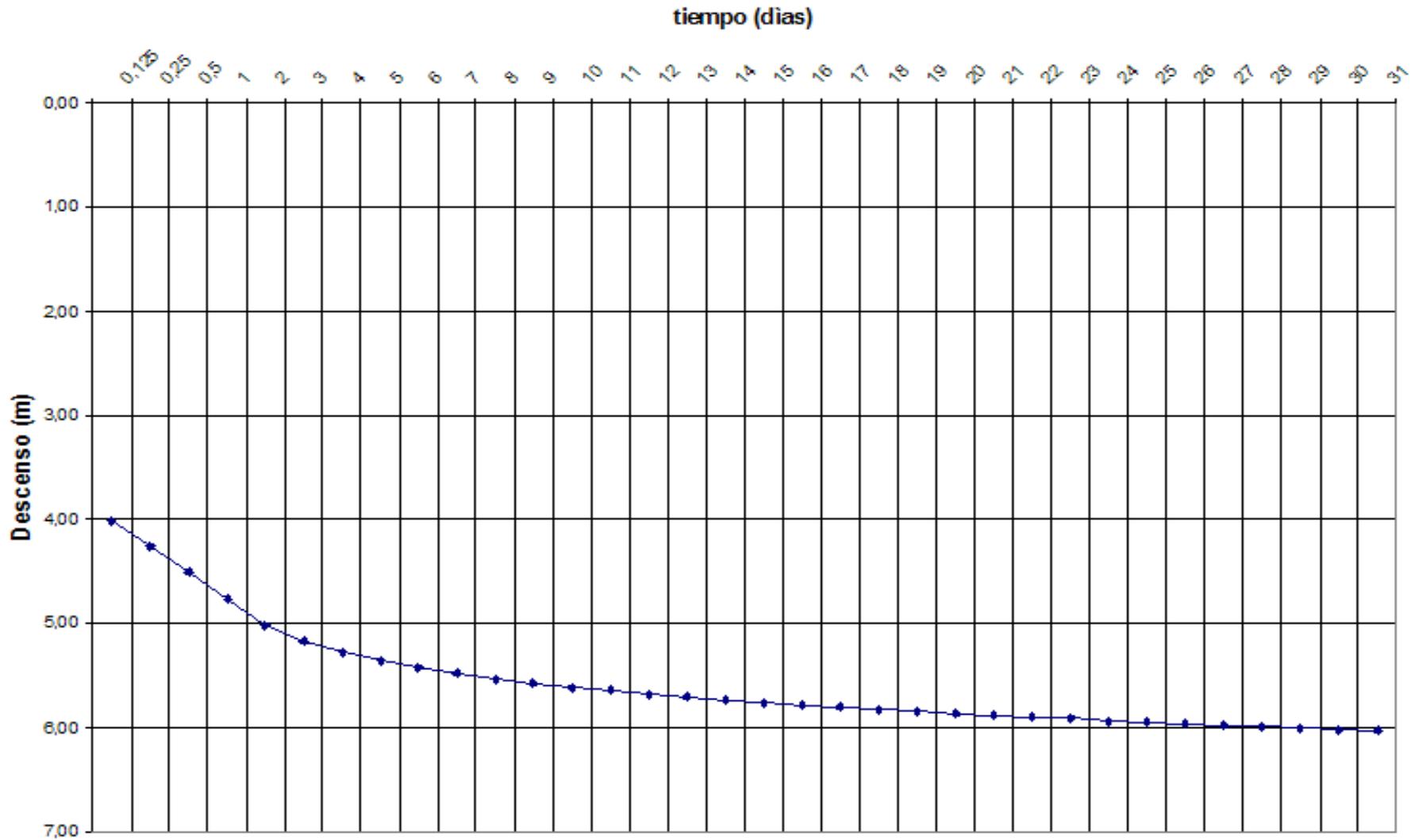


Figura 16.2. Estimación de la evolución del descenso con el tiempo de bombeo en el sondeo-tipo.

17. OBSERVACIONES HIDRODINÁMICAS POSTERIORES A LOS ENSAYOS

En la figura 17.1 se representa la evolución del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-S2, durante los ensayos y hasta octubre de 2007.

Se advierte, en primer lugar, que el descenso en el nivel por efecto de los bombeos va acompañado de un incremento en la temperatura del agua de hasta 0,3 °C.

El efecto del bombeo escalonado del 25-10-2006 en el sondeo S-4, distante 171 m del punto de observación, apenas es perceptible.

Los días 7 y 8 de noviembre de 2006 hubo en el área precipitaciones importantes, del orden de 100 mm según el control que se lleva a cabo en la finca Los Alamos, que han producido una subida de nivel de más de un metro, ya sea por infiltración directa o por causa del cese de los bombeos para riego en esos días y otros posteriores.

El mencionado episodio de precipitaciones intensas tuvo como consecuencia, según los testimonios recogidos, la generación de flujo superficial abundante en el cauce principal. Aunque no duró mucho la generación de escorrentía, el agua alcanzó los sondeos, aparentemente sin dañarlos.

Durante los meses de diciembre de 2006 a enero de 2007 se ha observado flujo a lo largo del cauce, aunque de escasa magnitud (del orden de la decena de litros por segundo), en el entorno de las perforaciones. Esta situación ya no aparecía a mediados de marzo, en donde el único flujo correspondía al vertido de las aguas residuales de Benamocarra, el cual desaparece a poca distancia aguas abajo tras formar unos remansos.

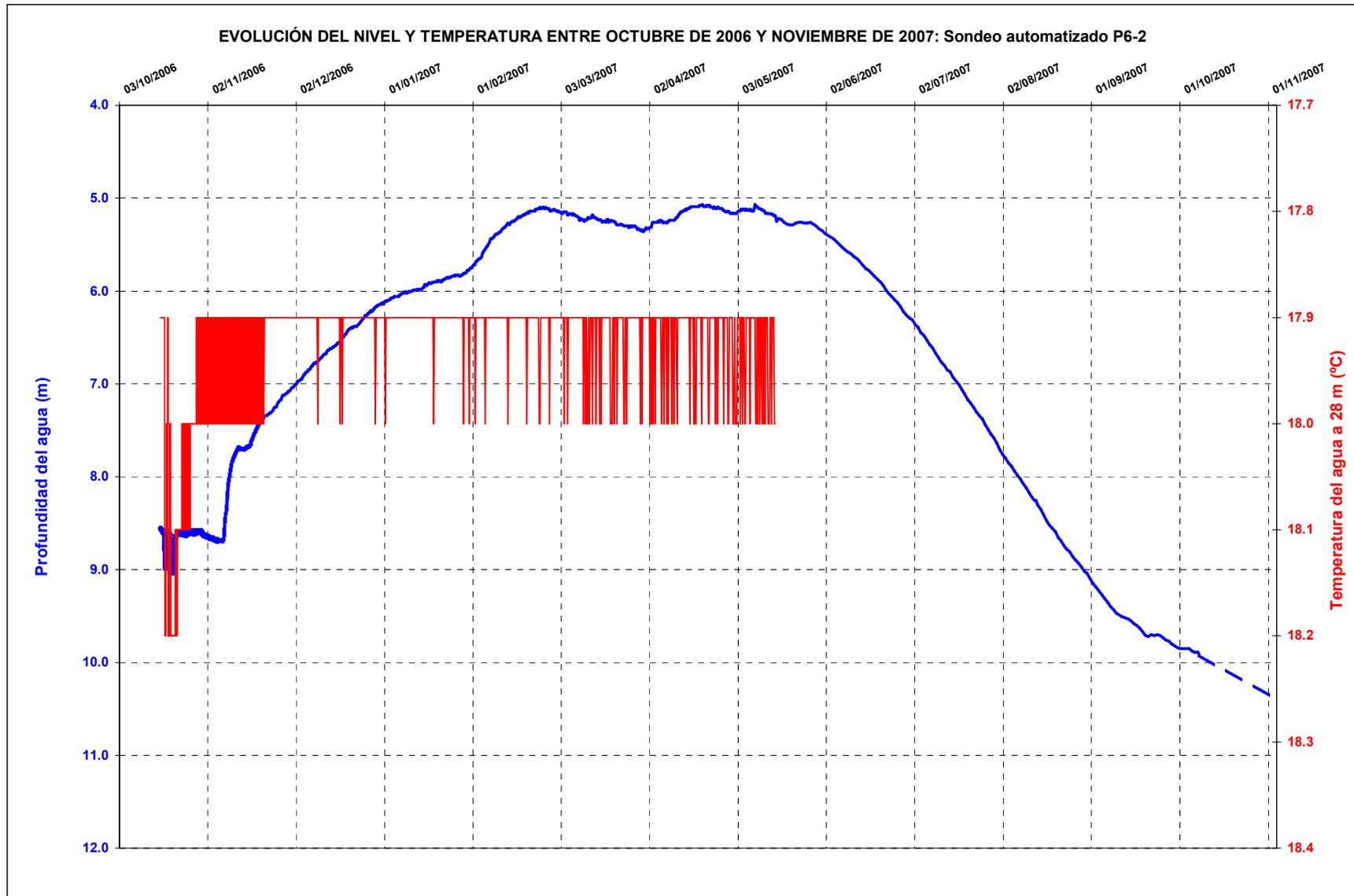


Figura 17.1. Evolución del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-2.

El 22 de marzo de 2007 se midió el nivel en las perforaciones. Respecto a la situación inmediatamente antes de los ensayos (principios de octubre de 2006) se detectaba un ascenso generalizado del nivel freático: 2,2 m (S-3), 2,6 m (S-1 y S-2), 3,4 m (punto A), 3,6 m (S-4) y 3,9 m (punto P6-S1). La conductividad era de aproximadamente 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la temperatura de 18 °C a 19°C.

Otra serie de medidas de nivel se llevaron a cabo en diferentes puntos de acuífero el 30 de junio de 2007. En la tabla 17.1 se incluyen los datos obtenidos y se comparan con los registrados tres meses antes. Se comprueba que, en el entorno de las perforaciones, los niveles han descendido entre 0,9 m (S-4) y casi 2 m (P6-S1). En sectores a menor altitud del acuífero el descenso es menor: entre 0,2 y 0,3 m en la mayoría de los puntos controlados. La situación de estos puntos se incluye en la figura 17.2. Durante julio y agosto los niveles han continuado experimentando descensos; en el entorno de las perforaciones ha sido de unos 3 m. A principios de octubre de 2007, el nivel en el punto P6-S2 se encontraba a casi 10 m de profundidad (9,92 m el 8-10-2007), lo que representa un descenso del orden de 5 m respecto a la situación de niveles altos y una bajada general de algo más de un metro a lo largo del año hidrológico 2006-2007 en el sector considerado.

Tabla 17.1. Medidas de nivel en marzo y junio de 2007 y diferencias.

PUNTO	SECTOR	PROF NIVEL (m) 23/03/2007	PROF NIVEL (m) 30/06/2007	DIFERENCIAS NIVELES (23/03-30/06)
G6-22	B	5.12*	5.02*	0.10
H6-1-1	B	5.47*	5.42*	0.05
S 1	B	3.62	4.66	-1.04
S 2	B	3.99	5.03	-1.04
S 3	B	3.47	4.47	-1.00
S 4	B	4.58	5.47	-0.89
P6-S1	B	4.58	6.44	-1.86
POZO A	B	5.6*	7.62*	-2.02
S-152	C	0.97	1.23	-0.26
IGME-2	C(I)	1.49	1.73	-0.24
IGME-3	C(I)	0.17	0.44	-0.27
Pz-Di	C(I)	2.55	2.84	-0.29
Pz-B	C(S)	1.98	2.26	-0.28
H6-17-1	C(S)	3.01*	3.28*	-0.27

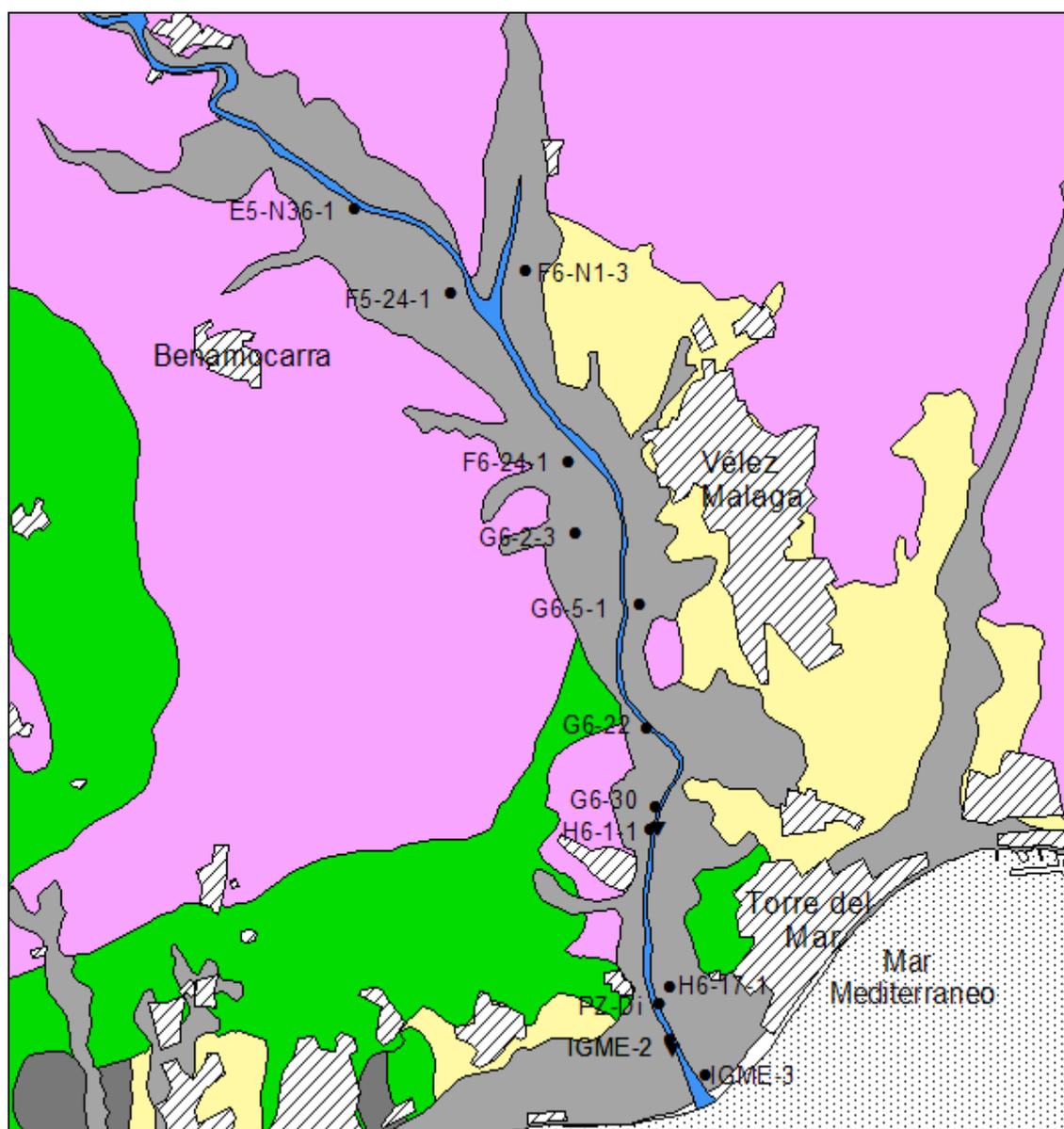


Figura 17.2. Localización de puntos de control piezométrico y de calidad.

Aguas abajo de Vélez Málaga el nivel freático del acuífero intersecta con la topografía a nivel del cauce del río Vélez. Esto produce una descarga difusa, fácilmente apreciable en tanto que el río suele discurrir sin flujo por ese sector. Así, salvo en periodos de avenidas o de desembalses importantes, el caudal del río entre Vélez Málaga y el mar es prácticamente en su totalidad de procedencia subterránea, como se desprende, entre otros aspectos, de la muy escasa turbidez del agua que circula. Esta descarga es particularmente destacable en el tramo denominado “sotos del río”, donde el flujo de agua da sustento a una densa vegetación de ribera. Aguas abajo de este tramo debe existir percolación, pues la

tendencia general es a disminuir el caudal fluyente a medida que nos acercamos al mar.

La descarga de agua hacia el mar se ha podido comprobar, en el marco de nuestros controles de 2007, hasta mediados de junio. A finales de marzo el caudal en ese tramo podía superar los 100 L/s; más abajo, en el paraje de Vega de Mena, el caudal estaba entre 50 y 100 L/s; un kilómetro aproximadamente antes de la desembocadura, bajo el puente de la antigua N-340, el caudal estaba entre 10 y 30 L/s. Todas estas cifras corresponden a estimaciones. El día 30 de junio se hizo una campaña de aforos seriados en el río, utilizando para ello un medidor adaptado al sistema de integración, por lo que no se requería medir ni secciones ni velocidades sino añadir al agua del río una pequeña cantidad de sal comercial. Así se pudo medir con fiabilidad el caudal en el tramo de Los Sotos (25 L/s) y en el paraje de Vega de Mena (12,5 L/s). Más abajo, junto al puente de la antigua N-340, el flujo era imperceptible.

En el anexo fotográfico pueden observarse los caudales circulantes en distintas del río. Asimismo se presentan fotografías de julio de 2004 y mayo de 2007, ésta última fecha correspondiente a un año más seco.

18. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Los días 22 y 23 de marzo de 2007 se realizó un muestreo en diferentes puntos del acuífero, complementado con dos muestras de agua del río y otra tomada en una conducción para riego procedente del embalse de La Viñuela. Además de la toma de muestras, se procedió a medir “in situ” la temperatura, el pH, el Eh, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto (contenido y porcentaje de saturación). En laboratorio (equipos del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga) y con escasa demora se determinaron los constituyentes mayoritarios disueltos, así como los minoritarios K^+ , F^- y especies nitrogenadas (nitratos, nitritos y amonio) y el TOC.

En la tabla 18.1 se presentan los resultados obtenidos, junto con los valores máximo, mínimo y medio para cada variable, distinguiéndose las aguas superficiales de las subterráneas (aunque el agua fluyente por el río, según se ha citado anteriormente, corresponde al drenaje del acuífero).

Los diagramas hidroquímicos de las figuras 18.1 y 18.2 ponen de manifiesto que, con la excepción del agua contenida en el piezómetro Pz-Di, todas las muestras presentan una gran homogeneidad en su composición, de tipo bicarbonatado cálcico aunque con contenidos relativamente altos en sulfatos y magnesio. Este tipo de agua es el mismo que caracteriza a la del embalse de La Viñuela, utilizada para riego, aunque con mayor mineralización debido al efecto del flujo subterráneo.

La composición anómala en el piezómetro Pz-Di responde a un efecto de carácter muy localizado, que se interpreta como consecuencia de un ambiente reductor que afecta a los contenidos de ciertas especies abundantes (sulfatos y nitratos), lo que se corrobora por valores mínimos de oxígeno disuelto y del Eh. Puede haber también precipitación asociada de $CaCO_3$. Los valores bajos de conductividad apuntan asimismo a una posible mezcla con aguas procedentes de La Viñuela (¿aguas residuales urbanas?).

En lo relativo a constituyentes minoritarios, hay que destacar los elevados contenidos de nitratos que se desprenden del muestreo. Esta circunstancia era ya conocida a partir de estudios previos y tiene su origen en las actividades agrícolas (fertilización) y en la eventual infiltración de aguas residuales urbanas.

En el agua de La Viñuela la concentración de nitratos es inferior a 5 ppm, pero en el acuífero la media es de 50 ppm aproximadamente, con un valor máximo de 100 ppm. Los contenidos en nitratos del agua del río en los dos puntos en que se ha muestreado (entre 40 y 40 ppm) denotan su procedencia subterránea.

En general, los contenidos de nitratos resultan algo inferiores a los obtenidos en muestreos precedentes. El valor mínimo, de menos de 1 ppm, se ha registrado en un punto (piezómetro Pz-Di) donde, según ha sido ya comentado, se sospecha que existen procesos redox locales tendentes a eliminar del agua subterránea especies de azufre y nitrógeno en estado oxidado.

En la figura 18.3 se presenta la variación espacial del contenido en nitratos del acuífero. Los valores más altos se localizan en la vega de Vélez Málaga y seguramente reflejan procesos de recirculación de aguas bombadas para riego. En la zona del delta se advierte una tendencia a valores decrecientes, que puede ir asociada a procesos naturales de desnitrificación.

Tabla 18.1. Resultados de la campaña de muestreo de marzo de 2007 en aguas subterráneas y superficiales.

PUNTO	Sector	Prof. (m)	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	Eh (mV)	O ₂ mg/l	%O ₂ sat.	TOC (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)
E5-N36-1	A	B	873	20.0	7.3	86.5	6.8	76.6	1,40	43.2	1.8	114.5	37.2		47.4		336.7	118.2	48.4	0.4
F5-24-1	A	B	870	19.9	7.8	122.8	8.5	91.5	1,84	40.8	2.2	118.6	35.3		48.7		319.0	121.5	50.4	0.3
F6-N1-3	A	B	707	18.6	7.5	82.2	7.0	74.8	0,37	39.2	2.3	84.7	27.9		15.9		294.2	80.5	36.7	0.3
F6-24-1	B	B	1021	19.3	7.3	77.6	7.2	79.4	0,33	47.4	1.1	131.7	41.6		60.5		378.9	145.3	55.2	0.4
G6-22	B	B	912	18.8	7.4	95.0	6.9	75.3	0,29	45.2	2.1	116.6	36.3		42.8		339.0	127.0	50.9	0.3
G6-2-3	B	B	1158	20.0	7.2	90.0	5.4	59.9	2,19	50.4	2.4	148.5	51.0		100.3		385.7	170.2	67.6	0.4
G6-30	B	B	1015	19.0	7.2	82.7	3.7	40.0	0,45	49.3	2.4	129.9	39.9		51.4		364.9	145.7	55.7	0.3
G6-5-1	B	B	1391	19.8	7.1	103.4	3.9	43.3	0,59	86.6	5.7	168.7	55.0		79.1		483.2	269.1	81.7	0.3
H6-1-1	B	B	1025	18.5	7.3	94.6	5.1	54.6	1,40	51.2	3.1	130.0	40.4		51.2		377.4	152.3	59.8	0.3
H6-17-1	C(S)	B	1011	17.8	7.6	99.3	9.4	98.4	0,37	50.7	2.1	128.7	40.3	0.2	50.2		347.3	150.7	57.9	0.3
IGME-2	C(l)	25	1161	18.1	7.4	116.8	2.2	22.3	5,35	62.5	7.4	128.1	54.8		49.8	0.1	382.2	194.8	84.7	0.3
IGME-3	C(l)	25	1190	19.4	7.7	145.1	1.6	17.7	3,40	86.5	8.4	107.8	57.0		10.9	0.1	373.7	203.0	101.1	0.3
Pz-Di	C(l)	15	650	18.0	8.7	-70.8	2.0	21.4	8,57	60.8	7.3	8.0	50.2	1.9	0.7		243.8	35.7	72.4	0.1
Pz-Di	C(l)	30	1080	18.0	7.3	35.5	3.1	32.3	5,34	52.8	4.6	133.3	45.6		58.4		377.4	166.7	67.3	0.3
MEDIA			1005	18.9	7.5	82.9	5.2	56.3	0.0	54.8	3.8	117.8	43.7	1.0	47.7	0.1	357.4	148.6	63.6	0.3
MAX			1391	20.0	8.7	145.1	9.4	98.4	0.0	86.6	8.4	168.7	57.0	1.9	100.3	0.1	483.2	269.1	101.1	0.4
MIN			650	17.8	7.1	-70.8	1.6	17.7	0.0	39.2	1.1	8.0	27.9	0.2	0.7	0.1	243.8	35.7	36.7	0.1

PUNTO	Sector	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	Eh (mV)	O ₂ mg/l	%O ₂ sat.	TOC (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)
VIÑUELA	A	465	14.9	8.4	113.9	9.1	90.8	2.9	26.6	3.3	56.7	19.4		4.3		192.0	58.5	26.4	0.4
RIO (H6-1-1)	B	985	13.9	8.3	64.8	15.0	150.0	0,66	52.8	1.5	118.6	40.6		49.2	0.2	316.4	149.0	57.6	0.3
RIO (IGME-2)	C	1010	13.4	7.8	133.2	11.6	125.0	1,61	60.7	2.6	111.8	43.1		43.4	0.3	307.0	174.5	68.1	0.3

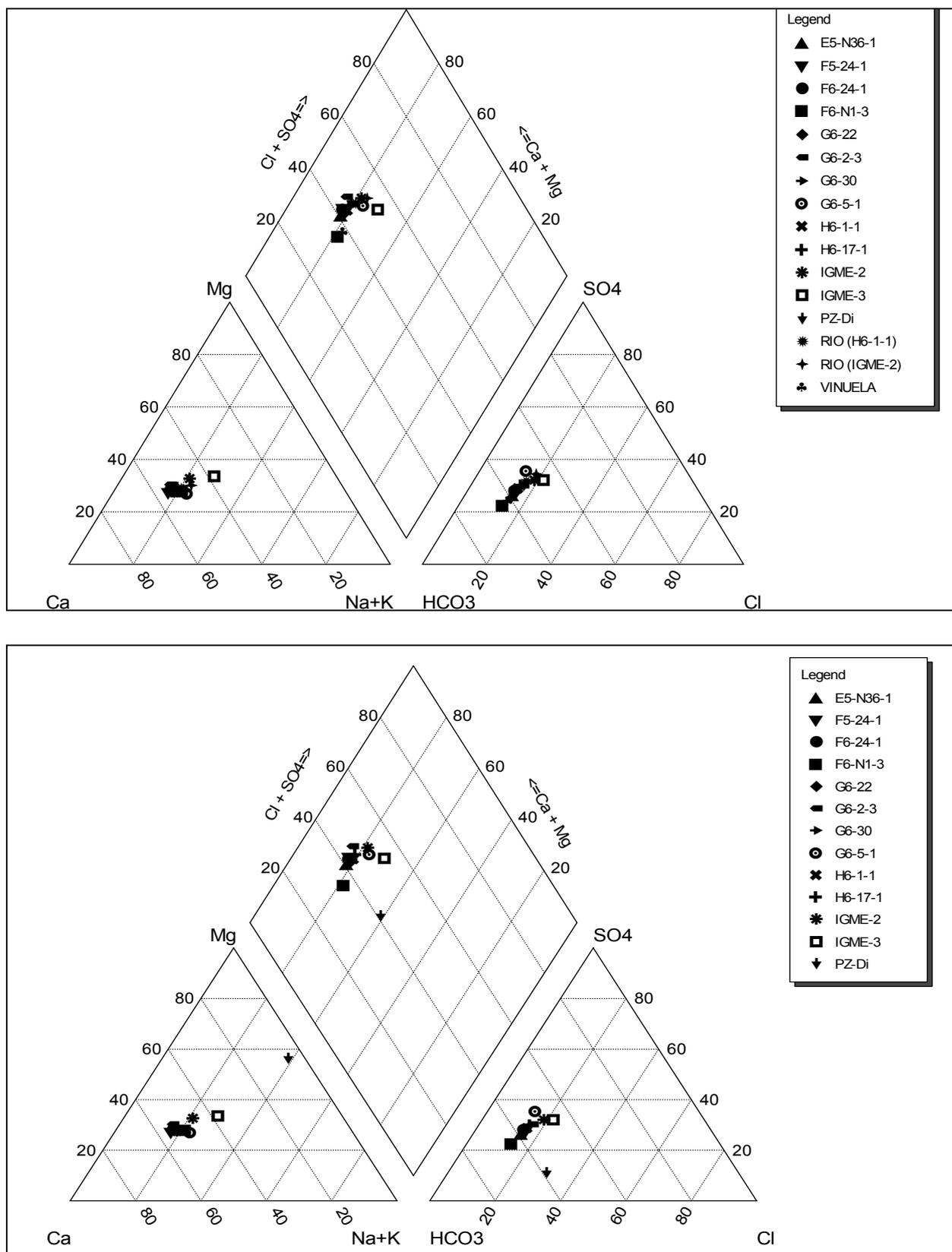


Figura 18.1. Diagramas hidroquímicos de Piper (marzo de 2007), con todos los puntos muestreados (arriba) e incluyendo sólo los correspondientes a aguas subterráneas (abajo).

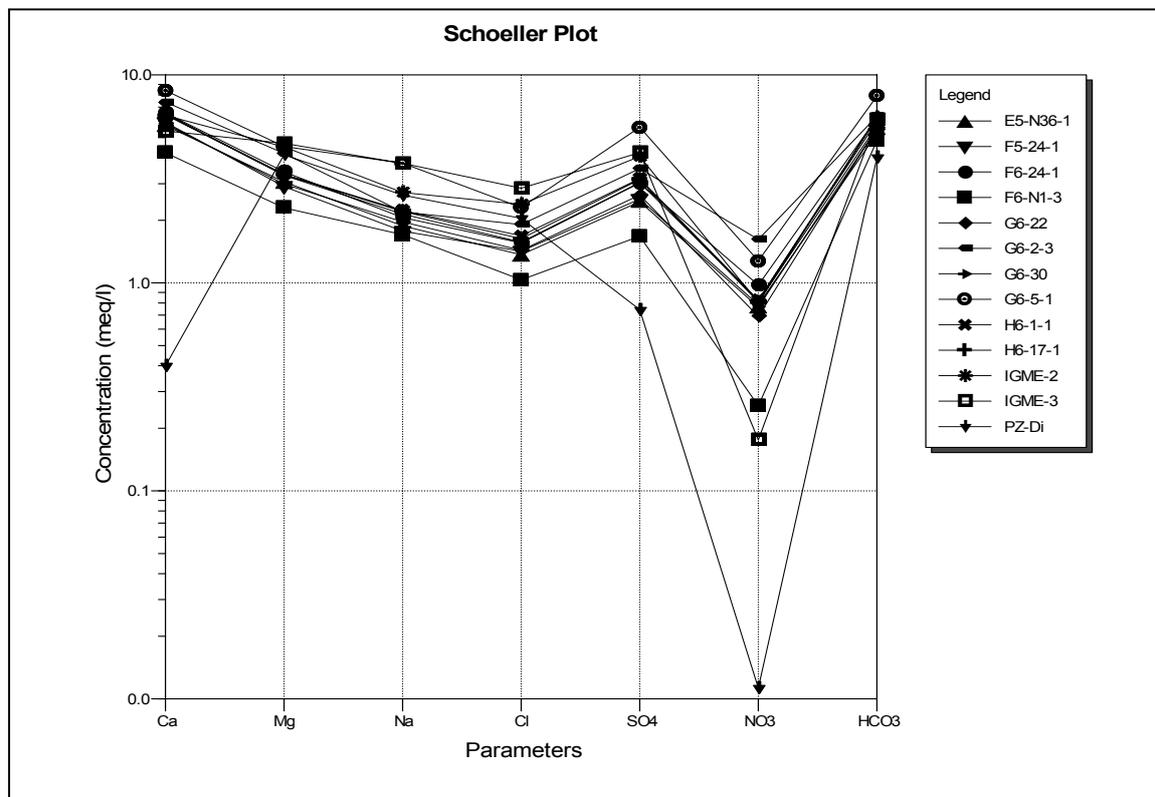
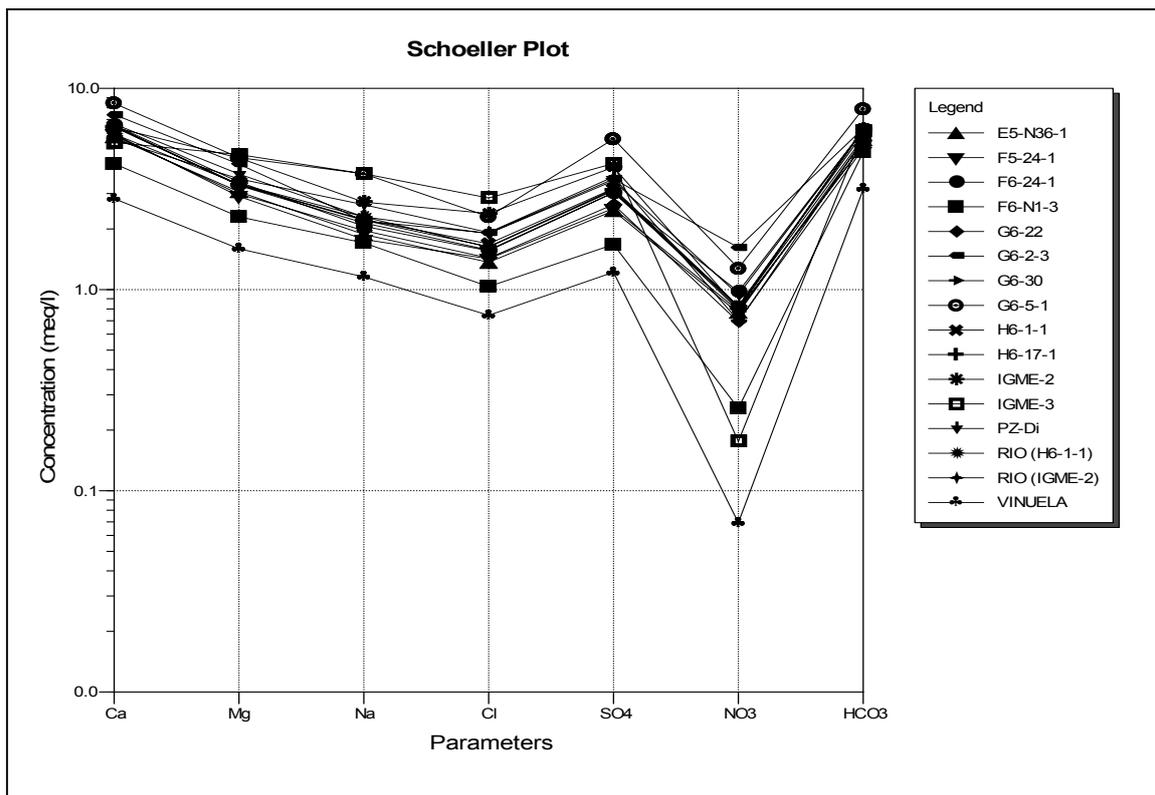


Figura 18.2. Diagramas hidroquímicos de Shoeller (marzo de 2007), con todos los puntos muestreados (arriba) e incluyendo sólo los correspondientes a aguas subterráneas (abajo).

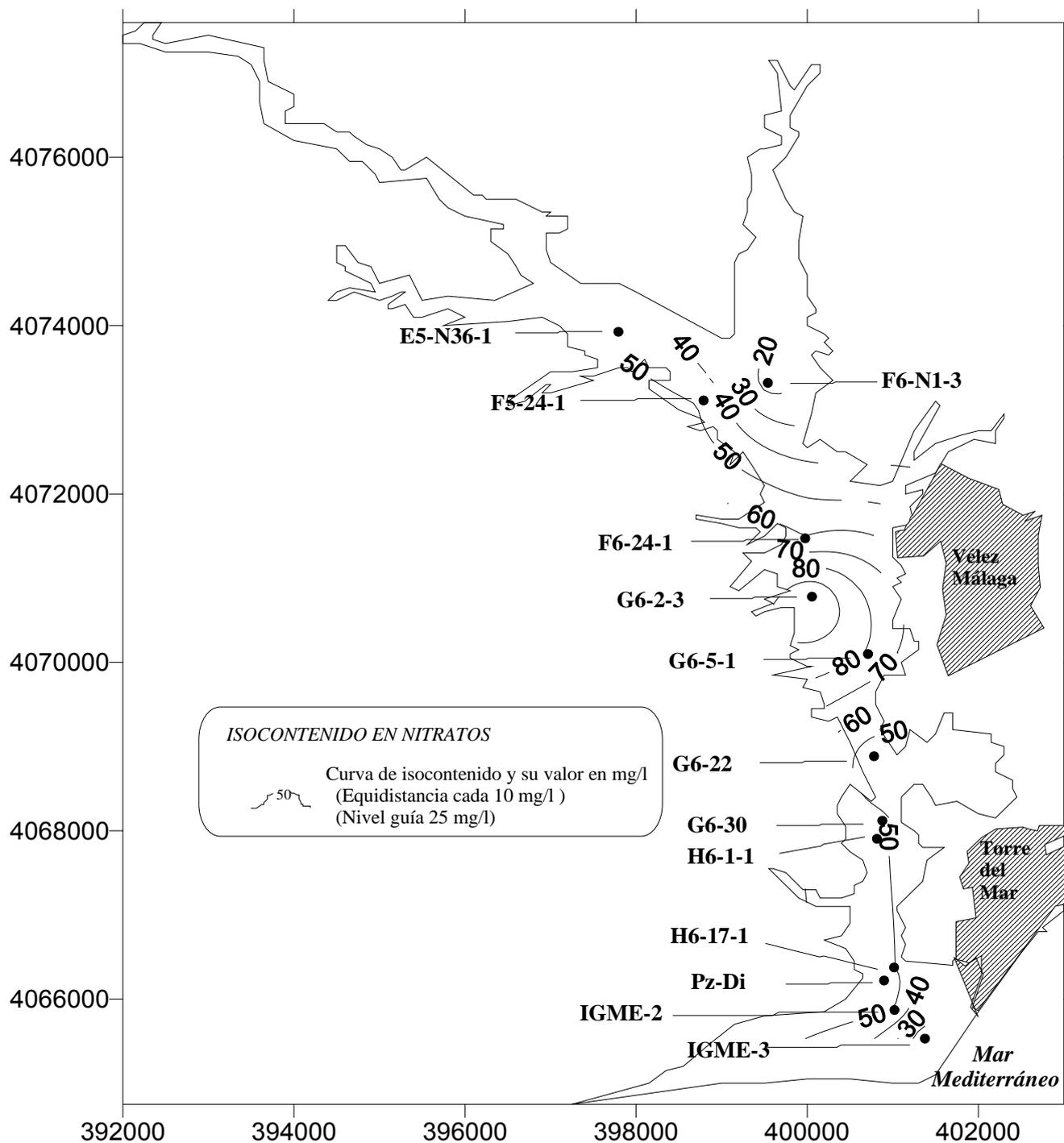


Figura 18.3. Mapa de isocontenidos en nitratos en las aguas subterráneas en marzo de 2007.

19. ESTADO ACTUAL DE LA INTRUSIÓN EN EL ACUÍFERO

Durante algunos años de las décadas de los ochenta y noventa del pasado siglo la concentración de bombeos en el sector costero ha provocado la salinización de numerosas captaciones debido al progreso de la intrusión marina. Este fenómeno consiste básicamente en la alteración del régimen de flujo subterráneo en áreas costeras inducido por una distribución espacial incorrecta o por un régimen de bombeo inadecuado de las captaciones, de tal manera que se modifica la posición de la zona de transición agua de mar-agua dulce que provoca una entrada de agua salada o salobre hacia sectores más interiores del acuífero.

En el acuífero superior, debido a su reducido espesor, los registros verticales de conductividad eléctrica efectuados con ocasión de estudios hidrogeológicos previos no han evidenciado la existencia de agua salada. Las aguas de este tramo han presentado salinidades moderadas (entre 2 y 3 g/l), si bien en la margen derecha, durante el periodo 1993-1995, se registraron mayores salinidades (5-6 g/l) probablemente relacionadas con el bombeo en una zona más permeable (gravas).

En el acuífero profundo, las testificaciones de conductividad realizadas entre finales de los años ochenta y mediados de los noventa permitieron observar claramente la zona de transición agua dulce-agua salada. El punto que ha permitido un seguimiento más fiable a este respecto es el piezómetro IGME-2, de 42 m de profundidad, situado en la margen derecha del cauce del río Vélez a unos 700 m de la desembocadura (figura 19.1). Aquí se registraron en 1993 y 1994 valores de 4 mS/cm en la parte superior de la columna, con incremento progresivo con la profundidad hasta valores típicamente marinos (algo superiores a 40 mS/cm) a 35-40 m. Las importantes precipitaciones que tuvieron lugar a principios de 1996 provocaron –como consecuencia de los desembalses en La Viñuela y la reducción de los bombeos- una significativa mejora de la calidad del agua y un proceso de extrusión marina: desde 4 mS/cm en la parte superior de la columna hasta 20 mS/cm a 40 m. Esta disminución de la salinidad continuó progresando y los registros realizados en marzo de 1997 mostraron valores de conductividad inferiores a 2000 μ S/cm en toda la columna. Esta situación de extrusión marina y recuperación de la calidad de las aguas del acuífero inferior se mantiene

actualmente y es verosímilmente el resultado de la reducción de la explotación. Así, las medidas efectuadas en este punto a mediados de marzo de 2007 han puesto de manifiesto una notable homogeneidad en los valores de conductividad registrados a lo largo de toda la columna: entre 1040 y 1235 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lo mismo se ha evidenciado en el piezómetro IGME-3, de 50 m de profundidad, situado en la margen izquierda del cauce del río Vélez a unos 400 m de la desembocadura, donde en las fechas antes mencionadas se han registrado valores igualmente homogéneos: entre 897 y 1237 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

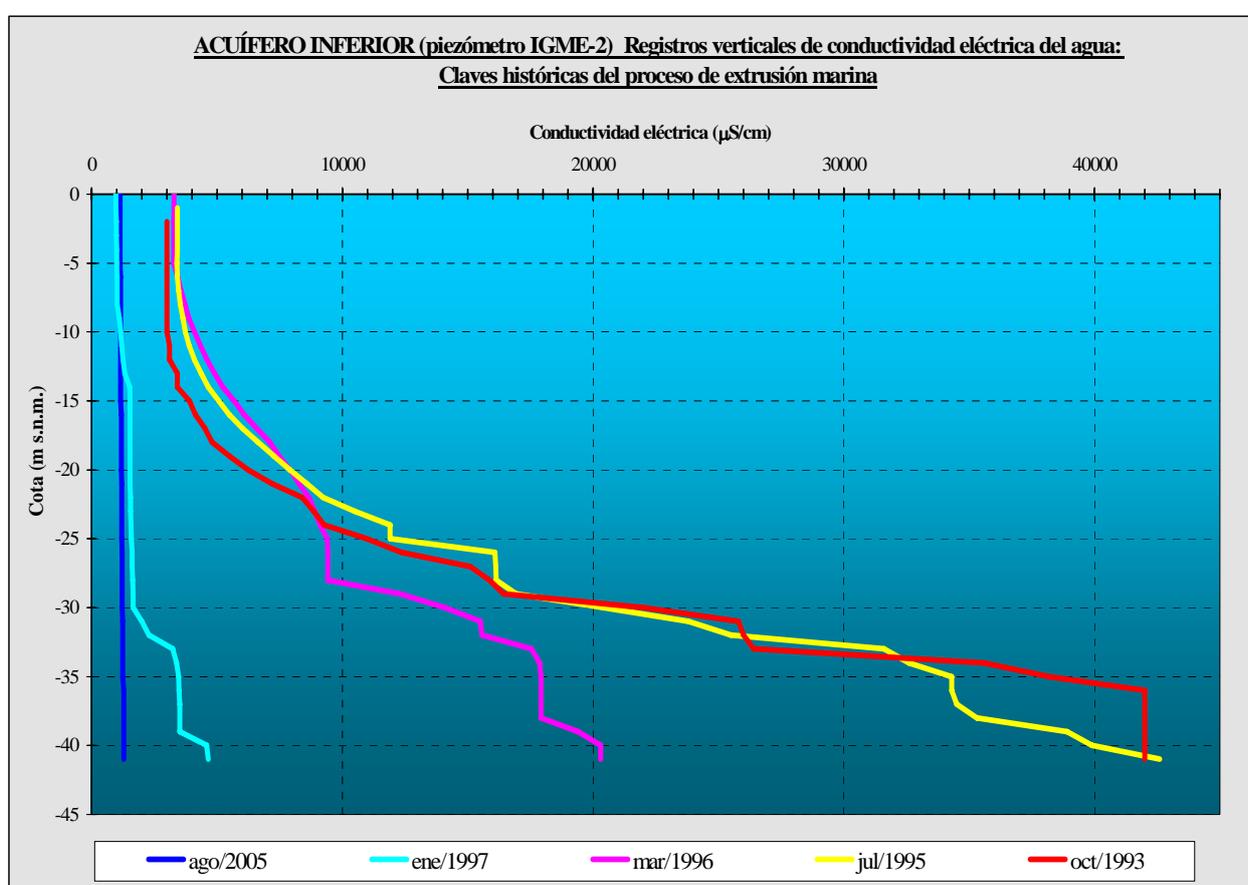


Figura 19.1. Registros verticales de conductividad eléctrica en el piezómetro IGME-2.

Los valores medios de conductividad a mediados de marzo de 2007 obtenidos en los piezómetros IGME-2 e IGME-3 son de aproximadamente 1150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tablas 19.1 y 19.2).

Tabla 19.1. Registros de conductividad y temperatura en el piezómetro IGME-2.

IGME 2				
	22-03-2007		30-06-2007	
Prof. (m)	C.E. (µs/cm)	T (°C)	C.E. (µs/cm)	T (°C)
2.5	1040	18		
5	1054	18.5	1058	19.5
7.5	1063	18.9		
10	1066	19.3	1080	19.3
12.5	1114	19.4		
15	1159	19.2	1145	19.2
17.5	1172	19.1		
20	1180	19.1	1175	19.2
22.5	1184	19.1		
25	1197	19.1	1183	19
27.5	1190	19		
30	1189	19.1	1176	19
32.5	1189	19.1		
35	1189	19	1178	19
37.5	1208	18.9		
40	1234	18.9	1225	18.3
42.5	1235	18.8		
45	1235	19	1225	18.9
MEDIA	1161	19.0	1167	19
MAX	1235	19.4	1225	19.5
MIN	1040	18.0	1058	18.3

Tabla 19.2. Registros de conductividad y temperatura en el piezómetro IGME-3.

	22-03-2007		30-06-2007	
	IGME 3		IGME 3	
Prof. (m)	C.E. (µs/cm)	T (°C)	C.E. (µs/cm)	T (°C)
2.5	897	16.3		
5	901	17.4	895	20
7.5	903	18.7		
10	903	19.4	903	19.8
12.5	1228	19.8		
15	1229	19.6	1226	19.5
17.5	1229	19.4		
20	1229	19.3	1229	19.3
22.5	1229	19.3		
25	1229	19.2	1230	19.1
27.5	1230	19.1		
30	1230	19.1	1230	19.1
32.5	1229	19		
35	1229	19.1	1238	19.1
37.5	1237	19		
40	1237	19	1238	19.1
42.5	1237	18.9		
45	1236	19	1237	19
47,5	1236	18.9		
50	1237	18.9	1238	19
MEDIA	1169	18.9	1166	19.3
MAX	1237	19.8	1238	20
MIN	897	16.3	895	19

En dos secciones del río Vélez (una a la altura de la autovía y otra frente al punto IGME-2) se han medido en esas fechas valores de 985 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de 1010 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Se trataba exclusivamente de caudal (entre 50 y 150 L/s) procedente de descarga subterránea, según se ha dicho anteriormente, pues aguas arriba de Vélez-Málaga el cauce permanecía en seco.

También se ha medido la conductividad del agua bombeada en una decena de captaciones a lo largo del acuífero, en su mayoría utilizadas para riego. Se han obtenido valores entre 707 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1391 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (570 mg/L y 1110 mg/L). El agua de La Viñuela utilizada para riego tenía conductividad de 465 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores más bajos de conductividad en las aguas bombeadas, inferiores a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se registran en el sector de confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa. La conductividad aumenta aguas abajo hasta valores de alrededor de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el tramo entre la autovía y la antigua carretera N-340, es decir, parecidos a los del agua circulante por el cauce en ese tramo. Luego se incrementa ligeramente en el tramo final, hasta el borde costero, según se ha comentado en el caso de los piezómetros IGME 2 y 3. En algún piezómetro de este sector que, como los dos antes citados, capta el acuífero inferior, se han medido valores de conductividad anormalmente bajos (650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el Pz-Di), cuyas causas han sido antes apuntadas.

En la figura 19.2 se representa la variación espacial de la conductividad a lo largo del acuífero. El que el valor más alto de conductividad (unos 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se haya medido en un punto de la vega en las inmediaciones de Vélez-Málaga debe responder a efectos locales de recirculación de aguas bombeadas.

En la tabla 19.3 se comparan valores de conductividad medidos “in situ” en los mismos puntos en dos fechas diferentes: finales de marzo y finales de junio de 2007. Se constata que la tendencia general es hacia un aumento pequeño de salinidad, en correspondencia con la bajada general de nivel en el acuífero que, como ya se ha visto, caracteriza a ese intervalo de tiempo.

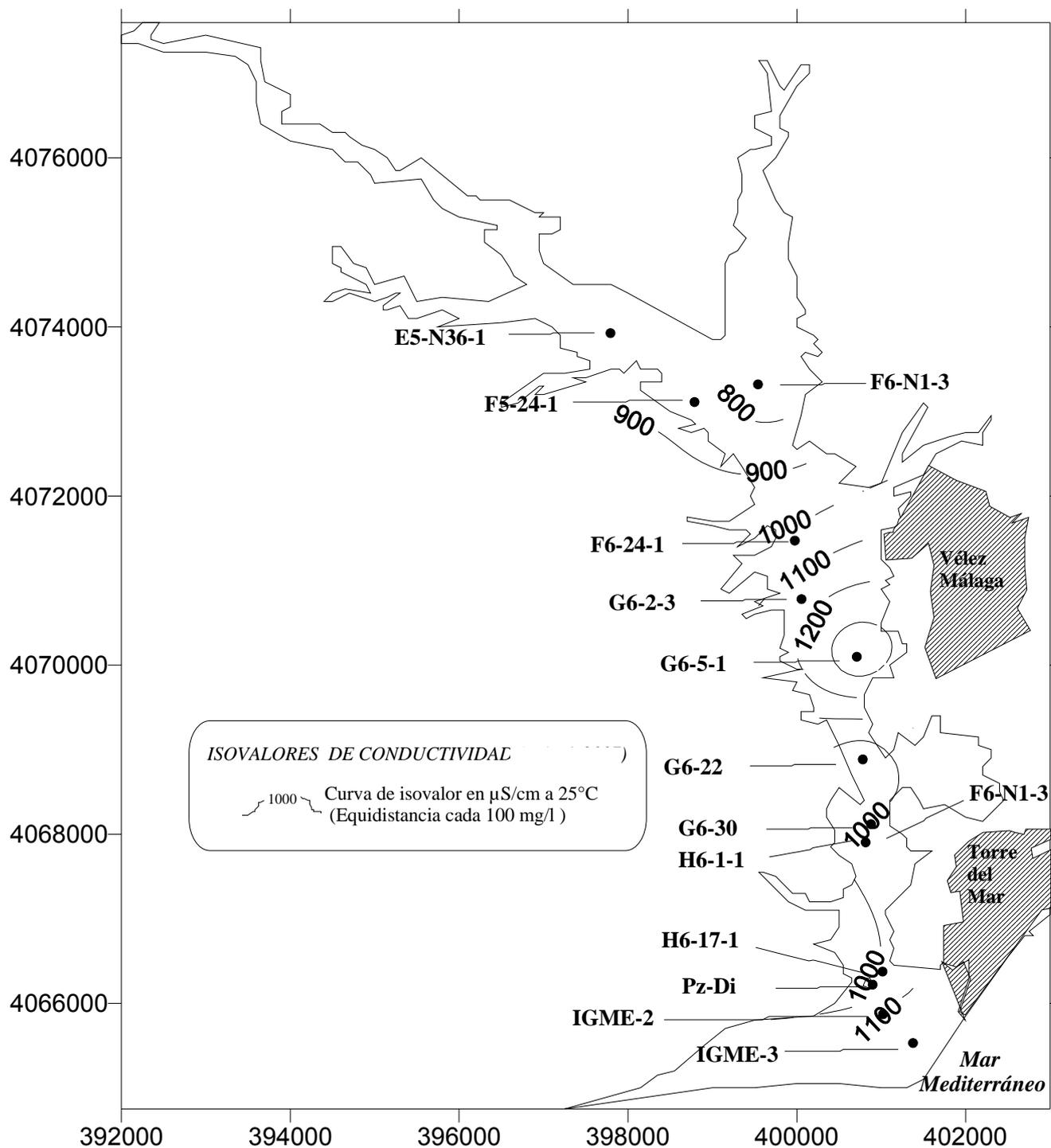


Figura 19.2. Mapa de isovalores de conductividad del acuífero (marzo de 2007).

Tabla 19.3. Medidas de conductividad eléctrica en marzo y junio de 2007 y diferencias.

PUNTO	SECTOR	23/03/2007		30/06/2007		DIFERENCIAS C.E. 23/03-30/06
		Prof. (m)	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Prof. (m)	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
F6-24-1	B	B	1021	8	1040	-19
G6-22	B	B	912	7	1033	-121
H6-1-1	B	B	1025	7	1086	-61
RIO (H6-1-1)	B		985		1031	-46
IGME-2	C(l)	25	1161	25	1167.1	-6.1
IGME-3	C(l)	25	1169	25	1166.4	2.6
Pz Di	C(l)	15	650	5	656	-6
H6-17-1	C(S)	B	1011	5	1192	-181

Por último, el 16 de julio de 2007 se realizó un perfil geoelectrico (tomografía eléctrica) de unos 450 m de longitud, paralelo al cauce del río Vélez en el sector próximo a su desembocadura, aunque desplazado unos 50-100 m hacia su margen izquierda. El extremo sur del perfil se localiza a unos 100 m del mar. En la figura 19.3 se presenta el resultado. Se advierte, entre otros aspectos, la presencia de una lengua de resistividad baja correspondiente a agua salada dentro del acuífero. Su espesor es de unos 20 m (entre 10 y 30 m bajo el nivel del mar) y su máxima penetración tierra adentro desde el mar en el perfil es de aproximadamente 200 m.

A la vista de todos los resultados anteriores debe destacarse la ausencia de indicios significativos de salinización por intrusión marina en las fechas del muestreo.

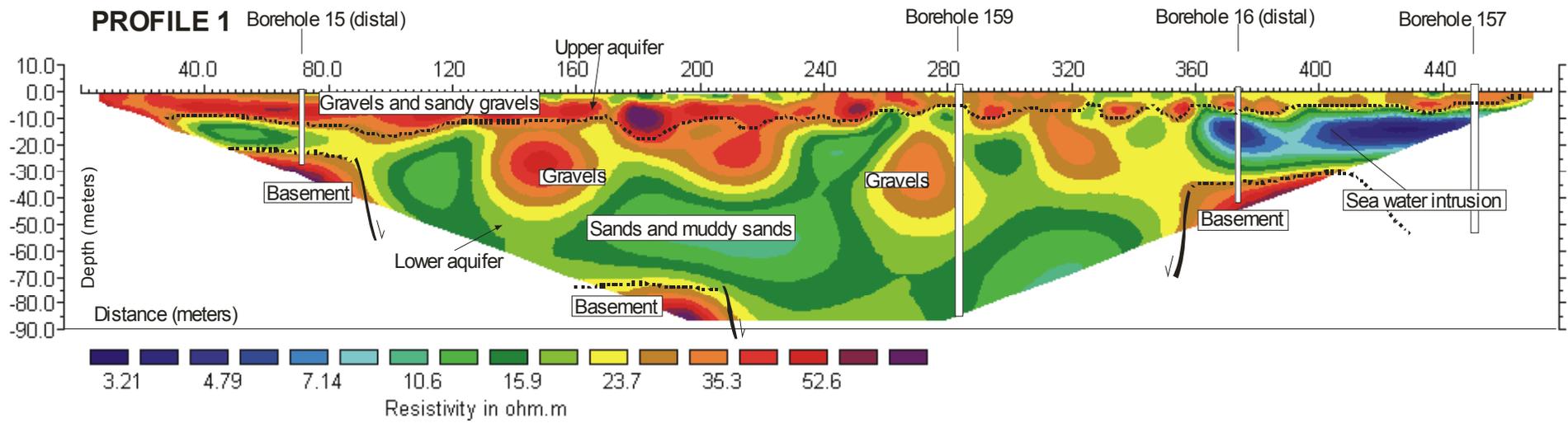


Figura 19.3. Perfil geoelectrico paralelo al río en delta (julio de 2007).

20. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL DE EXPLOTACIÓN PLANTEADO

20.1. Balances generales del acuífero y datos experimentales previos

El funcionamiento del acuífero puede explicarse por un balance de entradas y salidas. En condiciones medias, se establece en el “Atlas Hidrogeológico de Andalucía” (JA-ITGE,1988) que los recursos del acuífero son 33 hm³/año, de los que la mayor parte (28 hm³/año, es decir, el 85 % del total de la recarga) corresponden a la alimentación procedente de aguas superficiales: ríos Vélez y Benamargosa. El que la recarga del acuífero dependa mayoritariamente de los caudales fluyentes por los cauces principales motiva que la gestión de los desembalses de la presa de la Viñuela tiene una importancia capital en el funcionamiento del acuífero.

Según la fuente citada, las salidas se producen por bombeo: 27-43 hm³/año (y se especifica que “con tendencia a aumentar”). Estas cifras implican, en ocasiones, un desequilibrio deficitario que se compensa con la entrada de agua del mar (intrusión marina).

En las circunstancias actuales, aunque se carece de estimaciones al respecto, es razonable suponer que la magnitud de los recursos medios del acuífero puede verse disminuida respecto a la cifra anterior, debido al efecto derivado de la modulación inducida por el funcionamiento de La Viñuela en el régimen de caudales del río Vélez.

En cuanto a las salidas del acuífero en las condiciones actuales, no hay datos directos sobre su nivel de explotación, aunque se considera que se produce casi exclusivamente con fines de regadío en la margen derecha, junto con caudales procedentes de La Viñuela. A partir de la superficie ocupada por riegos, de la dotación estimada para éstos y admitiendo que la mitad del agua aplicada procede del acuífero, se obtiene un valor de aproximadamente 16 hm³/año de bombeo actual, que, aunque tentativo, es inferior al rango de cifras antes apuntadas. Esta circunstancia de menor grado de explotación puede verse apoyada por el hecho de que, en los últimos años, los niveles piezométricos experimentan menos descensos

en su ciclo anual que en años precedentes. A nivel de balance en condiciones de año medio, la consecuencia de esa cifra de explotación sería el carácter excedentario del acuífero ($\leq 17 \text{ hm}^3/\text{año}$). Esta circunstancia se manifestaría, por un lado, en la descarga de caudales subterráneos ($\approx 3-6 \text{ hm}^3/\text{año}$) al propio cauce del río Vélez a poca distancia de su desembocadura. El resto ($\approx 11-14 \text{ hm}^3/\text{año}$) sería descarga subterránea al mar en sentido estricto. Esta circunstancia de descarga significativa hacia el mar se puede apoyar en los datos piezométricos y físico-químicos del sector deltáico del acuífero en los años recientes.

Con los datos de recarga del acuífero en condiciones de año medio ($33 \text{ hm}^3/\text{año}$, según JA-ITGE, 1988) y de salidas por bombeo que se estiman para la situación actual ($16 \text{ hm}^3/\text{año}$, pendiente de verificación), la explotación planteada de $6,5 \text{ hm}^3/\text{año}$ no modifica el carácter excedentario del acuífero en las condiciones citadas. Además, el escenario previsto para la mencionada explotación (riegos en la margen derecha) conlleva el que las captaciones reducirán sensiblemente, cuando no de manera total, su régimen de extracciones. Ello conduciría a un balance hídrico netamente excedentario, en el que las salidas subterráneas hacia el cauce del río en su tramo final y las producidas directamente hacia el mar serían superiores a las actuales.

En cualquier caso, resulta básico un estudio hidrogeológico detallado deseablemente apoyado por un modelo de flujo en régimen transitorio, herramienta de la que nunca se ha dispuesto en el acuífero- que permita evaluar el balance en las condiciones actuales, no sólo a nivel anual sino mensual. Esta herramienta permitiría, entre otros aspectos, cuantificar las citadas salidas subterráneas y los descensos piezométricos producidos por los bombeos, así como prever la evolución de niveles y caudales en distintas condiciones hidrometeorológicas, particularmente las adversas (periodos de sequía). Si el modelo planteado se extiende al transporte de solutos, lo cual es recomendable, las predicciones pueden extenderse a las variaciones espacio-temporales de la zona de mezcla agua dulce-agua marina y su incidencia en las captaciones.

En relación con lo anterior, conviene apuntar que –en climas mediterráneos como el que caracteriza el área- la representatividad de un balance hídrico en

condiciones medias puede ser cuestionable. Así, por ejemplo, García Arostegui (1997) encuentra que las entradas al acuífero en un año excepcionalmente lluvioso (1996/97) son muy superiores a las de un año que culminó una importante sequía (1994/95). En ese año lluvioso, además, la explotación por bombeo fue muy inferior a la media (unos 6 hm³/año), por lo que ese año el balance resultó en un desequilibrio excedentario en el que, como consecuencia, el almacenamiento del acuífero se incrementó en unos 40 hm³.

El mismo autor citado cuantificó en 16 hm³ las extracciones del acuífero en un periodo de cuatro meses de gran sequía (junio a septiembre de 1995), en el que no hubo caudales disponibles procedentes de La Viñuela. Esto supone una tasa de extracción de 4 hm³/mes. Si se considera nula la recarga en ese periodo, lo que parece bastante lógico, y se admite un valor del coeficiente de almacenamiento general de 0,2, entonces se obtiene un descenso a lo largo de toda la extensión del acuífero de unos 4 m. El registro disponible en el piezómetro P6-2, el más cercano a las perforaciones de AcuaMed, indica para ese periodo un descenso de 8,2 m, lo que corrobora la estimación anterior, puesto que a medida que se consideran sectores del acuífero más próximos al borde costero los descensos piezométricos generalizados tienden a ser nulos, de lo que se desprende un valor promedio semejante al de los 4 m indicado.

También hay información de extracciones en el periodo de agosto y septiembre de 1996: 3,8 hm³. Entonces el descenso en el P6-2 fue de 1,5 m. Este ritmo de extracción es superior al previsto de 6,5 hm³/año, incluso concentrando los bombeos en el periodo de seis meses de menor pluviosidad.

20.2. Modelización del ámbito de explotación

Se ha modelizado, mediante el programa Processing Modflow (para Windows), versión 5.3.0 de Chiang y Kinzelbach (1991-2001), una porción del acuífero de 8 km² de superficie, de planta rectangular con lados de 2 y 4 km (figura 20.1). De esa superficie, 5 km² corresponden a materiales aluviales acuíferos, aproximadamente la cuarta parte de su extensión total. No obstante, por sus características y situación, la parte modelizada del acuífero debe recibir una recarga relativamente más importante en relación con su superficie que las restantes.

La zona modelizada se ha seleccionado con el criterio de incluir las perforaciones de acuaMed y su entorno inmediato, así como otros posibles puntos de bombeo situados al noreste de tales perforaciones (sector del Molino de Las Monjas) o al sur de las mismas (vega de Vélez-Málaga). Además de los aluviones incluye materiales de los bordes y del sustrato del acuífero: 1,5 km² de esquistos impermeables y 1,5 km² de materiales pliocenos arcillo-arenosos, de permeabilidad baja a media (figura 20.1).

La malla del modelo tiene 40 columnas y 80 filas, con un tamaño de celda de 50m·50 m, con la excepción del sector de las perforaciones donde la malla se ha refinado y tiene un tamaño menor (figura 20.2). Sólo se ha considerado una capa acuífera, de carácter freático, sin anisotropía. Las cotas de techo y muro de acuífero introducidas en el modelo se han estimado a partir de un mapa de isoespesores de la tesis doctoral de García-Aróstegui (1998).

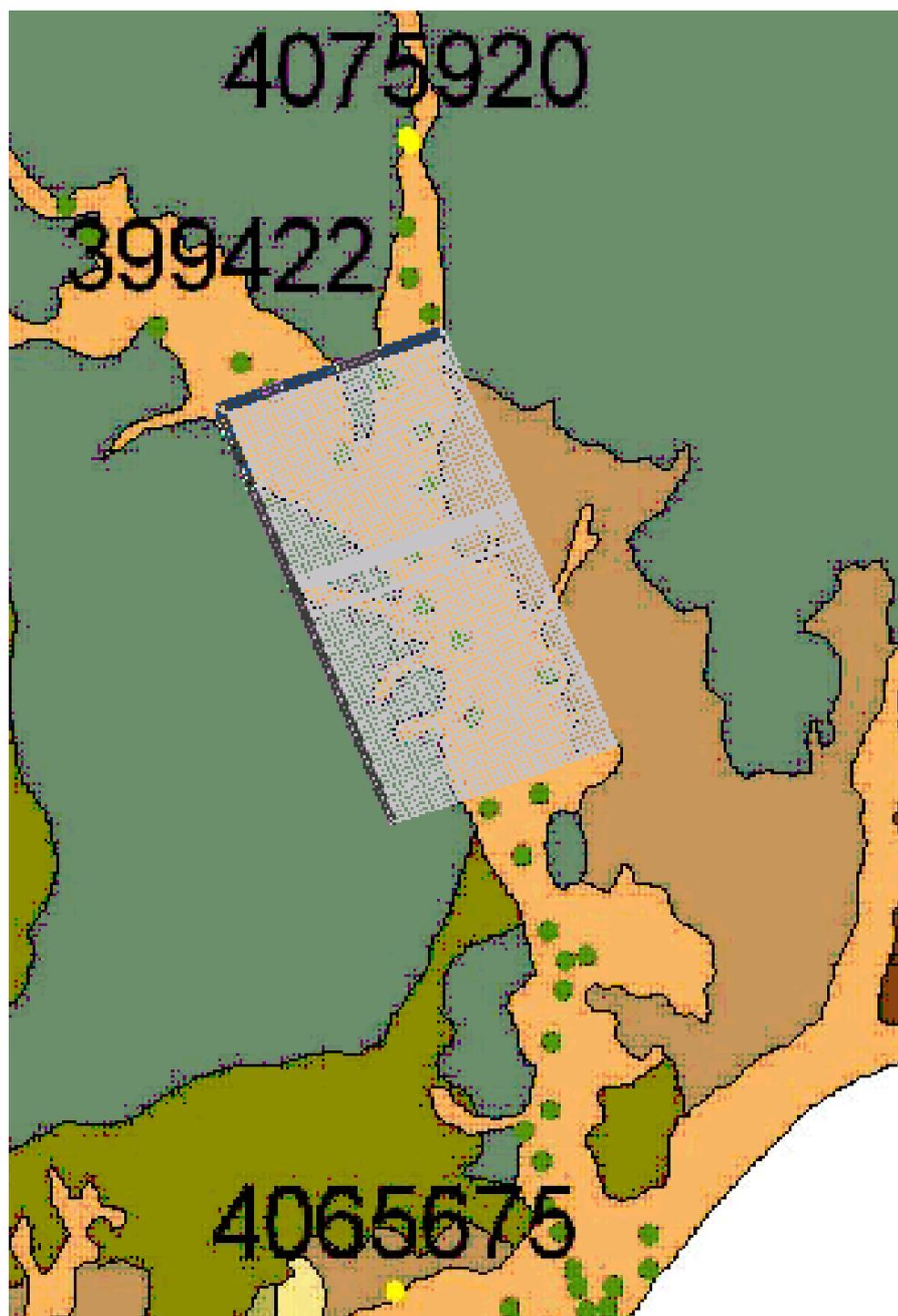


Figura 20.1. Situación del sector modelizado en el contexto geológico del área de estudio. Naranja: Cuaternario. Marrón: Plioceno. Verde y azul: esquistos y pizarras de la Zona Bética.

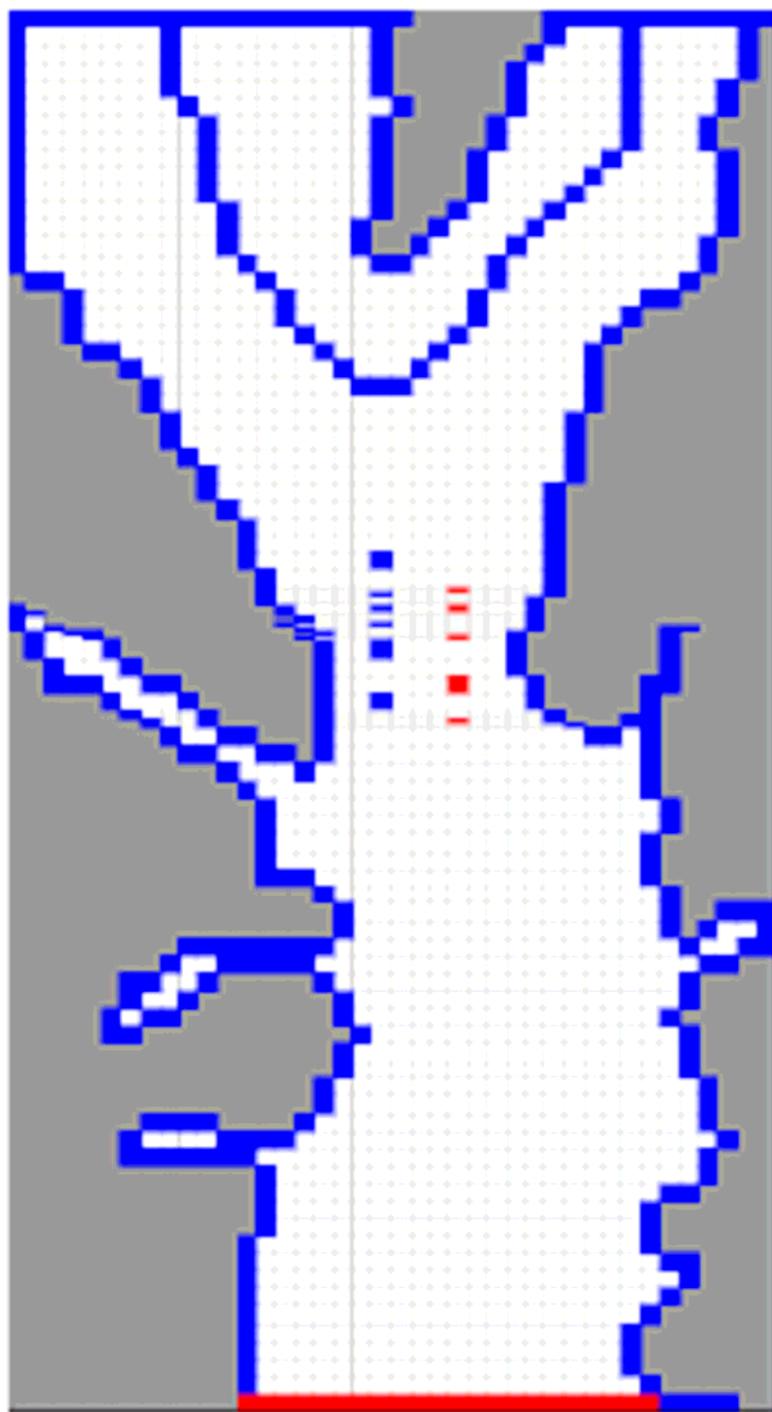


Figura 20.2. Esquema de la malla utilizada en el modelo. Las celdas rojas en el interior del sector modelizado representan captaciones en el enclave donde se localizan los sondeos de AcuaMed. Las celdas azules representan diferentes tipos de recarga localizada.

Como elementos del balance hídrico del acuífero del río Vélez en el sector modelizado, en condiciones medias anuales y régimen permanente, se han considerado los siguientes:

E) Entradas:

E1). Recarga general. Afecta a todas las celdas del acuífero y se calcula a partir de la superficie modelizada de éste (5 km²):

- E1a) Precipitación efectiva (P-ET) .La precipitación efectiva considerada es de 80 mm: 500 mm (P) – 420 mm (ET).
- E1b) Retorno de riegos. El retorno de riegos se considera del 10 % respecto de una dotación de 6000 m³/ha·año.

E2). Recarga localizada. Se introduce como caudales inyectados en determinadas celdas:

- E2a) Percolación de la escorrentía superficial “permanente” (ríos Vélez y Benamargosa). Se aplica a dos filas de celdas coincidentes con los ejes de ambos cauces, aguas arriba de las perforaciones. Aunque no existen datos directos al respecto procedentes de aforos diferenciales, se considera, basándose en la información disponible y en observaciones propias, que puede producirse una percolación del 50 % respecto a caudales medios de 100 L/s en cada curso en el tramo modelizado.
- E2b) Percolación de la escorrentía superficial esporádica (laderas esquistas impermeables, con un área de influencia en el sector modelizado de 28 km²). Se aplica a las celdas situadas en los bordes del acuífero que contactan con los esquistos. Se considera que el 75 % de la precipitación efectiva (80 mm) se infiltra, mientras que el 25 % restante continua su flujo superficial hacia sectores situados aguas abajo.
- E2c) Flujo subterráneo del borde oriental (alrededores de Vélez-Málaga). Se aplica a las celdas del contacto Plioceno-Aluvial. Se estima, por consideraciones hidrodinámicas, que puede totalizar un valor aproximado de 50 L/s.
- E2d) Percolación ARUs de Benamocarra. Se aplica a una línea de celdas situadas enfrente del sector de perforaciones. Se admite que la infiltración es del

80 % respecto del caudal generado por una población de 3000 habitantes con una dotación de 200 L/hab·día.

- E2e) Flujo subterráneo procedente de la prolongación septentrional de los aluviales de los ríos Vélez y Benamargosa. Se aplica a las celdas del borde N de los materiales acuíferos. Se obtiene por aplicación de la ley de Darcy a partir de secciones saturadas (10500 m^2 y 2500 m^2), gradientes piezométricos (0,05 y 0,007) y valores de K (200 m/d y 240 m/d) obtenidos en antecedentes. Resultan caudales respectivos de aproximadamente 240 y 50 L/s.

La consideración conjunta de todos estos elementos de recarga conduce a unos recursos medios del área modelizada de $10,5 \text{ hm}^3/\text{año}$. Esta cifra es coherente con la expuesta en el apartado anterior de $33 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el total del acuífero, en tanto que el área modelizada, según se ha expuesto, puede considerarse como de recarga relativamente más elevada.

S1) Salidas (opción 1):

Se supone que se producen exclusivamente por flujo subterráneo a lo largo del límite meridional del modelo (aluvial). No se consideran extracciones por bombeo, por desconocerse con su magnitud y ubicación. De hecho, se ha considerado conveniente no tener en cuenta este componente del balance en una primera instancia, pues así el resultado suministrado por el modelo correspondería a una situación prácticamente de régimen natural.

En la figura 20.3 se representa el resultado en forma de curvas isopiezas. Puede comprobarse que el área modelizada se encuentra aproximadamente entre las isopiezas de 32 m y de 14 m, mientras que en el sector central de las perforaciones la cota piezométrica es de 27 m. Si se compara con los mapas de isopiezas de la figura 4.2, se comprueba que el resultado del modelo es intermedio entre ambas figuras, aunque se acerca más a la situación de enero de 1997. La razón seguramente reside en no haber considerado ninguna extracción, circunstancia que se matizará a continuación. En cualquier caso, la figura 20.3 puede dar idea de la distribución piezométrica promedio del sector estudiado de acuífero a lo largo de un año de recarga media-alta, si se llegase a producir la eliminación prácticamente total de los bombeos.

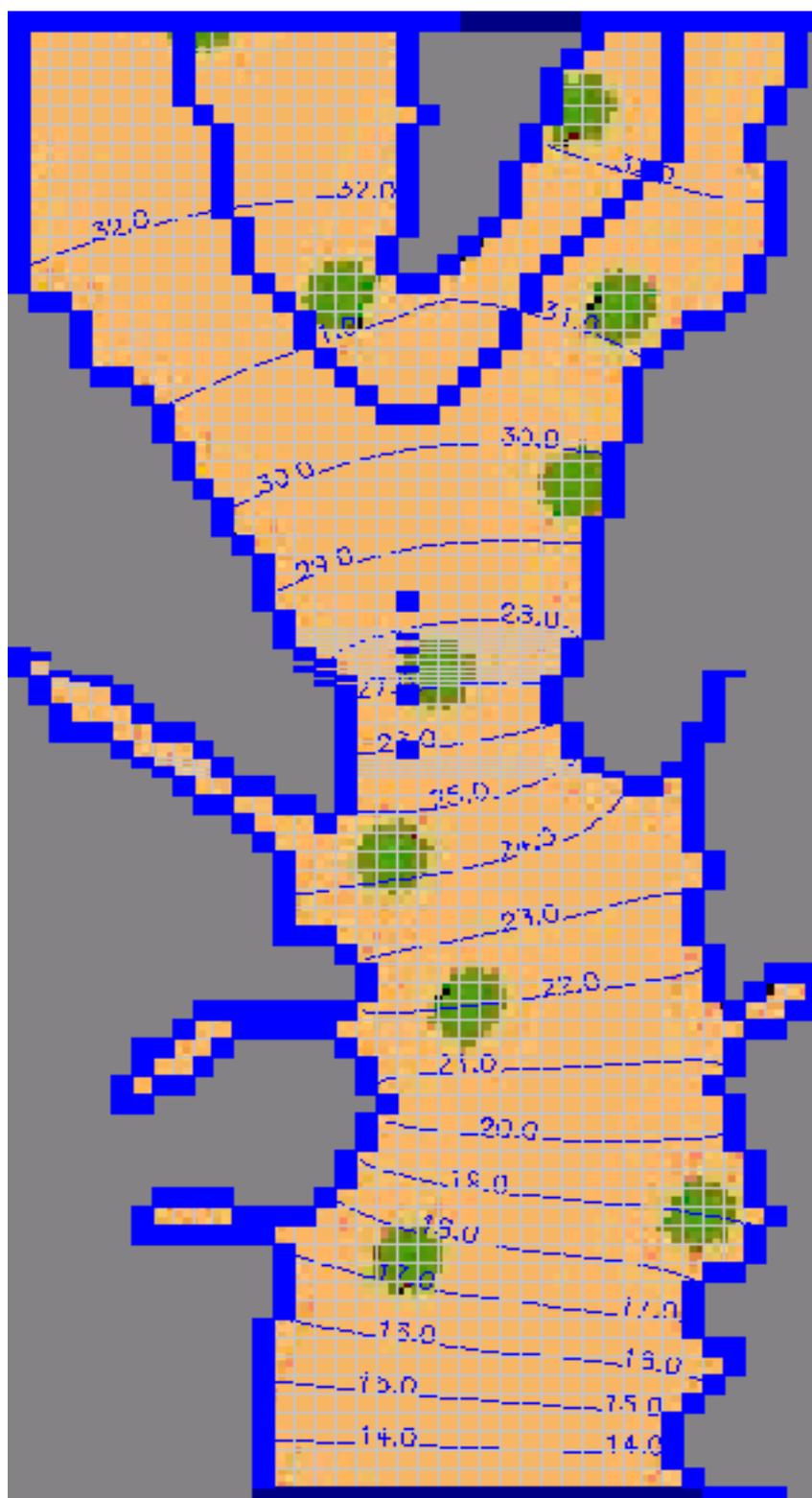


Figura 20.3. Mapa de isopiezas (valores en m s.n.m.) del acuífero en el sector modelizado, correspondiente a una situación media sin extracciones.

S2) Salidas (opción 2).

Se considera aquí el bombeo de 200 L/s (unos 6,5 hm³/año) en cinco captaciones que siguen una línea en coincidencia aproximada con la de las perforaciones de AcuaMed.

La distribución de isopiezas que proporciona el modelo se representa en la figura 20.4. Respecto de la situación sin extracciones se aprecian, lógicamente, cotas piezométricas generalizadas inferiores. A este respecto es más ilustrativo considerar las líneas de isodescensos (figura 20.5). Se aprecia aquí que los descensos producidos en el entorno de las perforaciones representadas son de 7 a 8 m.

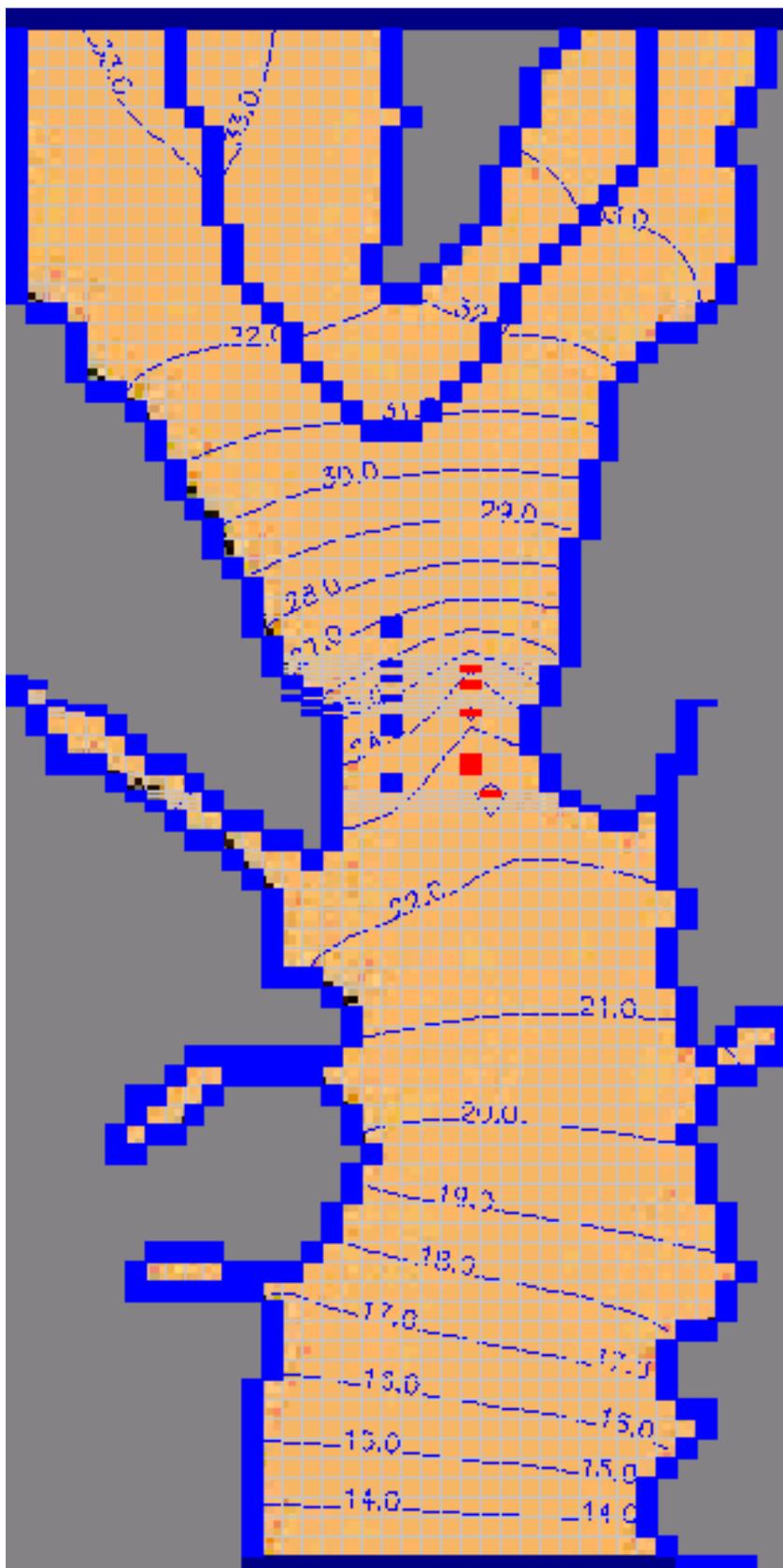


Figura 20.4. Mapa de isopiezas (valores en m s.n.m.) del acuífero en el sector modelizado, correspondiente a una situación media con extracciones (200 L/s en total) en el sector de los sondeos de AquaMed.

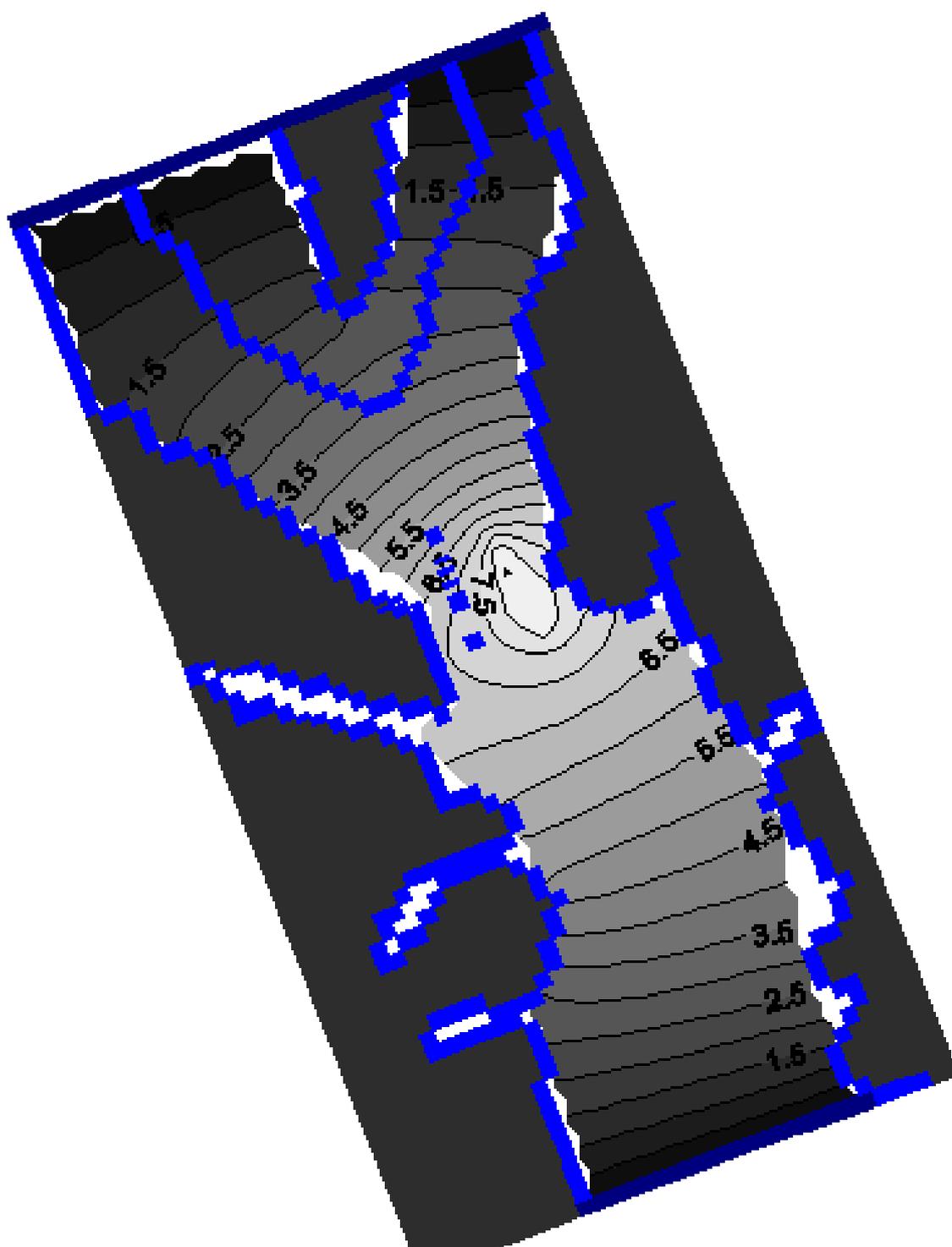


Figura 20.5. Mapa de isodescensos correspondiente a la situación expresada en la figura 20.4.

S3) Salidas (opción 3).

Se considera aquí igualmente el bombeo de 6,5 hm³/año, aunque esta vez en ocho captaciones. Cuatro de ellas siguen una línea en coincidencia aproximada con la de las perforaciones de AcuaMed y otras cuatro se ubican en el extremo NE de la zona modelizada, tratando de reproducir el efecto derivado de incluir captaciones en ese sector (¿Molino de Las Monjas?). El resultado, en forma de mapa de curvas isopiezas, se muestra en la figura 20.6. Se advierte en esta figura el que las cotas de los niveles piezométricos en el entorno de las captaciones de AcuaMed se han incrementado respecto a lo expresado en la figura 20.4. Por el contrario, la cota piezométrica en el sector NE del modelo, enclave de nuevas extracciones, se reduce.

Consideraciones:

Lo anterior traduce una circunstancia lógica: cuanto mayor sea el número de captaciones empleadas para sacar el mismo caudal conjunto, el descenso producido en los enclaves de bombeo será menor, pues menores serán los caudales individuales. Si se incluyen otras captaciones (situadas, por ejemplo, más al sur, en la vega de Vélez-Málaga), además de las ya mencionadas, de manera que el total de puntos de bombeo sea doce, entonces los descensos bajo los enclaves de bombeo reducirán su magnitud, si bien es cierto que la depresión piezométrica –aunque más moderada que en la opción 1- afectará a mayor extensión de acuífero.

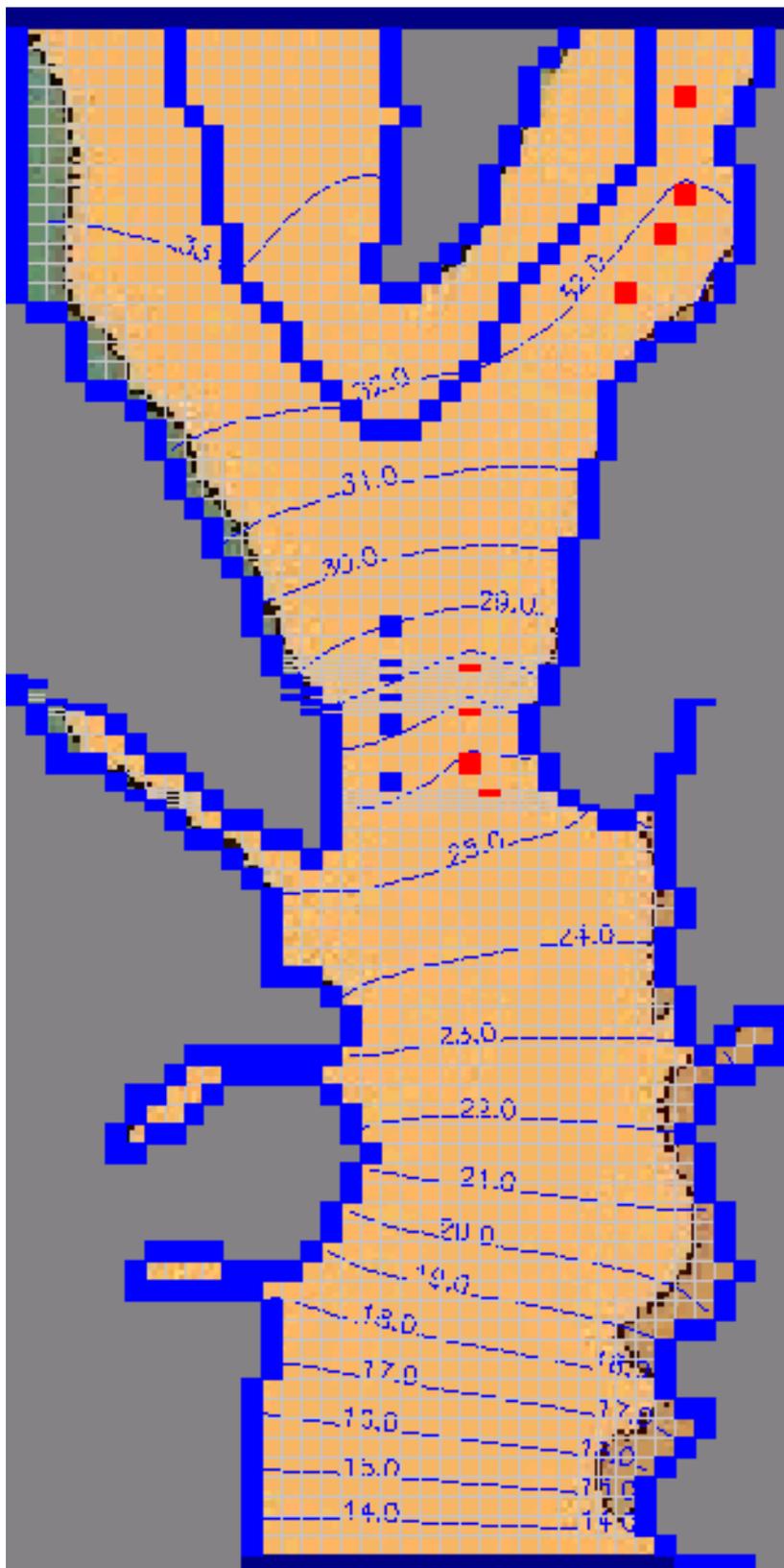


Figura 20.6. Mapa de isopiezas (valores en m s.n.m.) del acuífero en el sector modelizado, correspondiente a una situación media con extracciones (200 L/s en total) en el sector de los sondeos de AquaMed y en el sector NE.

21. PROPUESTAS DE REDES DE CONTROL

21.1. Piezometría

La instalación básica para la investigación y el control de los acuíferos son los sondeos piezométricos (o, simplemente, “piezómetros”). Además de ser datos necesarios para la calibración de los modelos de flujo y transporte, la combinación de datos piezométricos con la geometría del acuífero proporciona el conocimiento de los volúmenes de agua subterránea disponibles.

El acuífero del Vélez dispone de una importante red de piezómetros, perforados en su mayor parte en los años 1984 y 1985, que han permitido obtener información precisa sobre la geometría, características geológicas y la evolución espacial y temporal de los niveles piezométricos del acuífero.

Las primeras mediciones sistemáticas de niveles piezométricos se llevaron a cabo por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOPU) en el año 1972. Posteriormente, en el año 1977, el citado Organismo acometió la realización de 22 sondeos piezométricos en el sector deltaico.

En el año 1984, la Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE) perforó 79 nuevos puntos para el control del acuífero que sustituían o complementaban los ya existentes del SGOPU. En concreto, se realizaron 13 sondeos en el delta, 63 en el aluvial distribuidos en trece perfiles transversales al cauce y los 3 restantes se ubicaron en el sector del Trapiche para el estudio de las anomalías salinas. Todos estos puntos fueron controlados durante el periodo 1984/86.

El Instituto Geológico y Minero de España llevó a cabo, en el año 1988, 7 nuevos piezómetros, tres de ellos para el control de la intrusión marina y los 4 restantes para realizar ensayos de inyección y admisión ante la posibilidad de construir una barrera física contra la intrusión marina.

En los años 1996 y 1997 la Confederación Hidrográfica del Sur de España construyó 11 nuevas perforaciones que fueron adecuadamente protegidas para evitar su destrucción.

En resumen, en el acuífero del río Vélez se han perforado a lo largo del tiempo 119 sondeos piezométricos, que han proporcionado abundante información para establecer la geometría y funcionamiento del acuífero. Sin embargo, con el paso de los años se ha perdido la mayor parte de estas perforaciones o se han reducido las profundidades útiles por colmatación, rotura de filtros, etc. De esta manera, en el año 1993 sólo existían 50 piezómetros útiles para realizar medidas de nivel, registros de conductividad y temperatura, o toma de muestras de agua; en el año 1995 el número de puntos utilizables era tan sólo de 32 y actualmente, el número de piezómetros útiles se estima en unos 26.

En este aspecto, la propuesta actual pretende realizar las labores oportunas para que las medidas que se realicen sean válidas. La red propuesta está compuesta por 29 puntos de los cuales 3 son de nueva ejecución cuyos datos principales y ubicación quedan reflejados en la tabla 1 y figuras 21.1 y 21.2. Actualmente ya se dispone de un piezómetro donde se ha instalado un sensor para el control en continuo. Así mismo se estiman necesarias las siguientes actuaciones complementarias: a) Revisión limpieza y acondicionamiento de piezómetros; b) ejecución de nuevos piezómetros; c) campaña de nivelación.

Código Local	Código Oficial	X_UTM	Y_UTM	COTA	Sector acuífero	Tramo acuífero controlado	Control (Piezometría; Intrusión marina)	Observaciones generales
IGME 1	P.06.27.001-B	401050	4066100	4.600	Delta	Inferior	P-I	Red Básica Oficial
Pz-B	P.06.27.001-S	401040	4065947	4.500	Delta	Inferior	P-I	
Pz-A nuevo	P.06.27.002-S_nuevo	401167	4065510	3.040	Delta	Superior	P-I	Nueva ejecución para sustituir al Pz-A
Pz-Ds	P.06.27.003-S	400898	4066220	5.730	Delta	Superior	P-I	
Pz-C	P.06.27.004-S	400947	4065950	4.400	Delta	Superior	P-I	
Pz-E	P.06.27.005-S	400821	4066424	7.400	Delta	Inferior	P-I	
Pz-F	P.06.27.006-S	400749	4066514	7.230	Delta	Inferior	P-I	
IGME 3	P.06.27.007-S	401273	4065572	3.020	Delta	Inferior	P-I	
Pz-G	P.06.27.008-S	400743	4066524	7.180	Delta	Superior	P-I	
P1-5	P.06.27.009-S	400907	4066337	5.980	Delta	Superior	P-I	Posiblemente inutilizado
Pz-J	P.06.27.010-S	399455	4074379	41.880	Aluvial	Único	P	
P4-2 nuevo	P.06.27.011-S_nuevo	400566	4069552	17.360	Aluvial	Único	P	Nueva ejecución para sustituir al P4-2
Pz-K	P.06.27.012-S	399455	4074375	41.940	Aluvial	Único	P	
P6-2	P.06.27.013-S	399640	4072320	28.740	Aluvial	Único	P	Sensor automático instalado en Oct-2006
IGME 2	P.06.27.014-S	401019	4065849	4.630	Delta	Inferior	P-I	
P7,8-9	P.06.27.015-S	399939	4073151	32.470	Aluvial	Único	P	
S-152	P.06.27.016-S	401071	4065721	4.050	Delta	Inferior y Superior	P-I	Posiblemente inutilizado
P10-2	P.06.27.017-S	399665	4076376	57.200	Aluvial	Único	P	
S-153 nuevo	P.06.27.018-S_nuevo	401169	4065502	2.880	Delta	Inferior	P-I	Nueva ejecución para sustituir al S-153
P15-4	P.06.27.019-S	397277	4074397	49.750	Aluvial	Único	P	
P1-3	P.06.27.020-S	400806	4066253	6.400	Delta	Inferior y Superior	P-I	Posiblemente inutilizado
P2-1	P.06.27.022-S	400553	4067198	8.880	Aluvial	Único	P	
Pz-Di o Pz-Dp	P.06.27.023-S	400898	4066220	5.730	Delta	Inferior	P-I	
P7,8-2	P.06.27.024-S	398751	4073102	34.810	Aluvial	Único	P	
P9-3	P.06.27.026-S	399448	4074230	41.280	Aluvial	Único	P	
E6-20-1	P.06.27.027-S	399486	4074933	44.200	Aluvial	Único	P	
P6-1	P.06.27.Sin código	399470	4072265	28.915	Aluvial	Único	P	
P7,8-1	P.06.27.Sin código	398575	4072960	35.304	Aluvial	Único	P	
S-16BIS	P.06.27.Sin código	401420	4065715	1.853	Delta	Superior	P-I	

Tabla 21.1. Propuesta de red piezométrica y de intrusión marina

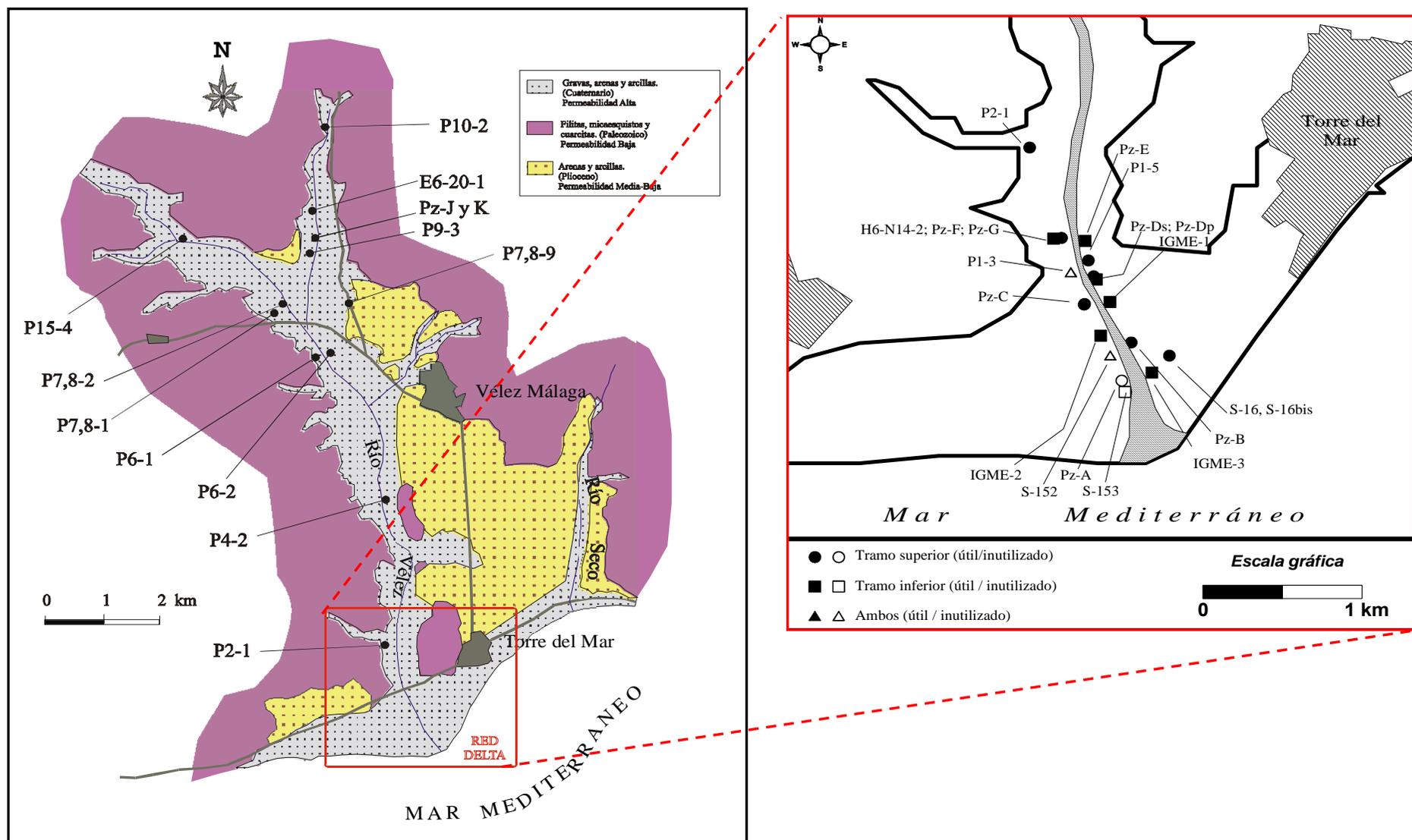


Figura 21.1. Ubicación de los puntos propuestos de la red piezométrica y de intrusión marina.

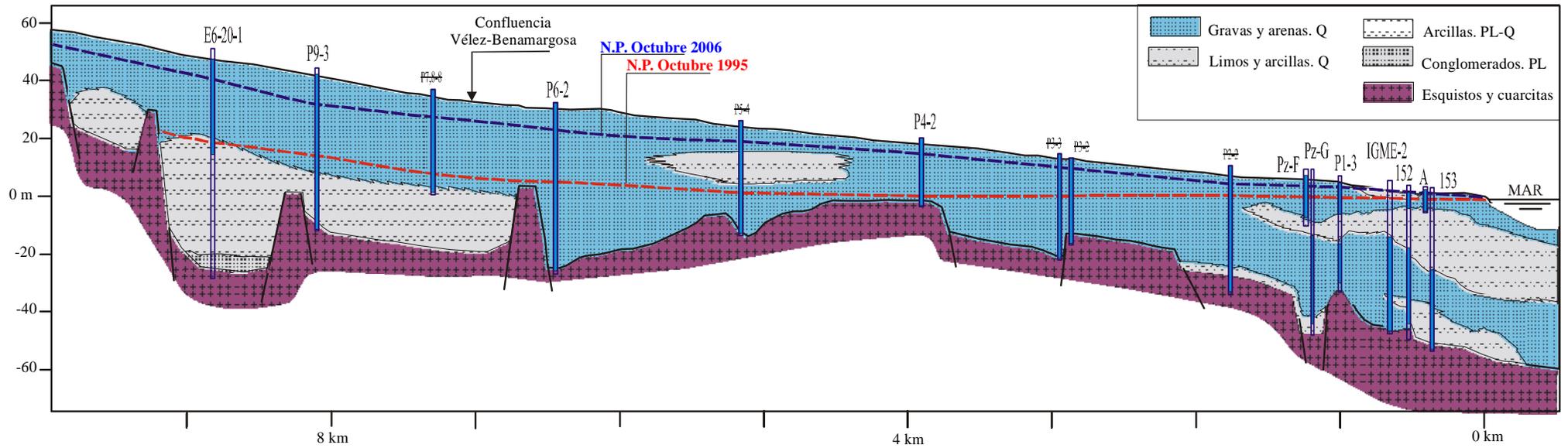


Figura 21.2. Perfil longitudinal por el río Vélez que incluye la ubicación de puntos de la red piezométrica y de intrusión marina.

Una vez establecida la red, se estima que cada campaña de medidas se puede realizar en 1-2 días, con una periodicidad entre campañas de mensual a trimestral.

a) Revisión, limpieza y acondicionamiento de piezómetros

La mayor parte de los piezométricos deben mostrar profundidades útiles inferiores a las iniciales o las aguas están estancadas al haberse obstruido los filtros por lo que requieren de una limpieza previa a las tareas de control. Las tareas concretas deben establecerse tras la revisión de su estado.

Se propone el método de limpieza mediante aire comprimido optimizado con los siguientes productos:

- Aditivo químico (polifosfato) en la proporción de 15 kg por m³ de agua inyectada, si bien se considera que puede ser efectivo a partir de 1kg/m³ de agua, si se deja actuar más de 1 hora. El uso de este producto es frecuente para la limpieza de perforaciones con objeto de dispersar los limos y arcillas que puedan haber obstruido los filtros.
- Hipoclorito cálcico a razón de 1kg/m³ de agua para la destrucción de los lodos orgánicos.

El procedimiento puede ser el siguiente:

- 1) Mezclar y batir enérgicamente los productos con agua utilizando bidones de 200 litros. Introducir 3 kg de polifosfato y 200 gr de hipoclorito por cada bidón de agua.
- 2) Inyectar la mezcla en los piezómetros, lo más al fondo posible, con ayuda de una manguera.
- 3) Dejar actuar 24 horas, como mínimo.
- 4) Agitar durante 2 horas con aire comprimido.
- 5) Dejar reposar durante al menos 8 horas.
- 6) Efectuar una segunda fase de agitación (pistoneo) durante 2 horas.
- 7) Bombear hasta que el agua salga limpia.

Finalmente se procederá al acondicionamiento de algunos de los piezómetros mediante la instalación de una caseta de protección.

b) Ejecución de nuevos piezómetros

Para la ubicación los piezómetros se ha tenido en cuenta la situación espacial de los piezómetros útiles, de forma que se ha pretendido cubrir la pérdida de alguno de ellos. En concreto se considera que deben ser repuestos los siguientes piezómetros:

- Pz-A-nuevo: Profundidad estimada: 15 m. Objetivo: captar el tramo superficial para el control piezométrico y de intrusión marina.
- S-153-nuevo: Profundidad estimada: 45 m. Objetivo: captar el tramo profundo para el control piezométrico y de intrusión marina.
- P4-2-nuevo: Profundidad estimada: 25 m. Objetivo: reponer piezómetro de control histórico.

c) Campaña de nivelación de piezómetros

A partir de las medidas piezométricas puntuales, el trazado de isopiezas para conocer el flujo subterráneo exige la nivelación topográfica de precisión de los puntos de la red propuesta.

21.2. Intrusión marina

En el sector deltaico se propone una red de control compuesta por 16 puntos, dos de ellos de nueva construcción (tabla 21.1 y figura 21.1). Se estima que cada campaña de medidas puede ser realizada en unos 2 días con una periodicidad trimestral. Los parámetros básicos a determinar son la conductividad eléctrica y la concentración de cloruros de las aguas subterráneas. Reviste particular interés la realización de registros verticales de conductividad eléctrica en piezómetros completamente penetrantes.

21.3. Red de control de la calidad de las aguas subterráneas

En la tabla 21.2 y en la figura 21.3 se presenta la red de control de calidad de las aguas subterráneas compuesta por 15 puntos. La duración de cada campaña puede ser de 1-2 días con una periodicidad trimestral.

Asimismo, puede ser interesante añadir varios puntos de control de la calidad de las aguas de los ríos Vélez y Benamargosa.

Las determinaciones a realizar deben incluir el análisis de elementos mayoritarios, nitrogenados, fosfatos y eventualmente plaguicidas.

Nº PUNTO	X_UTM	Y_UTM	COTA	Toponimia	Naturaleza	Uso del agua	Propietario o administrador
E5-N36-1				Pedro Gómez	Sondeo	Abastecimiento (reserva)	Ayuntamiento de Benamocarra
F5-24-1	398781	4073112	34.758	Vega de Cela	Sondeo	Agricultura	Sociedad Capellanía Patarra SAT Nº 701
E6-18	399403	4075155	48.253	Atalaya Baja	Pozo	Agricultura	Manuel Téllez Bueno (¿?)
E6-29	399634	4074364	43.138	El Trapiche	Sondeo	Abastecimiento (reserva)	Ayuntamiento de Vélez Málaga
F6-1-3				Finca El Banco	Pozo	Agricultura	Hermanos Gutierrez Ariza
F6-24-1	399978	4071474	25.321	Huerta de la Lechuga	Sondeo	Agricultura	CR Río Vélez. Acequia de Anaya
G6-2-3	400055	4070752	20.936	Antigua finca de Belda	Sondeo	Agricultura	Isabel Pérez Clavero
G6-5-1	400718	4070039	18.296	Vega de la Alberquilla	Pozo	Agricultura	CR Río Vélez. Acequia Prado del Rey
G6-N6-2-1	400227	4069965		Cortijo los López "Cabrillas"	Sondeo	Agricultura	Miguel Garcia Quintero.
G6-N22-1	400776	4068871		Barranca Trigueros	Sondeo	Agricultura	CR Río Vélez. Acequia Chica Barranca de Trigueros
G6-30	400858	4068082	11.955	Vega de Enrique	Pozo	Agricultura	CR Playa de Vargas y Vega Enrique
H6-1-1(S)	400870	4067772		Vega de Mena	Sondeo	Agricultura	CR Torre del Mar
H6-N12-1-2	400604	4066793		Vega Enrique	Sondeo	Agricultura	CR Cerro de la Encina
H6-16(P)	400764	4066235	6.402	El Puente	Pozo	Agricultura	CR Playa de Vargas y Vega Enrique
H6-17-1	400989	4066369	4.848	Carril de la Culebra	Pozo	Agricultura	CR Torre del Mar

Tabla 21.2. Propuesta de red de control de la calidad de las aguas subterráneas

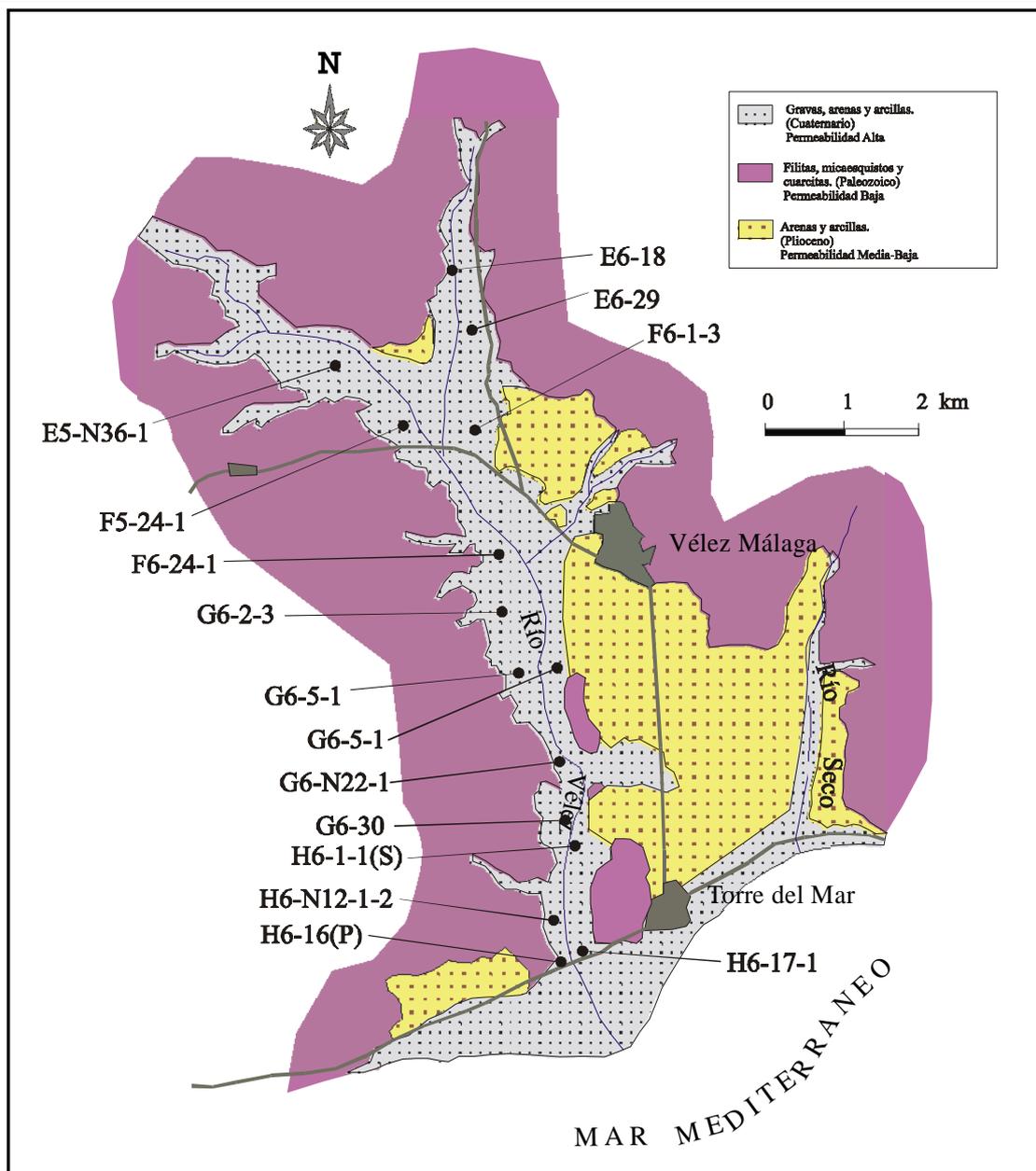


Figura 21.3. Ubicación de los puntos propuestos de la red de control de la calidad de las aguas subterráneas.

21.4. Otras redes de control

Para trabajos específicos deberán establecerse otras redes de control tales como:

a) Control de los caudales superficiales

Se trata de establecer una red foronómica en varias secciones de los ríos Vélez y Benamargosa y en el control de los caudales derivados por acequias. Especialmente interesante puede ser el control de la relación río-acuífero aguas abajo de la confluencia de ambos ríos, mediante la realización de aforos diferenciales.

b) Control de la explotación por bombeo del acuífero

Esta red debe ser establecida tras un primer análisis de la situación actual y resultará necesaria para conocer los balances zonales de agua y los usos y destinos. El control de la explotación por bombeo es asimismo fundamental para conocer cómo se modificará el régimen del acuífero si se paralizasen determinadas captaciones al recibir agua desde el nuevo sistema Viñuela-Acuífero-EDAR.

22. PROPUESTA DE GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS

De acuerdo con los planteamientos de la Directiva Marco del Agua y las líneas estratégicas de acción del Programa AGUA, el esquema de explotación planteado del sistema Viñuela-acuífero-EDAR/Vélez puede presentarse como un excelente ejemplo de actuación en gestión integral y sostenible de recursos hídricos. Además, dicho esquema implica un efecto medioambiental altamente positivo, como es el de la recuperación de masas de agua degradadas debido a la contaminación por nitratos de origen agrario y la protección de éstas frente a la intrusión marina. Todas estas actuaciones pueden y deben acometerse aprovechando las oportunidades y sinergias que ofrecen los trabajos de AcuaMed para la consolidación de los regadíos del Plan Guaro. La sostenibilidad en la explotación de los recursos y el logro de un buen estado cualitativo y cuantitativo del sistema es posible, sin perder de vista otro de los aspectos en los que pone especial énfasis la política de aguas establecida por la DMA: el agua es un recurso limitado y valioso, por lo que debe ser considerada su dimensión como bien económico.

El uso conjunto es un elemento fundamental dentro de la estrategia de gestión integral del agua. La aplicación actual del uso conjunto con una amplísima tipología puede integrarse con otras técnicas de gestión del agua, como mercados del agua, gestión de la demanda, reutilización, etc. Las ventajas son significativas, tanto económicas como de calidad, cantidad y garantía de suministro del recurso. La unidad principal de análisis de la gestión integral de recursos hídricos es la cuenca (o agrupación de cuencas en caso de sistemas interconectados), donde las decisiones de operación del sistema y asignación de agua tienen mayores implicaciones hidrológicas, económicas, sociales y ambientales. En este contexto, los modelos ofrecen una representación simplificada de los problemas que permiten procesar la información de una manera rápida y eficiente, y son de ayuda imprescindible para hacer más racional la compleja toma de decisiones en relación con la planificación y gestión del agua.

Para el caso propuesto del sistema Viñuela-acuífero-EDAR/Vélez, su configuración física lo hace idóneo para aplicar un modelo relativamente sencillo pero completo

de uso conjunto que se traduce en un Sistema Soporte a la Decisión, donde deben incorporarse las siguientes consideraciones desde el punto de vista hidrogeológico:

Las aguas subterráneas y las relaciones río-acuífero deben jugar un papel importante en la operación del sistema, lo que requiere que el acuífero sea introducido en el modelo de uso conjunto mediante la aplicación de modelos de parámetros distribuidos.

La explotación por bombeo del acuífero necesita ser restringida para evitar el deterioro de la calidad por intrusión marina. Ello requerirá que el modelo de parámetros distribuido a incorporar al modelo de simulación/optimización de la gestión, permita la representación 3D del flujo y transporte de solutos e integre la característica de densidad variable en el fluido.

Las demandas urbanas, agrícolas y medioambientales deben incorporarse al sistema considerando su distinto valor económico. Asimismo, deben tomarse en consideración las diferentes exigencias de calidad del agua según el uso que se haga de las mismas, lo que puede permitir su simulación/optimización con criterios económicos.

El modelo de flujo permitiría la simulación de una hipotética reordenación de captaciones y el análisis de la situación respetando los derechos implicados.

Tanto los antecedentes como las actuaciones hidrogeológicas de AcuaMed en el marco del Proyecto Informativo indican que el acuífero de Vélez permite proporcionar los caudales solicitados para riego (6,5 hm³/año). Respecto a los impactos hidrológicos negativos (relaciones río-acuífero e intrusión marina), su análisis detallado requiere del desarrollo de modelos de flujo y transporte de solutos. No obstante, las primeras estimaciones al respecto son favorables a la viabilidad, entre otros aspectos, porque los caudales de bombeo para riego planteados son inferiores a los actuales y sustitutivos de ellos en gran medida, si bien su cuantificación detallada debe ser objeto de estudio.

Así pues, las actuaciones para el estudio de la explotación sostenible del acuífero de Vélez y el establecimiento del modelo de uso conjunto de los recursos hídricos del sistema Viñuela-Acuífero-EDAR/Vélez requerirían de las siguientes tareas concretas:

- Actualización del inventario de puntos de agua.
- Red de monitorización que incluye el completado y mantenimiento de las redes de control y vigilancia de niveles piezométricos, calidad y explotación por bombeo.
- Adecuación de las redes de control piezométrico: revisión y limpieza de piezómetros y construcción de tres nuevos.
- Campañas periódicas de medidas de nivel piezométrico y adquisición e instalación de instrumentos tipo “data logger” para el control continuo.
- Campañas de registros de conductividad y temperatura en piezómetros y captaciones del delta para el control de la intrusión marina.
- Campañas de toma de muestras y analítica de parámetros de calidad fisicoquímica y bacteriológica de las aguas superficiales y subterráneas.
- Identificación de la relación río/acuífero: campañas periódicas de aforos diferenciales en cauces (ríos Vélez y Benamargosa) y control de caudales derivados por acequias.
- Cálculo de explotación por bombeo y su evolución en los últimos 10 años. Dado que la mayor parte de los puntos carecen de contador volumétrico, la explotación se calculará a partir de datos de consumos eléctricos en captaciones seleccionadas y contrastado con superficies de riego. Tal procedimiento ya fue aplicado con éxito a mediados de los años 90 (CHSE, 1997).
- Cálculo de la explotación actual y previsión de las modificaciones a raíz de las actuaciones de AcuaMed. A efectos de gestión del acuífero, resulta fundamental conocer cual va a ser la previsible explotación por bombeo adicional a la que efectuará AcuaMed, es decir, conocer si van a existir bombeos particulares complementarios o independientes del nuevo sistema planteado, bien por decisión propia o por que sus aguas se destinen a riegos por encima de la cota 140.

- Ensayos complementarios para la obtención de parámetros de flujo y transporte necesarios para la elaboración de los modelos: campañas de medidas de flujos subterráneos, ensayos de trazadores, ensayos de dispersividad, ensayos de infiltración y determinación de la permeabilidad en el lecho del río.
- Campañas de prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para la determinación de la intrusión marina en el delta y la geometría del sustrato en el sector de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa.
- Identificación precisa de la ubicación idónea de nuevas captaciones a ejecutar.
- Regulación de la cuenca. Estudio de usos y demandas de agua. Revisión de las relaciones entre captaciones, zonas y cultivos de regadío. Análisis de las modificaciones respecto a los últimos datos disponibles (año 1997).
- Determinación del balance hídrico del acuífero y sus modificaciones en los últimos diez años.
- Actuaciones para creación e implicación activa de la Comunidad de Usuarios como medida clave en la protección cuantitativa y cualitativa de los recursos hídricos subterráneos: divulgación del sistema de uso conjunto y de las características hidrogeológicas del acuífero de Vélez, tareas de concienciación sobre el uso sostenible de los recursos hídricos y creación de una página web al respecto.
- Diseño, construcción y experimentación en una instalación piloto para la recarga artificial con aguas de la EDAR de Vélez.
- Desarrollo de un modelo de flujo y transporte de solutos 3D que considere densidad variable en el fluido. Permitirá analizar las repercusiones de las actuaciones previstas, simular las relaciones río-acuífero, eventuales efectos de la recarga artificial, el transporte de contaminantes y la intrusión marina.
- Desarrollo de un modelo de uso conjunto Viñuela-Acuífero-EDAR
- Desarrollo de una herramienta para el acople en entorno SIG de los modelos de flujo y transporte y el de gestión/optimización.
- Identificación y valoración económica de propuestas para la mejora de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en relación con la contaminación por nitratos de origen agrario.

- Elaboración de planes de sequía incorporando el uso conjunto embalse-acuífero-EDAR y el acoplamiento de modelos a GIS.

Desde el punto de vista presupuestario todas las actuaciones anteriormente expuestas pueden suponer del orden de 420.000 euros. El plazo de ejecución se estima en 1,5-2 años y su desarrollo puede ser paralelo a la ejecución de las obras, aunque sería deseable que se iniciase con anterioridad, especialmente con objeto de determinar la ubicación hidrogeológica óptima de las nuevas captaciones a efectuar.

Respecto a la red de monitorización cabe señalar que la propuesta indicada incluye la red explicitada en el apartado correspondiente. Dicha red se establecería durante el plazo señalado anteriormente y sería diferente de la red definitiva a instaurar una vez concluyan las obras, momento en el que ya se dispondría de los modelos de flujo y transporte desarrollados que permitirían su diseño óptimo.

23. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavente, J., El Mabrouki, K., Himi, M., García-Aróstegui, J.L., Calabrés, C. y Casas, A. 2005. Uso de técnicas geofísicas para caracterizar la extrusión de agua salina en un acuífero costero mediterráneo bicapa (Río Vélez, provincia de Málaga). *Geogaceta*, 37, 127-130.
- CHSE. 1987. Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa. Proyecto 12/87. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Sur de España.
- CHSE. 1997. Asistencia técnica para el seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Sur de España.
- García-Aróstegui, J.L., Hidalgo, M.C. and Benavente, J. 2005. Groundwater quality monitoring in a coastal Mediterranean aquifer affected by agricultural contamination and seawater intrusion-extrusion processes (Vélez river, Andalusia, Spain). In: Benavente, J., Larabi, A. and El-Mabrouki, K. (eds.), *Monitoring, Modelling and Management of coastal aquifers*. Instituto Geológico y Minero de España, Granada, 301-313.
- García-Aróstegui, J.L. 1998. Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga). Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Memoria inédita. 377 pp.
- García-Aróstegui, J.L., Padilla, F. y Cruz-Sanjulián, J.J. 1998. Numerical simulation of the influence of the La Viñuela reservoir system on the coastal aquifer of the Vélez River (Málaga, Spain). *Hydrological Sciences Journal*, 43 (3), 459-477.

- García-Aróstegui, J.L., Padilla, F., Hidalgo, M.C. y Cruz-Sanjulián, J.J. 2000. Water management in a coastal region of Southern Spain, the Vélez River catchment area. Simulation of groundwater and surface water flow for the correct freshwater budget. *Hydrogéologie*, 3, 13-22.
- ITGE. 1988. Estudio de las posibilidades de lucha contra la intrusión salina mediante la utilización de barreras artificiales. Instituto Tecnológico y Geominero de España. Memoria inédita.
- Sánchez, L. y Castillo, A., Eds. y Coords. 2005. Itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz. Universidad de Granada-Agencia Andaluza del Agua, Granada, 238 pp..
- Vadillo, I., Benavente J., El-Mabrouki, K., Carrasco, F., López, V. and García-Aróstegui, J.L. (2007). Distribution of nitrogen species and evidence of denitrification in the Velez river aquifer (South of Spain). WAPO Conference, Barcelona.
- Wichenbach, M. 1993. Leitähigkeitsmessungen im delta des río Vélez (Málaga, Spanien). Tesis de Licenciatura. Universidad Libre de Berlín. Memoria inédita, 72 pp.

ANEXO 1.

INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS HIDRÁULICOS

MEDIANTE AQTESOLV

ANEXO 2.

REPORTAJE FOTOGRÁFICO