

62845  
J



**OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA MEJORA DEL  
CONOCIMIENTO SOBRE EL FUNCIONAMIENTO  
HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA  
LOMA DE ÚBEDA (Expediente 442/03).**

**INFORME FINAL**

**TOMO 1.- MEMORIA**

**NOVIEMBRE 2004**

*Consultor: Javier Gollonet Fernández de Trespalacios*

**OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA  
MEJORA DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL  
FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO  
DEL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA  
LOMA DE ÚBEDA (Expediente 442/03).**

**INFORME FINAL. TOMO 1.- MEMORIA**

**Noviembre, 2004**

## **ÍNDICE GENERAL**

**TOMO 1.- MEMORIA**

**TOMO 2.- FIGURAS**

**TOMO 3.- ANEJO 1**

**TOMO 4.- ANEJOS 2 a 7**

# ÍNDICE

## TOMO 1.- MEMORIA

	<u>Pág</u>
<b>1.- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	1
1.2.- TRABAJOS REALIZADOS Y CONTENIDO DEL INFORME .....	3
<b>2.- APORTACION AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO.....</b>	<b>7</b>
2.1.- CAMPAÑAS DE AFORO TRIMESTRALES PARA EVALUACIÓN DE DESCARGAS NATURALES .....	7
2.2.- CAMPAÑA DE PIEZOMETRÍA FLASH Y CONTROL PIEZOMÉTRICO PERIÓDICO .....	11
2.3.- REALIZACIÓN DE MUESTREOS ANALÍTICOS .....	16
2.4.- RECONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO CARBONATADO EN EL RÍO GUADALIMAR Y UBICACIÓN DE SONDEOS DE INVESTIGACIÓN PARA ANÁLISIS DE LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO .....	20
2.5.- AJUSTE DEL MODELO DE FLUJO MODFLOW EN RÉGIMEN TRANSITORIO .....	21
<b>3.- ANALISIS DE SECTORES FAVORABLES PARA ABASTECIMIENTO URBANO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA .....</b>	<b>26</b>
3.1.- ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS POSIBILIDADES DE CONEXIÓN CON EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO CONJUNTO DE LA LOMA DE ÚBEDA .....	26
3.2.- ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DELIMITACIÓN DE SECTORES FAVORABLES PARA ABASTECIMIENTO .....	29
3.3.- UBICACIÓN DE SONDEOS DE EXPLOTACIÓN PARA ABASTECIMIENTO DE EMERGENCIA .....	32
3.4.- RECOMENDACIONES DE EXPLOTACIÓN PARA USO URBANO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA .....	34
<b>4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>37</b>

## RELACIÓN DE CUADROS EN TEXTO

Pág.

<b>Cuadro nº 1.- Síntesis de las campañas de aforos de las descargas del Carbonatado de La Loma de Úbeda. ....</b>	<b>11</b>
<b>Cuadro nº 2.- Datos de población de los núcleos incluidos en el Consorcio de la Loma de Úbeda obtenidos a partir de la Revisión de Padrón Municipal para el año 2003. ....</b>	<b>37</b>
<b>Cuadro nº 3.- Características de los sondeos tipo para abastecimiento urbano en la zona favorable para tal fin. ....</b>	<b>42</b>

**TOMO 2.- FIGURAS**  
**RELACIÓN DE FIGURAS**

**Capítulo 2**

- 2.1.- Aforos de las descargas del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda (2003-2004)
- 2.2.- Isopiezas del acuífero carbonatado Jurásico en Marzo de 2004.
- 2.3.- Isodescensos del acuífero carbonatado Jurásico entre Mayo de 2001 y Marzo de 2004.
- 2.4.- Situación de piezómetros medidos en el acuífero carbonatado Jurásico.
- 2.5.- Evolución piezométrica 2001-2004 del acuífero carbonatado Jurásico. Gráfico general.
- 2.6.- Evolución piezométrica 2001-2004 del acuífero carbonatado Jurásico. Detalle de los acuíferos confinado y libre
- 2.7.- Evolución piezométrica 2001-2004 del acuífero carbonatado Jurásico. Detalle del acuífero confinado
- 2.8.- Evolución piezométrica 2001-2004 del acuífero carbonatado Jurásico. Detalle del acuífero libre.
- 2.9.- Evolución piezométrica 2001-2004 del acuífero carbonatado Jurásico. Detalle del sector de Villanueva del Arzobispo.
- 2.10.- Evolución de la profundidad y temperatura del agua en el sondeo Pichilín II viejo. Zona central del acuífero confinado (datos deducidos de piezometría y control automático).
- 2.11.- Evolución de la profundidad y temperatura del agua en el Pozo Vicente. Sector de Villanueva del Arzobispo. (datos deducidos de piezometría y control automático).
- 2.12.- Evolución de la profundidad del agua en el sondeo Pichilín II viejo. (detalle del 28-12-2002 al 22-3-2003 y relación con las lluvias).
- 2.13.- Situación de puntos del muestreo de calidad de Agosto de 2004.
- 2.14.- Facies hidroquímicas y conductividad del agua en al acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).
- 2.15.- Temperatura del agua en al acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).
- 2.16.- Isolíneas de contenido en sulfatos del acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).
- 2.17.- Isolíneas de contenido en cloruros del acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).
- 2.18.- Isolíneas de contenido en sodio del acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).
- 2.19.- Isolíneas de contenido en nitratos del acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).

- 2.20.- **Isolíneas de contenido en nitritos del acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).**
- 2.21.- **Isolíneas de contenido en ión amonio del acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).**
- 2.22.- **Diagrama de Piper del acuífero confinado jurásico de la Unidad de Úbeda (Agosto 2004).**
- 2.23.- **Situación de los puntos de muestreo del CEDEX (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.24.- **Facies hidroquímicas y conductividad del agua en el acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.25.- **Temperatura del agua en el acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.26.- **Isolíneas de sulfatos en el acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.27.- **Isolíneas de cloruros en el acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.28.- **Isolíneas de sodio en el acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.29.- **Isolíneas de nitratos en el acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.30.- **Diagrama de Piper del acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda (Mayo-Agosto de 2002).**
- 2.31.- **Explotaciones del acuífero Jurásico y agrupaciones consideradas para el modelo.**
- 2.32.- **Situación de Piezómetros propuestos para definición geométrica y control del entorno del Río Guadalimar en el Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda.**
- 2.33.- **Situación de sondeos propuestos para mejora del conocimiento de la geometría del Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda.**

### **Capítulo 3**

- 3.1.- **Esquema general del sistema de abastecimiento a la Comarca de la Loma de Úbeda.**
- 3.2.- **Resumen de características hidroquímicas del acuífero carbonatado jurásico de la Unidad de Úbeda, a efectos de potabilidad del agua (según muestreo de Agosto 2004) y zonas favorables para abastecimiento urbano.**
- 3.3.- **Detalle de la anterior a escala 1/50000 con sondeos propuestos.**

## **TOMO 3.- ANEJOS 1**

### **ANEJO 1.- DATOS Y FICHAS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS TRIMESTRALES**

#### **1.1.- Cuadros resumen de las campañas de aforos del carbonatado (2003-2004).**

- Agosto de 2003
- Enero de 2004
- Abril de 2004
- Julio de 2004
- Esquemas de secciones de aforo modificadas en Agosto de 2004

#### **1.2.- Fichas de aforos de las campañas trimestrales**

- Agosto de 2003
- Enero de 2004
- Abril de 2004
- Julio de 2004

## **TOMO 4.- ANEJOS 2 a 7**

### **ANEJO 2.- MEDIDAS DE LAS CAMPAÑA DE PIEZOMETRÍA FLASH 2004 Y DE CONTROL DE LA EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA**

#### **2.1.- Medidas de nivel de la campaña de piezometría flash de Marzo de 2004.**

#### **2.2.- Datos de control de la evolución piezométrica.**

#### **2.3.- Datos de registradores de nivel.**

- Tabla 1.- Sondeo Pichilín II viejo
- Tabla 2.- Pozo Vicente

### **ANEJO 3.- ANÁLISIS DE AGUA**

#### **3.1.- Datos de campo obtenidos en el muestreo de calidad de Agosto de 2004.**

#### **3.2.- Análisis del acuífero carbonatado jurásico de la Loma de Úbeda (Agosto 2004).**

#### **3.3.- Datos analíticos del CEDEX utilizados para trazado de isolíneas y análisis hidroquímico del acuífero (Mayo-Agosto de 2002).**

#### **3.4.- Propuesta de red de control de calidad del acuífero carbonatado jurásico y plano de situación.**

**ANEJO 4.- PROPUESTA DE SONDEOS PARA ESTABLECER LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO EN LAS MÁRGENES DEL RÍO GUADALIMAR.**

4.1.- Cuadro resumen de piezómetros propuestos para definición geométrica y control del entorno del río Guadalimar.

4.2.- Croquis constructivos de los sondeos propuestos (S1 a S11).

**ANEJO 5.- MODELO PRELIMINAR DE FLUJO SUBTERRÁNEO DEL ACUÍFERO CARBONATADO JURÁSICO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE ÚBEDA.**

**ANEJO 6.- PROPUESTA DE SONDEOS DE EXPLOTACIÓN PARA CAPTACIONES DE EMERGENCIA. CROQUIS CONSTRUCTIVOS DE LOS SONDEOS (A a D).**

**ANEJO 7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **1.- INTRODUCCIÓN**

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El presente informe corresponde al Proyecto "***OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA MEJORA DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO DEL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA LOMA DE ÚBEDA.***" (Nº de Expediente 442/03) realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) con la colaboración de Javier Gollonet Fernández de Trespalacios, adjudicatario del contrato correspondiente según Resolución de 13 de octubre de 2003. El proyecto se ha realizado bajo la supervisión de D. Juan Carlos Rubio Campos, con la colaboración de D. Antonio González Ramón, por parte del IGME. Por parte del Consultor han intervenido además Crisanto Martín Montañés (hidrogeólogo con dilatada experiencia y amplio conocimiento del área de trabajo) y Alberto Moreno Martínez (también hidrogeólogo y con experiencia anterior en la zona de estudio).

### **1.1.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS**

El presente estudio forma parte de las actuaciones incluidas en el Convenio de colaboración suscrito entre el IGME y el Instituto del Agua de la Consejería de

Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, que contempla programas de mejora del conocimiento e investigación en diferentes acuíferos de Andalucía, entre los que se encuentra el carbonatado de la Loma de Úbeda.

El actual sistema de abastecimiento a la Loma de Úbeda integra, como veremos, a 30 núcleos de población con más de 100000 habitantes y presenta unos consumos próximos a 8'5 hm<sup>3</sup>/año, con caudales punta diarios variables de 280 a 340 l/s. El suministro se basa en el embalse de Aguascebas, de 6'4 hm<sup>3</sup> de capacidad y que regula una media de 3 hm<sup>3</sup>/año, y se complementa con bombeos desde el propio río Guadalquivir, mediante impulsiones que han de salvar un desnivel de unos 400 metros desde la estación de bombeo de Mogón hasta la ETAP de Villacarrillo y cuya capacidad es de unos 275 l/s. Los problemas estacionales de turbidez y calidad del agua de las tomas del río han hecho plantearse en los últimos años la utilización de aguas subterráneas de la Unidad Hidrogeológica de Sierra de Cazorla para complementar el suministro, y actualmente se dispone ya de 5 sondeos en el entorno del Aguascebas con una capacidad de bombeo conjunta de 150 l/s y en las inmediaciones de la Estación de bombeo de Mogón otros dos sondeos con capacidad conjunta similar, pero que también han de salvar el desnivel de unos 400 m hasta la ETAP. El posible suministro desde el Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda podría permitir un caudal adicional con elevaciones inferiores y proporcionar un incremento de la garantía de suministro en condiciones excepcionales de sequía.

Este estudio supone, por otra parte, la lógica continuación de las actividades que desde 1996 ha venido realizando el IGME en este acuífero en el marco de diferentes proyectos, y que dieron lugar a la definición preliminar del mismo en el año 2000. Los estudios previos más directamente relacionados con el presente proyecto son el de *"Tratamiento de diferente información relativa a la hidrogeología de los acuíferos del Alto Guadalquivir (IGME, 2000)*, realizado en el marco del Programa de Actualización de la Infraestructura Hidrogeológica (PAIH, DGOHCA-IGME, 2001) "y el de *"Asistencia técnica para la evaluación de la situación actual de diversos acuíferos en el margen derecho del Guadalquivir y en la orla carbonatada meridional de Jaén (IGME, 2001)*. El primero de ellos contiene la definición preliminar y la síntesis hidrogeológica del acuífero, que sirvieron de base para la redacción de las "Normas de Explotación" (CHG-IGME, 2001), en las que se encuadra el segundo estudio citado. Con posterioridad se llevó a cabo el proyecto *"INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA ESTABLECER*

***LAS POSIBILIDADES DE REALIZAR OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA LOMA DE ÚBEDA*** (IGME, 2002 y 2003), que es el antecedente más inmediato y punto de partida del presente estudio. Otro trabajo de interés es el realizado por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir sobre *“Toma de datos e inventario de puntos de agua para la caracterización y evaluación de recursos de la Unidad Hidrogeológica de la Loma de Úbeda”* (CHG, 2001).

Por último hay que destacar que durante la realización de esta asistencia técnica vio la luz el proyecto *“Realización de estudios en la Unidad Hidrogeológica 05.23 (Úbeda)”*, realizado por el CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente a petición de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, que contiene un amplio estudio hidroquímico e isotópico (CEDEX, MF-MMA, informe parcial de Marzo 2003) y cuyos datos analíticos han sido reinterpretados para los fines del presente estudio.

El objetivo final de este proyecto es la actualización de información y toma de datos para la mejora del conocimiento del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda (geometría, calidad, descargas naturales, piezometría, etc...), para determinar las posibilidades de apoyar el abastecimiento urbano del Consorcio de Municipios de la Loma de Úbeda, con aguas de calidad adecuada y procedentes del citado acuífero.

## **1.2.- TRABAJOS REALIZADOS Y CONTENIDO DEL INFORME**

Las actividades que se han llevado a cabo para alcanzar los objetivos que se persiguen han sido, en esencia, las siguientes, de acuerdo con las previsiones del Pliego de Condiciones:

- 1.- Análisis previo de posibilidades de conexión con el sistema de abastecimiento del Consorcio.
- 2.- Realización de un muestreo flash de 30 puntos en sectores favorables para abastecimiento.
- 3.- Interpretación hidroquímica de análisis y determinación de sectores favorables para abastecimiento (además del muestreo realizado se ha reinterpretado el disponible del CEDEX, con otros 25 análisis de Mayo-Agosto de 2002 repartidos por todo el acuífero, tanto en su zona libre como confinada).

- 4.- Realización de 10 campañas de control de la evolución piezométrica (con un total de 97 medidas)
- 5.- Calibración del modelo matemático existente (en Modflow) en régimen transitorio, con los nuevos datos de piezometría, bombeos y geometría del acuífero disponibles.
- 6.- Campaña flash de piezometría . A este capítulo se ha dedicado un importante esfuerzo, ya que para conseguir medir 40 puntos útiles en Marzo de 2004 (la mayor campaña piezométrica existente hasta la fecha sobre este acuífero) fue necesario revisar 78 puntos en dos fases (20 de los medidos en 2001 y otros 58 puntos nuevos preseleccionados de diferentes inventarios preexistentes o localizados en campo en zonas de interés). Todos los puntos se han situado con GPS de +- 20 m de precisión en X e Y y se han confeccionado mapas de situación a escala 1/10.000, un álbum fotográfico de los mismos y se han recabado en campo los datos de interés que ha sido posible.
- 7.- Reconocimiento del carbonatado en el cauce del Guadalimar y ubicación de sondeos de investigación.
- 8.- Cuatro campañas de aforos trimestrales para evaluar las descargas del carbonatado, con un total de 38 aforos con molinete y otros 41 volumétricos o estimados en las secciones de interés previamente establecidas (IGME, 2002 y 2003), en número variable entre 16 y 36 secciones por campaña, según la climatología, con un total de 84 secciones visitadas.
- 9.- Elaboración general de información y síntesis de datos, para la redacción del presente informe.

Además de esas actividades ya contempladas en el Pliego de Condiciones, la realización del proyecto ha supuesto otras imprescindibles para la calibración del modelo o para la posterior interpretación y, en definitiva, para obtener unos mejores resultados del mismo, entre las que cabe destacar:

- El seguimiento de los datos suministrados por dos registradores de nivel instalados por el IGME en dos sondeos de la zona (uno en el sector central del acuífero confinado y otro en el sector de Villanueva del Arzobispo).
- El análisis y evaluación de las extracciones realizadas sobre el acuífero, como paso previo a la calibración del régimen transitorio y ante la inexistencia de datos fiables de explotaciones.
- La ubicación y definición de sondeos de reconocimiento para la mejora del conocimiento de la geometría del acuífero y de sondeos de preexplotación para su posible integración en el sistema de abastecimiento de la Loma de Úbeda.

Estas últimas actividades, no previstas inicialmente en el marco de la asistencia técnica, han contado para su realización con el apoyo de personal del IGME de la oficina de Granada.

El presente informe final se estructura en una Memoria que resume la información recopilada y los resultados y conclusiones de todo tipo obtenidas, e incluye 7 anejos con la información utilizada o elaborada en el proyecto y un tomo independiente con las figuras elaboradas.

De la **Memoria Final** se entregan **2 ejemplares completos y un cd-rom** con todos los **archivos informáticos** de utilidad para el proyecto, convenientemente estructurados en **tres directorios principales**: "Memoria", "Anejos" y "Documentación Técnica Complementaria", con su correspondiente **fichero-índice** que explica el **contenido y formatos utilizados**.

El cd-rom contiene, por último, diversos ficheros pdf de Acrobat Reader con el texto completo y los anejos, que permiten su reproducción en cualquier impresora para sacar copias adicionales idénticas al original o de cualquiera de sus partes por separado.

## **2.-APORTACIÓN AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO**

## **2.- APORTACIÓN AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO**

### **2.1.- CAMPAÑAS DE AFORO TRIMESTRALES PARA EVALUACIÓN DE DESCARGAS NATURALES.**

En el anterior proyecto realizado por el IGME en la zona (IGME, 2002 y 2003) se llevó a cabo un detallado reconocimiento de las descargas naturales asociadas al acuífero carbonatado del Jurásico en ambos márgenes del río Guadalimar, que se producen por numerosos arroyos de forma más o menos difusa y cerca del contacto entre los materiales carbonatados y las arcillas triásicas infrayacentes. En total se localizaron 39 secciones de aforo (si bien 3 de ellas no se aforaron por dificultades de acceso), de las que 14 corresponden a descargas de la margen izquierda, 14 a la margen derecha y las 11 restantes son secciones diferenciales para descontar aportes del acuífero del Mioceno (las nºs 4, 5, 6 y 14) ó secciones alternativas de algunos arroyos, situadas aguas abajo.

En el presente proyecto se han aforado las secciones de interés en 4 campañas trimestrales (agosto de 2003 y enero, abril y julio de 2004), con la realización de un total de 38 aforos con micromolinetes y la estimación o aforo volumétrico de otros 41 caudales (en general, para aportes inferiores a 2-4 l/s o por inexistencia de secciones

adecuadas para aforos más precisos). En la primera campaña se observaron 36 secciones, y en función de sus resultados y de las conclusiones obtenidas en la campaña de Mayo de 2001 se redujeron a 16 secciones de interés para las sucesivas campañas. Tres de las secciones de aforo corresponden a descargas del Mioceno que es necesario descontar de la sección nº 3 (en concreto, las nº 4, 5 y 6).

Los resultados netos obtenidos se muestran en el cuadro nº 1, que incluye la campaña de mayo de 2001, y se han representado gráficamente en la figura 2.1. Los datos originales y fichas de aforo se adjuntan en el anejo nº 1.

Como se puede observar en el cuadro nº 1, el caudal medio de las 5 campañas disponibles oscila entre un mínimo de 3'4 l/s y un máximo de 40'3 l/s en las distintas secciones finales de interés, si bien la principal descarga puntual (con surgencia bien definida) es la correspondiente al arroyo de la Estrella (sección nº 19), con un caudal medio próximo a 29 l/s y variable de 3 a 56 l/s.

El caudal conjunto supone una media de unos 46 l/s para la margen izquierda (aunque variable de 3 a más de 115 l/s), y de unos 151 l/s para la margen derecha, con descargas más abundantes y permanentes (variables desde 23 a más de 300 l/s en conjunto). En total y considerando los 5 aforos disponibles (aunque el primero es de la primavera de 2001, hay que tener en cuenta que dos de las campañas de 2003-2004 corresponden al máximo estiaje, por ser de Julio/2004 y Agosto/2003) las descargas conocidas supondrían unos 197 l/s, equivalentes a una media de 6'2 hm<sup>3</sup>/año.

En cuanto a su distribución estacional está claro que los máximos corresponden a la primavera, con mínimos acusados en estiaje, y cabe destacar el hecho del diferente comportamiento de las descargas de la margen izquierda respecto a las de la margen derecha: en efecto, el máximo caudal medido en la margen derecha es claramente el de Abril de 2004 (más de 4 veces el registrado en enero de 2004), mientras que la margen izquierda apenas representa en abril un 80 % del caudal medido en el mes de enero. Este hecho debe estar probablemente provocado por la afección de los bombeos a las descargas de la margen izquierda (la campaña de riego comenzó en 2004 entre mediados y finales de marzo y los aforos se llevaron a cabo del 13 al 15 de abril).

Cuadro nº 1.- Síntesis de las campañas de aforo de las descargas del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda.

Nº SECCIÓN	Nº IGNE	NOMBRE	Margen	MAYO 2001		AGOSTO 2001		ENERO 2004		ABRIL 2004		JULIO 2004		Caudal medio 5 campañas
				TIPO	CAUDAL NETO (l/s)	TIPO	CAUDAL NETO (l/s)	TIPO	CAUDAL NETO (l/s)	TIPO	CAUDAL NETO (l/s)	TIPO	CAUDAL NETO (l/s)	
3	2036-2- GVA	Arroyos de Valdecanales y Guadalupe	Izda	Mol	15,6	E	0,0	Mol	8,9	Mol	7,1	E	1,3	6,6
8	2136-3- GTB	Arroyo de Torrihuela	Dcha	Mol	10,9	E	0,0	Seco	0,0	Mol	21,8	E	1,0	6,7
9	2036-3- GMA	Arroyo de Los Morales (en Navas)	Dcha	E	27,5	Mol	10,1	V	15,0	Mol	117,6	Mol	31,1	40,3
13	2036-3- GCA	Cañada de Úbeda	Dcha	Mol	33,6	E	0,0	V	1,5	Mol	37,9	Mol	10,4	16,7
15	2036-3- GCA	Arroyo de la Corregidora	Izda	Mol	6,3	E	0,0	Mol	11,5	Mol	13,5	E	0,0	6,3
19	2036-3- GEA	Arroyo de la Estrella	Dcha	Mol	56,1	Mol	2,9	Mol	13,4	Mol	31,2	Mol	39,3	28,6
25	2136-1- GAA	Arroyo del Arbolón (puente camino Cjo. Stª. Marina)	Izda	E	60,0	Mol	2,1	Mol	31,9	E	12,0	Mol	12,1	23,6
28	2135-5- GCA	Arroyo de la Cabañada	Dcha	Mol	21,0	V	3,0	Mol	14,4	Mol	19,2	Mol	5,9	12,7
30	2036-4- GHA	Arroyo de los Yeros/Huerta Fresca (o Franca)	Dcha	Mol	23,0	Mol	3,0	Mol	3,8	Mol	6,9	Mol	7,8	8,9
31	2135-6- GTA	Arroyo de la Torre	Dcha	E	12,5	E		V	2,0	Mol	26,6	E	0,1	10,3
32	2135-6- GCA	Arroyo de la Cañada	Dcha	Mol	30,0	Mol	2,5	Mol	19,2	Mol	34,4	Mol	32,4	23,7
36	2135-6- GCA	Arroyo del Carrizal	Izda	Mol	35,3	E	1,2	Mol	3,0	Mol	6,3	Mol	1,5	9,5
38	2036-4- GRA	Arroyo del Robledo	Dcha	S.a.	0,0	Mol	1,6	Mol	2,7	Mol	6,8	Mol	5,8	3,4
<b>TOTAL MARGEN DERECHA</b>					<b>214,5</b>		<b>23,2</b>		<b>72,0</b>		<b>302,4</b>		<b>134,0</b>	<b>151,3</b>
<b>TOTAL MARGEN IZQUIERDA</b>					<b>117,2</b>		<b>3,3</b>		<b>55,2</b>		<b>38,9</b>		<b>14,9</b>	<b>45,9</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>					<b>331,8</b>		<b>26,5</b>		<b>127,2</b>		<b>341,2</b>		<b>148,9</b>	<b>197,2</b>
<b>OBSERVACIONES: LAS SECCIONES 9, 13, 19, 25, 28, 31 Y 32 PUEDEN TENER INTERES PARA AFOROS PERIODICOS FUTUROS POR TENER MEDIA DE MÁS DE 10 L/S EN LAS 5 CAMPAÑAS INICIALES. SUPONEN ADEMÁS EL 79 % DEL CAUDAL MEDIO AFORADO EN TODAS LAS SECCIONES. EN LOS CAUDALES NETOS SE HAN DESCONTADO APORTES AJENOS (AGUAS RESIDUALES, ETC...).</b>														
Tipo de aforos: Mol: molinete; E: estimado; V: volumétrico; S.A.: sin acceso;														

Ello puede confirmarse si se observa la relación entre ambos márgenes de la campaña inicial de Mayo de 2001, en la que la margen izquierda tenía un caudal equivalente al 54 % del medido en la margen derecha (117 l/s en la izquierda frente a 215 l/s en la derecha), que sin embargo en Abril de 2004 pasa a ser tan sólo del 13 % (39 l/s en la margen izquierda frente a más de 300 l/s en la derecha), a pesar de tratarse de dos épocas de "aguas altas". Considerando esa proporción y la evolución "a estima" de los caudales observados se ha extrapolado el caudal que parecería lógico en la campaña de abril de 2004 para las secciones de la margen izquierda, que como se observa podría ser próximo a 150 l/s si no existiese afección por bombeos (véase figura 2.1). Aunque en mayo de 2001 también existían bombeos, hay que tener en cuenta (como veremos al hablar de la evolución piezométrica) que los niveles generales de la margen izquierda presentan un descenso entre mayo de 2001 y marzo de 2004 próximo o superior a 10 metros cerca del río Guadalimar, lo que podría haber provocado un mayor grado de afección a los manantiales en abril de 2004.

En definitiva las campañas de aforo han permitido un mejor conocimiento de las descargas del acuífero carbonatado, pero aún son insuficientes para un adecuado conocimiento del funcionamiento del acuífero y su evolución estacional. Para el futuro se recomienda hacer como mínimo aforos de 7 secciones (en concreto las nºs 9, 13, 19, 25, 28, 31 y 32) que han superado, como media, los 10 l/s en las 5 campañas disponibles, y que representan por sí solas el 79 % de las descargas evaluadas hasta la fecha. Seis de las secciones son de la margen derecha y una de la margen izquierda. En cuanto a su periodicidad convendría que fuese mensual durante 1-2 años completos, para programar luego el futuro seguimiento según los resultados obtenidos. No obstante, dado el comportamiento de las secciones situadas en la margen izquierda, quizá sería conveniente proseguir el control en las restantes secciones de esa margen con caudales medios comprendidos entre 5 y 10 l/s (al menos las secciones nº 15 y 36, ya que la nº 3 implicaría aforar otras tres secciones de aportes del mioceno que hay que descontarle).

En cualquier caso, para las campañas de aforo que se hagan en el futuro se recomienda un reconocimiento previo de todas las secciones a incluir, que tendría por objetivo conocer con mayor detalle el origen y tipología de tales descargas, para establecer con claridad si se trata de surgencias puntuales, si existen otros aportes ajenos al carbonatado (aguas residuales, descargas del Mioceno, etc...) y si el acuífero carbonatado presenta intercalaciones menos permeables que originen surgencias colgadas a diferentes cotas de descarga.

## **2.2.- CAMPAÑA DE PIEZOMETRÍA FLASH Y CONTROL PIEZOMÉTRICO PERIÓDICO**

Los puntos en los que finalmente se dispone de medidas piezométricas son 40 (28 con compresor, 11 con sonda eléctrica y un dato procedente del sensor instalado en el sector de Villanueva del Arzobispo), y en 5 de ellos las medidas son simplemente orientativas por no alcanzar la sonda o ser insuficiente la presión del compresor utilizado para evacuar el agua del tubo piezométrico. Finalmente se han utilizado para el ajuste de isopiezas 32 valores que se consideran fiables y se han incluido las 7 zonas de descarga del acuífero libre cuyo caudal medio de las cinco campañas de aforo existentes supera los 10 l/s, por considerarse cotas piezométricas representativas del acuífero libre. Ello no implica cambio alguno en la disposición piezométrica del acuífero confinado (como se comprobó en varios intentos de ajuste que no los incluían), pero permite obtener un trazado más coherente del sector de acuífero libre, en el que sólo se dispone de 4 medidas en sondeos, una de ellas aproximada (el nº FL-82, con nivel a menos de 164 metros y en el que se considera para el ajuste un valor orientativo de 435 m s.n.m., equivalente a una profundidad supuesta de 160 metros).

Los resultados obtenidos por krigage de los 39 valores útiles para el ajuste se muestran en la figura 2.2 y los datos utilizados se incluyen en el anejo 2-1. Como se puede observar, en la zona de acuífero libre situada al norte del río Guadalimar el flujo se dirige hacia el propio río de forma generalizada, con gradientes variables del 1'1 al 3'3 % según las zonas y cotas comprendidas entre 560 y unos 400 m s.n.m., si bien en los sondeos medidos las cotas del agua están entre 400 y 444.

En el acuífero confinado las cotas piezométricas están comprendidas entre 327 y 374 m s.n.m., con gradientes comprendidos entre el 0'3 y 0'7 %, con un flujo preferente de componente sur, hacia la zona central del acuífero en que se ubican los principales bombeos y con un trazado que en detalle debe estar muy condicionado por dichos bombeos.

Si se comparan las medidas de marzo de 2004 con las realizadas por el IGME en el flash piezométrico de mayo de 2001, se observa, por otra parte, que de los 12 puntos con medidas en ambas fechas, 9 presentan descensos relativos comprendidos entre 9 y 39 metros, mientras que en 3 de ellos los niveles se mantienen o han subido ligeramente (uno del acuífero libre y dos en una franja de dirección NO-SE entre Úbeda y

Torreperogil). Aunque el ajuste es menos fiable por sólo disponer de 12 datos, se han trazado unas líneas de isodescensos relativos, que se muestran en la figura 2.3. Las zonas de máximo descenso se sitúan al oeste de Úbeda y al sur de la línea Torreperogil-Santo Tomé (desde 20 a más de 30 m), con descensos nulos en el acuífero libre y comprendidos generalmente entre 10 y 20 metros en la mayor parte del acuífero confinado.

Por lo que respecta al **control de la evolución piezométrica**, se dispone de 97 medidas realizadas en el marco de este proyecto entre Marzo de 2003 y Marzo de 2004 (10 campañas más la del flash piezométrico), además de las realizadas anteriormente en los mismos puntos entre Mayo de 2001 y Septiembre de 2002 (IGME, 2002-2003) y las medidas posteriores del IGME entre Mayo y Noviembre de 2004 (otras 5 campañas). La situación de los piezómetros controlados se muestra en la figura 2.4. Los datos obtenidos se incluyen en el anejo 2-2 y en las figuras 2.5 a 2.9 se representan los gráficos de evolución piezométrica, que incluyen todas las medidas disponibles hasta la fecha. Tras un primer gráfico que muestra la evolución general de todos los puntos medidos, se incluyen diferentes detalles de uno o varios de los acuíferos o sectores diferenciados en el momento actual. A la vista de los resultados obtenidos se pueden hacer las siguientes consideraciones a este respecto:

a).- La distribución espacial de los puntos medidos se ha mejorado algo tras incluir en el presente proyecto los puntos 21 y 47 desde Junio de 2003, pero por el contrario los puntos 29 y 40, de interés por cubrir zonas extremas, han dejado de ser útiles por cambio de las instalaciones (el 29 desde el año 2001 y el 40 desde Febrero de 2004). Para mejorar el control futuro y su cobertura espacial se proponen otros 5 puntos localizados en la campaña de piezometría flash realizada y otros 2 como alternativos para sustituir a algunos próximos que pudieran quedar inutilizados para este fin por cualquier razón. La situación de estos nuevos puntos de control se muestra en la figura 2.4.

b).- En el acuífero libre tan sólo se mide un punto (el número 25) y ha sido imposible localizar otros de interés por las características constructivas de los existentes y la escasez de puntos que capten realmente el acuífero carbonatado sin interferencias del Triás subyacente, que también alberga niveles detríticos acuíferos con diferente potencial hidráulico.

c).- En el sector de Villanueva del Arzobispo se mide el nº 1 (Pozo de Vicente, instalado desde Octubre de 2002 por el IGME con un registrador de nivel automático), y el nº 41 se

dejó de medir en Septiembre de 2002 por considerarse un nivel anómalo (quizá asociado al Triás), antes de definirse la posible desconexión del sector de Villanueva del Arzobispo. Quizá este punto esté asociado a dicho sector, por lo que convendría revisarlo e incluirlo nuevamente en la red de control si se comprueba tal extremo. Desgraciadamente no se tienen datos de sus características constructivas ni columna litológica. Para comprobar la posible desconexión entre este sector y el resto del acuífero confinado se proponen, por otra parte, dos de los futuros puntos de control (concretamente los números 91 y 102), ya que en teoría se sitúan uno a cada lado del posible accidente que en profundidad desconectaría ambos sectores, de posición desconocida actualmente.

d).- A pesar de las dificultades que entraña el control piezométrico iniciado y el posible error que conlleva realizar buena parte de las medidas mediante compresor, se considera imprescindible mantener y mejorar la red actual, con periodicidad mínima de medida mensual como hasta la fecha, al menos hasta que se disponga de una red específica para tal fin.

Las conclusiones más significativas que se pueden extraer de los datos disponibles hasta la fecha son las siguientes:

1).- El gráfico general (figura 2.5) muestra claramente las diferentes cotas piezométricas de los sectores de acuífero diferenciados, y la buena correlación general entre máximos y mínimos de dichos sectores, a excepción del de Villanueva del Arzobispo que tiene una evolución claramente diferenciada. Las cotas del agua del acuífero confinado están comprendidas entre 320 y 390 m s.n.m., las del acuífero libre oscilan en el único punto de control entre 400 y 445 m s.n.m. y las del sector de Villanueva del Arzobispo están entre 520 y 590 m s.n.m. El punto de control 41 (Niña Isabel) mostraba una cota muy estable, que podría estar asociada a niveles triásicos, aunque tampoco se puede descartar que sea representativa del sector de Villanueva del Arzobispo, dada su posición y cota del agua (del orden de unos 525 m s.n.m.).

2).- La respuesta de los acuíferos confinado y libre a los bombeos y al cese de los mismos muestra un buen paralelismo, con máximos y mínimos acusados más o menos coincidentes (véase figura 2.6), si bien en el acuífero libre las oscilaciones estacionales son superiores (de hasta 40 metros) y la tendencia general es de equilibrio, mientras que los puntos más representativos del confinado muestran tendencia general descendente (con valores de 3 a más de 10 m/año en el periodo de control), y oscilaciones estacionales

variables desde 5 a 30 m/año, que al parecer se incrementan de norte a sur (ver detalles en figuras 2.7 y 2.8). En el acuífero confinado los descensos son en cierto modo lógicos y admisibles, pudiendo tratarse de su respuesta a los intensos bombeos y su adaptación a un nuevo estado de equilibrio, pero en algunas zonas esta evolución y las fuertes oscilaciones estacionales están provocando un incremento de las sustituciones de sondeos por otros próximos y el abandono de algunos, provocado también por sus deficientes características constructivas (son pocos los que atraviesan un espesor suficiente de acuífero). Las fuertes oscilaciones estacionales del acuífero libre tienen en el momento actual difícil explicación, ya que al parecer los bombeos en esa zona son muy escasos, aunque quizá respondan a una transmisividad relativamente baja del conjunto.

3).- El sector de Villanueva del Arzobispo presenta una clara situación de desequilibrio piezométrico, con descensos acumulados próximos a 45 metros en el periodo de control (algo más de 3 años), que en su mayor parte tuvieron lugar entre Junio de 2001 y Septiembre de 2003 (véase figura 2.9), si bien el menor descenso del año 2004 se debe al abandono de varias captaciones por haberse quedado casi improductivas por el descenso de niveles, con la consiguiente reducción de las explotaciones del sector. Hasta la fecha no existe un análisis detallado de la geometría, balance ni explotaciones de este sector (que sería necesario abordar a corto plazo, dada su situación), pero un análisis preliminar del mismo realizado en el presente estudio permite evaluar una recarga próxima a 2-3 hm<sup>3</sup>/año (para una superficie de alimentación de unos 15 km<sup>2</sup>), frente a unas descargas por bombeo superiores a 3-4 hm<sup>3</sup>/año, para el riego de unas 2200 a 3000 ha. Los datos de explotaciones son siempre aproximados, ya que no existe un inventario completo ni de captaciones ni de superficies de riego. La única zona de descarga quizá asociada a este sector (la sección de aforos nº 36, cuya cota probable de surgencia sería de unos 500 m s.n.m.) presenta un caudal medio de unos 9 l/s en las cinco campañas de aforos realizadas (véase cuadro nº 1), y al parecer ha disminuido de caudal en los últimos años (en la campaña de Mayo de 2001 se midieron 35 l/s) si bien aún se mantiene, por situarse los niveles en sondeos a cotas aún superiores a 520-545 m s.n.m., a pesar de los descensos relativos ya citados. **En definitiva, este sector de acuífero requiere un estudio detallado urgente y un tratamiento específico a todos los efectos, por su desconexión respecto al resto del acuífero carbonatado.**

Con motivo del presente proyecto se han seguido, por otra parte, los datos proporcionados por los dos **registradores de nivel automáticos** instalados por el

IGME en dos sondeos de la zona: uno sobre el sector de acuífero confinado, en su zona central (el nº 50, Pichilín II viejo) y otro en el sector de Villanueva del Arzobispo (el nº 1, Pozo Vicente). Ambos puntos de control disponen de una estación GSM que permite la consulta y descarga de datos vía internet, y están programados para lecturas del nivel de agua y temperatura cada hora (en el segundo se midieron algunas épocas cada 15 minutos), si bien desgraciadamente han sufrido numerosas interrupciones y averías por diversas causas (cuyo análisis excede los objetivos de este informe), pero que, en definitiva, han impedido obtener los resultados deseados en ambos casos.

El equipo instalado en el sondeo Pichilín estuvo operativo desde Enero hasta Diciembre de 2003, aunque con un fallo importante entre finales de Abril y primeros de Agosto que impidió recuperar los datos y actualmente está pendiente de reinstalar. El del Pozo Vicente ha funcionado desde Octubre de 2003 hasta Abril de 2004, aunque con varios períodos de pérdida de datos (esencialmente en Febrero y Marzo de 2003) y tras funcionar unos días quedó de nuevo fuera de uso en Octubre de 2004, estando pendiente su revisión. Al parecer ambos equipos han sufrido actos de vandalismo, aparte de otros problemas de comunicación o internos.

Los datos obtenidos en ambos equipos se han resumido a nivel diario en los períodos con datos, y se adjuntan en el anejo 2.3. Por otra parte, con los datos de interés del control automático y las medidas piezométricas con sonda disponibles se han elaborado las figuras 2.10 a 2.12, que muestran la evolución general en cada uno de ellos y un detalle de medidas horarias comparadas con las lluvias para el caso del sondeo Pichilín. Las conclusiones más destacadas que se pueden sacar a la vista de esos resultados son las siguientes:

1).- Los datos de ambos registradores confirman la evolución general de los puntos de control, pero realmente a efectos de control de la evolución piezométrica no aportan nada nuevo significativo que no hubiera podido deducirse de las medidas manuales realizadas mensualmente. Es más, con los fallos de medidas producidos hubiera sido más completa, en varios periodos, la información de la red convencional (que se tuvo que suspender en esos puntos al instalarse los equipos automáticos).

2).- Si se pretende analizar la respuesta detallada de los sondeos a bombeos próximos y la posible respuesta del acuífero a las lluvias estos equipos sí son imprescindibles y útiles, como muestra el gráfico de la figura 2.12, en el que se aprecian claramente diferentes

intervalos de bombeo en un sondeo situado a 24 metros del registrador y posibles ascensos piezométricos debidos a lluvias, aunque insuficientes para un análisis detallado por la escasez de periodos con datos completos debido a los fallos soportados.

**En definitiva, será necesario revisar a fondo ambos equipos (e incluso su ubicación) y quizá programar la recogida de datos y mantenimiento mensual in situ, o al menos cada vez que su consulta vía internet muestre problemas o signos que aconsejen su revisión.**

### **2.3.- REALIZACIÓN DE MUESTREOS ANALÍTICOS**

Dentro de este proyecto se había previsto la realización de un muestreo analítico de 30 puntos en el sector del acuífero carbonatado más favorable para el posible apoyo al abastecimiento en situaciones de emergencia. Para la realización del muestreo se seleccionaron 44 puntos en la zona septentrional del acuífero confinado, bien distribuidos espacialmente y situados en las inmediaciones de las conducciones generales del Consorcio de la Loma de Úbeda, elegidos preferentemente entre los que ya disponían de análisis en estudios anteriores: esencialmente el del IGME (2002 y 2003) y el del CEDEX (2003). En aquellos casos en que se habían detectado anomalías claras en muestreos preexistentes (puntos muy próximos a otros pero con valores de conductividad u otros parámetros muy superiores) se descartaron los puntos anómalos, dada la finalidad del muestreo. Algunos de los puntos preseleccionados eran alternativos a otros próximos para cubrir posibles incidencias durante el muestreo (sondeos fuera de uso, cerrados, etc...)

La campaña de muestreo se llevó a cabo entre los días 10 y 13 de Agosto de 2004, fechas elegidas por corresponder a la época de mayores extracciones y considerar que la calidad del agua debe ser representativa de condiciones similares a los posibles bombeos de abastecimiento (en máximo estiaje). Finalmente se visitaron 49 puntos (todos los seleccionados más otros cinco detectados durante el muestreo) hasta conseguir las 30 muestras bien distribuidas. Los cinco puntos detectados, tras comprobar su posible inclusión en inventarios preexistentes, han sido incorporados al listado de puntos "flash" (en concreto son los puntos FL-118 a FL-122, de los que 3 fueron muestreados por cubrir zonas de interés). Ello es una prueba más de la dificultad que supone el trabajo en la zona sin la existencia de un inventario completo y actualizado en una única base de datos. En todos los puntos muestreados se midieron in situ la

conductividad y temperatura del agua y se apreció cualitativamente la presencia o no de sulfhídrico (por considerarse un condicionante importante para su uso en abastecimiento) ya que de este parámetro no hay análisis cuantitativos hasta la fecha. En los puntos que fue posible se midió el nivel de agua o se obtuvieron datos del mismo. Los datos obtenidos en campo se incluyen en el cuadro del anejo 3.1 y los resultados analíticos se incluyen en el cuadro del anejo 3.2. Los análisis fueron llevados a cabo en el laboratorio del IGME el 6 de Octubre de 2004.

La situación de los puntos de muestreo se muestra en la figura 2.13.

Por lo que respecta al muestreo cabe destacar las siguientes observaciones:

a).- Tres de las muestras (FL-75, FL-115 y FL-116) hubieron de ser tomadas en goteros o balsas de riego, por no existir otro posible punto de toma más adecuado. Dichas muestras pueden contener abonos, y de hecho presentan anomalías más o menos significativas de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , K y DQO, entre otras posibles. En cualquier caso, tan solo la FL-116 mostraba espumas y claros síntomas de abonos, por lo que no se ha tenido en cuenta en la interpretación de resultados ni en el trazado de isolíneas para los distintos parámetros.

b).- De los 30 puntos muestreados solo en dos figura la columna litológica en el inventario del IGME y en otros 5 hay datos aproximados de otros inventarios (Flash 2001 y CHG, 2001). No obstante, un análisis de la profundidad de las captaciones permite comprobar que todas deben captar el acuífero Jurásico confinado, si bien el FL-45 y FL-78 (y quizá algunos otros ubicados sobre materiales detríticos del Mioceno superior) podrían presentar mezcla de aguas de ambos niveles productivos, que habrá que tener en cuenta si se observan anomalías significativas.

c).- Aunque los puntos con análisis previos fueron prioritarios para la selección, finalmente solo 13 de ellos disponen de análisis de las campañas de muestreo del CEDEX realizadas en el año 2002 y 4 son comunes con los muestreos del IGME de Mayo de 2001. A ese respecto cabe indicar que sería importante muestrear periódicamente una red de control de calidad en puntos estratégicos, para poder conocer la variación estacional de la calidad y su evolución en el tiempo. Ello aportaría además datos de interés sobre las relaciones del acuífero con el río Guadalimar y los mecanismos de renovación del agua. Para tal fin se ha diseñado una red de control compuesta en principio por 18 puntos (aunque se incluyen en

la propuesta otros 6 alternativos próximos a algunos de los anteriores para cubrir posibles eventualidades) cuyas características se resumen en el cuadro del anejo 3.4. Su situación se muestra también en la figura que se incluye en el citado anejo. Los criterios utilizados han sido los siguientes:

- Buena distribución espacial dentro del acuífero confinado.
- Disponibilidad de análisis en las campañas más significativas de análisis químicos realizadas hasta la fecha. Todos los puntos seleccionados disponen de al menos 1 análisis químico fiable y varios de ellos más (entre 2 y 5) de campañas recientes.
- Disponibilidad de coordenadas determinadas con GPS.

Aunque hubiera sido deseable para la mejor interpretación de los resultados analíticos, sólo en 4 de los puntos propuestos se dispone de columna litológica (3 del inventario CHG 2001 y otra del IGME), aunque todos ellos captan el acuífero jurásico confinado, si bien el nº FL-45 pudiera atravesar antes niveles productivos del Mioceno (y quizá también el FL-83, aunque no se le han detectado fenómenos de mezcla de aguas hasta la fecha).

Con los datos analíticos obtenidos se han ajustado mediante krigage (con el programa Surfer) diversos mapas de isoconcentraciones de los parámetros más significativos para la valoración general de la calidad del agua y otros de interés para determinar su posible uso en abastecimiento según la normativa vigente (Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero, publicado en el BOE de 21 de Febrero de 2003). En concreto se han elaborado los siguientes mapas:

- Conductividad y facies hidroquímicas
- Temperatura del agua
- Sulfatos
- Sodio
- Cloruros
- Nitratos
- Nitritos
- Ión amonio

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2.14 a 2.21 que muestran la distribución espacial y valores puntuales de los parámetros considerados. En todas ellas se ha marcado una línea aproximada, al sur de la cual se aprecia claramente la presencia de sulfhídrico, obtenida como se ha dicho de forma cualitativa al ser un parámetro no analizado. Con los datos analíticos se ha elaborado además el diagrama de Piper de la figura 2.22 que muestra la variabilidad de facies en este acuífero y su progresiva transición desde bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas en zonas septentrionales próximas al río Guadalimar, hacia sulfatadas cálcicas (o esporádicamente sódicas) en zonas intermedias y finalmente un predominio de facies cloruradas sódicas hacia el sur y hacia la parte central del acuífero, generalmente asociada a conductividades superiores a 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Con los datos analíticos de los muestreos realizados por el CEDEX en el año 2002, se ha hecho un tratamiento similar para contrastar los resultados del nuevo muestreo y conocer mejor la calidad del agua en los sectores de interés. Para ello se han seleccionado los análisis correspondientes a los muestreos de Mayo y Agosto de 2002, ya que en los de Octubre y Noviembre la campaña de riego había finalizado y los pozos se arrancaban para el muestreo, lo que puede implicar cambios de calidad más o menos significativos. Por otra parte, se han seleccionado sólo los puntos que captan el acuífero jurásico carbonatado (confinado o libre pero sin mezclas de otros posibles niveles productivos) incluidos tres manantiales. Los datos utilizados se adjuntan en el anejo 3.3. y la situación de los puntos de muestreo considerados se refleja en la figura 2.23. Con ellos se han elaborado mapas de isolíneas similares a los del muestreo 2004 que, se adjuntan en las figuras 2.24 a 2.29, (excepto para nitritos y amonio no disponibles en los análisis del CEDEX), y un diagrama de Piper (figura 2.30). Los ajustes realizados son totalmente coherentes con los del muestreo de 2004, aunque permiten en algunas zonas una mejor visión espacial al disponer de muestras sobre el acuífero libre, si bien en otros sectores (especialmente al oeste) son más incompletos. En cualquier caso los resultados obtenidos en ambos muestreos son muy similares, máxime si se considera la distinta distribución espacial de los puntos, los diferentes equipos de medida in situ y que los análisis fueron realizados por diferente laboratorio.

## **2.4.- RECONOCIMIENTO DEL ACUÍFERO CARBONATADO EN EL RÍO GUADALIMAR Y UBICACIÓN DE SONDEOS DE INVESTIGACIÓN PARA ANÁLISIS DE LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO.**

El río Guadalimar atraviesa el acuífero carbonatado de este a oeste, circulando sobre los materiales permeables en un trayecto de unos 20 km. Debe existir por tanto una estrecha relación entre el río y el acuífero, de tal forma que es posible que el río recargue al acuífero en unas zonas y en otras en cambio sea el acuífero el que descargue hacia el río.

Hasta ahora los estudios realizados no han podido establecer con precisión como es esta relación que, por otra parte, parece fundamental para establecer un modelo de funcionamiento hidrogeológico del acuífero coherente con los datos observados.

Además de las dudas expresadas existen otras importantes, tales como el espesor de carbonatos bajo el lecho del río, y si dicho espesor permite o no un trasvase de agua desde los afloramientos carbonatados de la margen derecha hacia la margen izquierda y en que cuantía. Por otra parte, los materiales triásicos que conforman la base del acuífero carbonatado presentan niveles de areniscas permeables cuya relación con el acuífero carbonatado no es bien conocida.

La investigación de estos factores ha de realizarse mediante la observación directa, a partir de la perforación de sondeos de investigación en ambas márgenes del río y cercanos a su cauce, y con el seguimiento de la evolución de niveles piezométricos y de las características hidroquímicas e isotópicas del agua, tanto durante la perforación como posteriormente.

Se propone por tanto la realización de once sondeos de investigación que alcanzarán profundidades de 100 a 150 metros y deberán perforarse, nueve de ellos (S-1 a S-9), mediante el método de rotación con recuperación de testigo continuo y los dos restantes (S-10 y S-11), mediante el método de rotoperCUSión, a lo largo de toda su longitud. Además en estos dos últimos sondeos se realizarán ensayos de bombeo de 48 horas de duración cada uno, con toma de medidas de recuperación a la finalización de ambos y con control de niveles en los pozos de bombeo y en los piezómetros próximos. En

el anejo 4 se resumen las características principales de los sondeos propuestos y se adjuntan sus croquis constructivos. Su situación se refleja en el mapa de la figura 2.32.

## **2.5.- AJUSTE DEL MODELO DE FLUJO MODFLOW EN RÉGIMEN TRANSITORIO.**

Dentro del estudio de viabilidad de la recarga del acuífero carbonatado jurásico (IGME, 2002 y 2003) se llevó a cabo, como mejora, la construcción de un modelo matemático preliminar de flujo del acuífero, basado en el programa Modflow (McDonald & Harbaugh, 1988), y su calibración en régimen estacionario, encaminado en principio a establecer la geometría general del acuífero y comprobar a grandes rasgos la coherencia del balance hídrico planteado en su definición (DGOHCA-IGME,2001). No obstante, el modelo permitía en principio su calibración en régimen transitorio, que no se llevó a cabo en su momento por no estar prevista ni ser posible en esas fechas ante la inexistencia de datos piezométricos y de explotaciones suficientes para tal fin. La obtención en el marco de este proyecto de los datos relativos a explotaciones por bombeo (con la mejor precisión con que es posible sin una revisión detallada de campo y análisis exhaustivo), ha permitido complementar el modelo con la fase de calibración en régimen transitorio, para el período Mayo de 2001 a Abril de 2003. Aunque el desconocimiento que aún persiste sobre la geometría del acuífero y sus relaciones con el río Guadalimar han supuesto un importante obstáculo para la convergencia y la correcta calibración del modelo, que impiden considerarlo como definitivo (lo que implicará su revisión posterior o su reconstrucción con los nuevos datos de sondeos previstos o que se obtengan en el futuro), dicho modelo se revela como una herramienta imprescindible para valorar el funcionamiento hidráulico general del acuífero, para prever su evolución en base a los datos de control piezométrico (ya disponibles o que se obtengan en el futuro) y, en definitiva, debe plantearse como una herramienta “viva” que se realimente periódicamente con esos nuevos datos y permita un seguimiento cuasi en “tiempo real” del citado acuífero, dada la problemática incipiente observada en el mismo y su indudable valor estratégico en una de las comarcas olivareras más dinámicas de Andalucía.

Los resultados obtenidos se incluyen y valoran detalladamente en el anejo 5, en el que se han incluido, para facilitar su mejor comprensión, las dos fases de calibración (en régimen permanente o estacionario y en régimen transitorio) si bien sólo esta última ha sido objeto del presente estudio.

Las conclusiones obtenidas del mismo, muy limitadas a efectos prácticos por las numerosas dificultades encontradas (que han obligado a replantear a lo largo de su ejecución tanto la geometría del modelo, para excluir sectores que en principio se consideraban incluidos en el acuífero pero luego se ha visto que son independientes, como la propia conceptualización del modelo, pasándolo de 2 capas a una sola por problemas de convergencia) se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Los resultados obtenidos en **régimen estacionario** resultan razonablemente válidos y confirman en principio los valores de recarga considerados y los de afloros de descargas hasta la fecha conocidos. El sector de acuífero confinado muestra unos niveles piezométricos situados en torno a los 400 m s.n.m., coherentes con los que cabría esperar en un régimen natural y en ausencia de explotaciones por bombeo. Desgraciadamente la primera campaña piezométrica del acuífero se realizó en mayo de 2001 (al inicio de la campaña de bombeos para riego) y la piezometría calculada queda significativamente por encima, lo que es lógico por otra parte ya que podía haber afecciones de años anteriores (la explotación masiva se inició a partir de 1995 y no hay datos de piezometría inicial).
- La calibración del modelo en **régimen transitorio** se **llevó a cabo en primer lugar con los datos del único ensayo de bombeo realizado en la zona**. Los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento finalmente adoptados como válidos han sido de 2200 m<sup>2</sup>/día de transmisividad y  $1,4 \cdot 10^{-5}$  para el coeficiente de almacenamiento, totalmente coincidentes con los obtenidos en la interpretación manual y semiautomática del ensayo de bombeo por los métodos habituales. Ello es prueba del adecuado funcionamiento de la zona confinada en el modelo y de la aceptable geometría modelizada en ese sector, además de confirmar plenamente la validez de los parámetros hidráulicos del acuífero en el mismo.
- El modelo transitorio ha sido también calibrado para el periodo de dos años Mayo 2001-Abril 2002, con un valor de transmisividad de 2200 m<sup>2</sup>/día, igual al del régimen estacionario, y un coeficiente de almacenamiento de  $1,4 \cdot 10^{-3}$ , dos órdenes de magnitud mayor que el calibrado en el ensayo de bombeo ( $1,4 \cdot 10^{-5}$ ). Tal valor implica que el grado de confinamiento aumenta de norte a sur (como es evidente, por otra parte, dada la geometría del acuífero), alcanzando valores propios de

acuífero libre al sur del río Guadalimar. En revisiones posteriores se deberá plantear la consideración de varias zonas con coeficiente de almacenamiento progresivamente inferior, una vez se disponga de datos reales o por definición de zonas aproximadas hasta tanto estén disponibles nuevos ensayos de bombeo fiables. El comportamiento de los piezómetros también se ha reproducido muy aceptablemente (excepto para el único situado en la parte libre del acuífero) pero no se ha conseguido reproducir la relación río-acuífero de forma coherente, ni tampoco el régimen de descarga de los manantiales, por lo que los datos de balance obtenidos no son en absoluto fiables. En efecto, no parece coherente que las descargas al río se mantengan tan elevadas ( $27 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) a pesar de los descensos de nivel provocados y simultáneamente se produzca un vaciado de reservas medio de unos  $45.5 \text{ hm}^3/\text{año}$  (superior a los bombeos considerados). Si se descuentan tales descargas del vaciado, el déficit de balance sería de unos  $18.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ , que aún parece elevado para la cuantía de bombeos existente (unos  $32.9 \text{ hm}^3/\text{año}$  en la zona modelizada). En cualquier caso, la serie de infiltración utilizada para el modelo es un 75 % más seca que la media sobre el acuífero, lo que reduciría ese posible déficit a  $13 \text{ hm}^3/\text{año}$ . El resultado obtenido tampoco se considera fiable a efectos de valorar la relación río-acuífero.

- En un último intento se ha simulado una serie de 10 años con bombeos idénticos e infiltraciones similares a las estimadas como medias para el acuífero, modificando la conductancia del río entre sus valores extremos previsibles, pero tampoco en este caso las descargas al río disminuyen sensiblemente, e incluso se incrementan si los valores de conductancia se establecen en su valor máximo dentro del rango preestablecido por formulaciones teóricas. Llama la atención que, a pesar de la importante disminución de reservas deducida por el modelo en esa simulación (unos  $600-800 \text{ hm}^3$ , totalmente incongruente con unos bombeos totales de  $330 \text{ hm}^3$  en ese periodo) los descensos de niveles calculados apenas superan los 15-25 metros en las distintas zonas del acuífero y parecen presentar un comportamiento asintótico, lo que puede interpretarse como una tendencia a un nuevo estado de equilibrio, que evidentemente no llega a alcanzarse puesto que el modelo no disminuye en modo alguno la descarga al río.

En definitiva, el modelo no ha permitido valorar de forma fiable si existe un posible déficit con el grado de explotación existente y mucho menos su cuantía, que hubiera sido uno de los resultados más fructíferos de cara a su gestión y para evitar una

futura evolución descendente nada deseable, pero se muestra como una herramienta imprescindible para tal fin y deberá ser revisado o reconstruido en el futuro, tan pronto como se disponga de información suficiente de las principales incógnitas que aún se plantean y que han dificultado, sin duda, el correcto funcionamiento del modelo.

**3.- ANÁLISIS DE SECTORES FAVORABLES PARA ABASTECIMIENTO URBANO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA**

### **3.- ANÁLISIS DE SECTORES FAVORABLES PARA ABASTECIMIENTO URBANO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA**

#### **3.1.- ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS POSIBILIDADES DE CONEXIÓN CON EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO CONJUNTO DE LA LOMA DE ÚBEDA.**

El abastecimiento a los núcleos que constituyen la Comarca de la Loma de Úbeda se basa esencialmente en el embalse de Aguascebas. Este embalse se construyó inicialmente con una capacidad de unos 4,4 hm<sup>3</sup>; sin embargo, a finales de los años ochenta fue necesario su recrecimiento debido a los problemas existentes para un normal suministro. Tras el recrecimiento de la cerrada del embalse, la capacidad del mismo pasó a ser de 6,37 hm<sup>3</sup> y el volumen regulado es de unos 3 hm<sup>3</sup>/año, por lo que no quedaba totalmente garantizado el suministro y se complementó con una toma y elevación de caudales del río Guadalquivir, junto al núcleo de Mogón. Dicha toma se planificó con una elevación primaria y otra secundaria dispuestas en serie (y constituidas por 6 grupos motobomba y uno de emergencia) y diseñadas para elevar caudales de hasta 270 l/s a una altura manométrica de 250 m cada una (Almendral Lucas, J.M., 1989).

La sequía de los años noventa puso de manifiesto la necesidad de incrementar nuevamente la garantía del suministro en la zona, además de estudiar la sustitución de la toma del río Guadalquivir, que presenta frecuentes problemas derivados de los arrastres producidos en los periodos de avenidas y como consecuencia de la calidad del agua captada. Para la consecución de estos objetivos se barajaron diversas alternativas. Por un lado se planteó la construcción de una nueva conducción que enlazara le E.T.A.P. de Las Copas en Villacarrillo con una toma en el río Guadalquivir, aguas abajo de la Cerrada de embalse del Tranco (Charco de la Pringue), de más de 20 km de longitud y una elevación de más de 200 m. Otra alternativa estudiada fue la utilización de las aguas subterráneas, tanto en el entorno del embalse de Aguascebas para apoyo del mismo en estiaje y sequía, como en la zona de la captación del río Guadalquivir en Mogón (COPTJA-ITGE, 1997; Ortuño Alcaraz, et al, 1996; Ortuño Alcaraz, et al, 2002; Rubio Campos et al, 2002). Finalmente se optó por la segunda alternativa, por ser de más fácil ejecución y más factible económicamente. Esta alternativa se encuentra actualmente en ejecución. Los acuíferos en los que se están realizando las actuaciones se incluyen en la Unidad Hidrogeológica de la Sierra de Cazorla (05-01).

En el presente trabajo se contempla la posibilidad de incorporar aguas procedentes del Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda, incluido en la U.H. de Úbeda (05.23), sobre la que se sitúan la mayoría de los núcleos abastecidos, como ya se sugería en estudios anteriores (DGOHCA-IGME, 2001; IGME, 2002 y 2003) y tras el interés verbal manifestado por algunos miembros del Consorcio.

En la figura 3.1 se presenta un esquema general del sistema de abastecimiento, que incluye algunas de las características de las conducciones existentes, de los depósitos de distribución y de los núcleos de población abastecidos. Dicho esquema se ha inspirado en el que aparece en un documento realizado en 1991 por la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, (Morientes, 1991) en el que se han actualizado sus datos.

El sistema de abastecimiento a la Loma de Úbeda integra a 30 núcleos de población con un total de 103 570 habitantes según la Revisión del Padrón Municipal para el año 2003 realizada por el INE. En el cuadro nº 2 se muestra un listado de los núcleos abastecidos y las cifras de población utilizadas.

**Cuadro ° 2. Datos de población de los núcleos incluidos en el Consorcio de la Loma de Úbeda obtenidos a partir de la Revisión de Padrón Municipal para el año 2003.**

<b>NÚCLEO</b>	<b>HABITANTES</b>
Santo Tomé	2269
Agrupación de Mogón	178
La Caleruela	252
Agrupación de Santo Tomé	77
Solana	284
Veracruz	121
El Molar	361
Valdecazorla	68
Arroturas	50
Mogón	1071
Iznatoraf	1235
Villanueva del Arzobispo	8761
Villacarrillo	11180
Torreperogil	7118
Sabiote	4143
Úbeda	33343
Baeza	15072
El Mármol	232
Rus	3762
Canena	2118
Íbros	3025
Lupión	1049
Guadalimar	321
Torreblasco Pedro	2916
Campillo	781
Begíjar	3030
Estación de Begíjar	88
Puente del Obispo	314
Sotogordo	101
Vados de Torralba	250
<b>TOTAL</b>	<b>103570</b>

El volumen de agua necesario para el abastecimiento es de 300 l/s si se considera una dotación media de 250 l/h/día y de 360 l/s si la dotación empleada es de 300 l/h/día. El consumo real según información facilitada por el Consorcio de Aguas de la Loma, oscila entre 600 000 y 900 000 m<sup>3</sup>/mes, con un volumen anual medio suministrado próximo a 8,5 hm<sup>3</sup>/a, equivalente a unos 267 l/s. Los máximos consumos se producen durante el periodo estival (julio y agosto) con un 20 % más de consumo sobre los restantes meses. Los caudales máximos suministrados oscilan entre 282 y 337 l/s (Sánchez-Pérez, 2002), equivalentes a puntas diarias de 24350 a 29125 m<sup>3</sup>/día.

Los núcleos con mayores consumos son Baeza, Úbeda y Villanueva del Arzobispo, con un valor conjunto próximo a 5 hm<sup>3</sup>/año, correspondiendo un valor de dotación próximo a 250 l/hab/día, valor que se reduce para el total de núcleos abastecidos a 230 l/hab.día.

En el entorno del embalse de Aguascebas se han construido 5 sondeos con una capacidad de media de suministrar 150 l/s y en el entorno de Mogón existen otros dos sondeos con una capacidad de suministro similar, pero con elevaciones del orden de 400 metros sin contar pérdidas de carga.

El suministro desde el Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda podría permitir un bombeo con elevaciones menores, como se verá más adelante, y por tanto, un abaratamiento en los costes de explotación, así como proporcionar un incremento en la garantía de suministro en años o periodos excepcionalmente secos.

### **3.2.- ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DELIMITACIÓN DE SECTORES FAVORABLES PARA ABASTECIMIENTO.**

La calidad del agua del acuífero carbonatado jurásico es muy variable espacialmente y su evolución temporal es poco conocida hasta la fecha. La salinidad del agua es también muy variable, reflejada en los valores de conductividad que suelen estar comprendidos entre menos de 700 y más de 3000 microS/cm. Las facies hidroquímicas presentes son casi todas las que se pueden distinguir en cualquier clasificación (con predominio de las bicarbonatadas cálcicas en unos sectores y cloruradas sódicas en otros y con numerosos tipos intermedios o mixtos), y las concentraciones iónicas presentan muy diferentes rangos de contenido según las zonas, que además pueden variar de forma significativa temporalmente e incluso en un mismo sector, y son dependientes del nivel acuífero captado.

El esquema de funcionamiento del acuífero, con paso de confinado a libre en una zona de tránsito también variable en su posición espacial según el grado de explotación general y en función de la intensidad de los bombeos en un momento determinado, y su relación (poco conocida en detalle) con el río Guadalimar (también variable temporalmente en función de los parámetros anteriores y de los caudales circulantes por el propio río) hacen que el sistema tenga una hidroquímica que se puede calificar de "compleja". Varios estudios han puesto ya de manifiesto la existencia de un

ambiente reductor en la zona de mayor grado de confinamiento, que provoca la reducción de sulfatos a sulfitos y, finalmente, provoca la presencia de sulfhídrico en el agua extraída (fenómeno poco o nada estudiado en la zona y del que se desconocen exactamente sus vías preferenciales de tránsito y/o liberación a la atmósfera, además de la vía artificial de los bombeos y sondeos abandonados). Por el mismo fenómeno los nitratos (abundantes en el sector libre por contaminación agrícola) se reducen rápidamente a nitritos y a ión amonio, presente frecuentemente como se ha visto en la zona central y meridional del sector confinado, y puesto claramente de manifiesto en el presente estudio por primera vez. También se ha puesto ya de manifiesto en otras ocasiones la elevada temperatura del agua, que por la geometría del acuífero y el gradiente geotérmico normal llega a alcanzar hasta 50 °C en la parte meridional, frente a valores habituales de unos 23 °C en el septentrional, al situarse el techo del acuífero a profundidades que superan los 700 metros y en una especie de "fondo de saco" que impide o dificulta enormemente la renovación natural del agua acumulada. Por último son conocidos los fenómenos de mezcla de aguas entre diferentes niveles productivos (esencialmente los del Mioceno, Jurásico y Trias) e incluso con niveles poco productivos pero que pueden alterar muy significativamente la calidad de algunas captaciones (en concreto determinados niveles lencejonares inmersos en el seno de las margas miocenas que confinan el acuífero, de los que casi nada se ha estudiado en detalle).

Por lo que respecta a la calidad del agua para abastecimiento es también muy variable, desde apta en condiciones naturales a francamente inadecuada e inútil para tal fin en otros sectores y de forma permanente, si bien los muestreos realizados hasta la fecha (al menos tres han sido sistemáticos y bien orientados) ponen de manifiesto una cierta estabilidad espacial de tales aptitudes. En cualquier caso es conocida, y se ha comprobado en el presente proyecto, la existencia de zonas con exceso de nitratos, nitritos, amonio, sulfatos, cloruros o sodio, entre otros iones posibles, con puntos que superan solo uno y otros que superan varios de ellos simultáneamente.

Con esta premisas, el establecimiento de sectores favorables para un uso tan exigente como es el abastecimiento urbano ha de llevarse a cabo con las máximas precauciones y la ubicación y ejecución de posibles captaciones ha de contar con todas las garantías y técnicas auxiliares disponibles para garantizar su éxito y evitar inversiones estériles.

**En base a los resultados de dos campañas de muestreo y análisis químico de las captaciones sobre el acuífero carbonatado (una específica para este**

**proyecto de Agosto de 2004 y otra del CEDEX de Mayo-Agosto de 2002 destinada a otros fines pero reelaborada e interpretada en el marco de esta asistencia técnica) se ha seleccionado una zona favorable para abastecimiento urbano dentro del acuífero carbonatado jurásico, al sur del río Guadalimar y en la zona próxima al actual tránsito de libre a confinado, cuya situación general se muestra en la figura 3.2 y en el mapa más detallado de la figura 3.3, que incluyen en ambos casos las características más significativas de la calidad del agua.**

Los criterios utilizados para la delimitación de esa zona han sido a grandes rasgos los siguientes:

- 1).- Proximidad a las actuales infraestructuras de abastecimiento del sistema.
- 2).- Inexistencia de gas sulfhídrico en el agua (establecida de forma cualitativa).
- 3).- Zonas de menor conductividad y temperatura del agua (inferiores, en general a 1000-1200 microS/cm y a 30 °C, respectivamente).
- 4).- Sin exceso en ninguno de los parámetros máximos establecidos al respecto en la normativa vigente al respecto (Real Decreto 140/2003 de 7 de Febrero, sobre criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano), respecto a los parámetros objeto de análisis.
- 5).- Que no se sobrepasen, en ninguno de los parámetros analizados, los máximos considerados como "indicadores" en el anexo 1-C del citado Real Decreto.
- 6).- Que las cotas de ubicación de captaciones no sean muy inferiores a 600-700 m s.n.m., dado que en cualquier caso su destino final sería la propia ETAP de las Copas (a cota aproximada de 840 m s.n.m.) o, preferiblemente (al menos si se quieren abaratar costes de energía eléctrica en el bombeo) las conducciones generales o depósitos próximos a la carretera Úbeda-Villacarrillo.

Con dichos criterios ha sido delimitada la "**zona favorable de captación**" cuyos límites se reflejan en los mapas de las figuras 3.2 y 3.3, correspondiente al municipio de Villacarrillo y situada inmediatamente al norte de la carretera general de Úbeda a Villacarrillo, de unos 500 a 1500 m de amplitud en sentido N-S. El límite sur de la misma queda a distancias variables desde 500 a más de 1500 m de la zona en que se ha detectado en Agosto de 2004 la presencia de gas sulfhídrico en el agua, y en cualquier caso tendría una cierta garantía a ese respecto ya que está muy próxima o sobre la vertical

del tránsito de acuífero libre a confinado, lo que facilitaría la liberación de ese gas y evitaría probablemente su acumulación en el acuífero en esa zona de captación.

### **3.3.- UBICACIÓN DE SONDEOS DE EXPLOTACIÓN PARA ABASTECIMIENTO DE EMERGENCIA.**

Para obtener una idea de las captaciones a realizar se han definido 4 posibles sondeos-tipo a lo largo de la zona favorable (sondeos A a D de la figura 3.3) y uno alternativo (sondeo A bis), cuyas características se muestran en el cuadro nº 3, en función de la información actualmente disponible.

Como se observa, sus profundidades estarían comprendidas entre 400 y 505 metros, con niveles estáticos variables desde 315 a 370 metros, con lo que la altura de impulsión hasta los respectivos puntos de entronque con la conducción general que discurre por la carretera general (en un tramo por gravedad), sería de unos 360 a 465 metros, supuesta siempre una depresión del nivel de unos 20 metros durante el bombeo, que se considera suficiente en sondeos bien contruidos y equipados para obtener caudales de explotación de 50 a 100 l/s por sondeo.

Lógicamente los datos aportados son válidos para una primera evaluación de costes de inversión y explotación, si bien el diseño definitivo deberá basarse en un estudio previo de detalle a nivel de anteproyecto, y en la realización de algún sondeo de investigación o preexplotación, con ensayo de bombeo de 48 horas de duración (preferiblemente en la época de estiaje) y una analítica completa de los parámetros requeridos para su uso en abastecimiento público.

Se considera también imprescindible la realización de una testificación geofísica de los sondeos previa a su entubación definitiva (o si no es posible, una vez entubados), y el meticuloso control técnico e hidrogeológico de todos los trabajos. Es posible que algunos de los sondeos requieran la cementación y aislamiento de tramos

Cuadro nº 3.- Características de los sondeos tipo para abastecimiento urbano en la zona favorable para tal fin

Sondeo	X UTM (km)	Y UTM (km)	Cota (msnm) 1/50000	Prof techo acuífero (m, según isobatas)	Prof máxima sondeo (m)	Prof N.E. Prevista (Marzo 2004)	Cota entronque conducción (m s.n.m.) (1)*	Impulsión previsible (m) (2)*	Conducción (m) (3)*	Observaciones
A	491,910	4218,990	750	360	485	370	745	395	< 300	Acuífero libre (90 m saturados)
A bis	491,900	4219,375	700	275	400	315	760	465	< 600	Acuífero libre (60 m saturados). Algo mejor calidad que A bis. Necesaria impulsión desde pozo
B	490,775	4217,735	730	380	505	370	720	370	< 300	Zona confinada (10 m carga)
C	488,370	4217,100	685	375	500	340	680	360	< 300	Zona confinada (35 m carga)
D	486,255	4216,235	680	340	465	333	675	362	< 300	Zona confinada (7 m carga)

(1)\*.- Cota aproximada del punto de entronque con la conducción general de abastecimiento de la carretera Úbeda-Villacarrillo.

(2)\*.- Se supone en todos los casos una impulsión equivalente a la altura geométrica incrementada en 20 metros (depresión de nivel supuesta en bombeo) y sin pérdidas de carga.

(3)\*.- Longitud de conducción orientativa hasta conectar por gravedad el sondeo con la conducción general.

intermedios. Todos los sondeos deben atravesar totalmente el acuífero carbonatado (salvo por causas justificadas a criterio del técnico hidrogeólogo que lleve su dirección) y todos deben parar inmediatamente en cuanto se detecten las arcillas triásicas.

Hay que destacar que uno de los sondeos de investigación propuestos en este proyecto para conocimiento geométrico del acuífero (en concreto, el denominado IGME 2) se sitúa precisamente junto a la conducción general de abastecimiento y en medio de los emplazamientos B y C que ahora se proponen, por lo que aportará sin duda valiosa información al respecto en caso de que se lleve a cabo.

En el anejo 6 se adjuntan croquis con las características constructivas de estos sondeos-tipo. El sondeo A bis es una alternativa del sondeo A que, en general, refleja los inconvenientes que supondría el acercamiento hacia el norte dentro de un mismo perfil (ya que implicaría atravesar parte del acuífero sin saturar o con cargas hidráulicas inferiores) si bien la calidad mejoraría ligeramente con ese acercamiento. Por otra parte, el descenso de las cotas de emboquille que se conseguiría tampoco tendría sentido al tenerse que incorporar el agua a la misma conducción y con igual elevación (salvo en el caso de que existiese algún posible depósito próximo, que habría que considerar específicamente), e incluso complicaría la instalación al requerir otra impulsión entre el sondeo y la conducción general.

#### **3.4.- RECOMENDACIONES DE EXPLOTACIÓN PARA USO URBANO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA.**

Para complementar el suministro de la comarca de la Loma de Úbeda bastaría con la ejecución de tres a cinco sondeos de características similares a las indicadas en el apartado 3.3, en función de los caudales unitarios finalmente obtenidos, que permitirían obtener caudales conjuntos suficientes para atender, por sí mismos, los consumos existentes en el sistema (con puntas diarias de 280 a 340 l/s).

El bombeo para tal fin, en condiciones de extrema necesidad (por averías de otros elementos del sistema) o en condiciones de sequías prolongadas y durante plazos de unos pocos meses, no supondría detrimento alguno para el acuífero por su escasa cuantía relativa e incrementaría al 100% la garantía de suministro del sistema, con un coste inferior del precio del agua de este origen, si lo comparamos con el coste de

**elevación de los sondeos del entorno de Mogón o las actuales impulsiones de la toma del río.**

**En cualquier caso, como complemento al sistema actualmente existente (embalse del Aguascebas, sondeos del entorno del Aguascebas y sondeos de Mogón) sería prudente limitar las posibles extracciones para abastecimiento de este acuífero a un máximo de 1-2 hm<sup>3</sup>/año, lo que permitiría el suministro de los consumos existentes durante una media de 1,5-3 meses/año, o bien durante 7-14 meses consecutivos si el bombeo se produjese solamente en condiciones excepcionales de sequía (cada 5-10 años, por ejemplo), en tanto se mejora el conocimiento sobre el grado de explotación real que presenta el acuífero carbonatado jurásico de la Loma de Úbeda.**

#### **4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Por lo que respecta al objetivo final del estudio, complementar el abastecimiento urbano de la comarca de la Loma de Úbeda con aguas de este acuífero, los principales resultados obtenidos se resumen en los siguientes puntos:

- 1) A pesar de la complejidad hidroquímica del acuífero y de la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua, se considera viable obtener aguas de calidad adecuada para el abastecimiento y para tal fin se ha delimitado, a escala 1/50000, una “ZONA FAVORABLE DE CAPTACIÓN” en base al riguroso análisis de 2 campañas de muestreo sistemáticas disponibles sobre el acuífero, que habrá que confirmar con mayor detalle.
- 2) Se han diseñado 5 sondeos-tipo para abastecimiento que abarcan toda la zona favorable, con profundidades variables de 400 a algo más de 500 metros, en los que se calculan impulsiones de 360 a 465 metros desde el nivel estático hasta las conducciones generales de abastecimiento, suficientes para suministrar caudales de 50 a 100 l/s por sondeo con una adecuada ejecución. Los niveles estáticos estarían a profundidades variables de 315 a 370 metros en la citada zona favorable, y los sondeos quedarían a menos de 300-1000 metros de las conducciones generales en todos los casos.

- 3) Bastaría, en principio, con la ejecución de 3-5 sondeos de ese tipo, que permitirían suministrar, llegado el caso, caudales punta conjuntos de 280 a 340 l/s, equivalentes a las puntas estivales de consumos diarios registrados hasta la fecha.
- 4) La utilización de tales captaciones se limitaría a un máximo de 1-2 hm<sup>3</sup>/año, cantidad que en principio no tendría una repercusión significativa en el balance general, pero que permitiría incrementar la garantía del suministro urbano al 100% ante eventuales sequías o en casos de avería de otras instalaciones. Tal volumen permitiría cubrir totalmente los consumos durante una media de 1,5 a 3 meses por año con aguas de este origen y a costes razonables, similares o inferiores a los actuales de otras fuentes, o incluso mantener el sistema durante periodos de 7-14 meses consecutivos si fuese necesario, si la explotación se limita a condiciones excepcionales de sequías más persistentes (cada 5 –10 años).

**En definitiva, las actuaciones planteadas para este fin se consideran suficientemente atractivas para su análisis más detallado, a nivel de anteproyecto, que deberá apoyarse en los nuevos datos que se espera obtener con las investigaciones y sondeos de reconocimiento antes planteados.**

**El estudio realizado supone, por otra parte, un importante avance en el conocimiento del acuífero carbonatado jurásico de la Loma de Úbeda, y en particular sobre las posibilidades de complementar el abastecimiento de la comarca de La Loma desde el mismo, que aporta esencialmente los siguientes datos de interés:**

- a) 40 medidas piezométricas realizadas del 17 al 19 de Marzo de 2004, en condiciones de aguas altas, que constituyen la mayor campaña sistemática realizada hasta la fecha.
- b) 97 medidas de control de la evolución piezométrica en los mismos puntos de la red previamente medida por el IGME entre 2001 y 2002, que se ha ampliado, con lo que ya se dispone de 3 años de piezometría.
- c) Cuatro campañas de aforos de descargas naturales del acuífero carbonatado, con un total de 79 aforos y 84 secciones visitadas.

- d) El muestreo y análisis químico de 30 puntos representativos del acuífero confinado entre los días 10 y 13 de Agosto de 2004, y la reinterpretación de otra campaña de 25 puntos realizada por el CEDEX en el año 2002 (Mayo a Agosto). La llevada a cabo en el proyecto es la más completa sobre el acuífero confinado disponible hasta la fecha en un intervalo corto de muestreo (3 días) y aporta datos desconocidos hasta ahora sobre la presencia de gas sulfhídrico en el agua y sobre otros parámetros de interés.

En base a la nueva información disponible e integrando la de estudios anteriores se aportan los siguientes mapas a escala 1/200.000 del acuífero Carbonatado Jurásico:

- Isopiezas de Marzo de 2004.
- Isodescensos del período Mayo 2001 a Marzo de 2004.
- 8 mapas de isolíneas para diferentes parámetros analizados en Agosto de 2004 y otros 6 elaborados con el muestreo del CEDEX de Mayo-Agosto de 2004.
- 1 mapa de explotaciones por bombeo, y de su agrupación a efectos del modelo de flujo del acuífero.
- 1 mapa de zonas favorables para el uso del agua del acuífero en abastecimiento urbano. Su situación se precisa en otro mapa a escala 1/50.000, con 5 sondeos tipo útiles para tal fin, que cubren toda la zona favorable delimitada.

Además de esa información espacial, se han elaborado 8 gráficos de evolución piezométrica con todos los datos disponibles hasta Octubre de 2004, representativos de los distintos sectores del acuífero y de sus relaciones entre sí, y otros gráficos de interés para sintetizar el resultado de las campañas de aforos, los análisis químicos, u otros aspectos objeto del estudio. También se han definido 11 sondeos de reconocimiento para el análisis de las relaciones río-acuífero y otros 16 para mejora del conocimiento geométrico del acuífero confinado y como posibles piezómetros.

Por último cabe destacar la calibración del modelo de flujo en régimen transitorio, tanto con los datos de un bombeo de ensayo de corta duración, pero altamente fiable, como para el período comprendido entre Mayo de 2001 y Abril de 2003, que incluye

dos campañas de riego. Los resultados obtenidos, muy aceptables en general, no han conseguido sin embargo reproducir las relaciones río-acuífero, ni comprobar de forma fiable el balance de recarga-explotación del acuífero, extremo que se considera de vital importancia para su adecuada explotación racional en el futuro inmediato, máxime ante la evolución descendente de amplios sectores del mismo que, en algunas zonas concretas, ha provocado ya una dinámica nada deseable de abandono de captaciones y perforación de otras nuevas.

**A pesar del indudable avance que ha supuesto la realización de este estudio para el conocimiento del acuífero, las incógnitas que aún persisten sobre determinados aspectos de su geometría, funcionamiento hidráulico y balance justifican sobradamente que se prosiga la investigación e incluso se incrementen los medios destinados hasta la fecha para tal fin, como único medio de evitar graves problemas en el futuro para una de las zonas más dinámicas de Andalucía en el desarrollo del olivar de regadío y que ha experimentado un fuerte auge económico en los últimos 10 años gracias al mismo.**

No obstante, con estas premisas y considerando que “es imposible gestionar sin conocer”, uno de los principales resultados prácticos del estudio es la **propuesta de nuevas actividades de investigación hidrogeológica en la zona, que aunque ya esbozadas a lo largo del informe se resumen en las siguientes recomendaciones:**

- 1) Es imprescindible la revisión, contraste y unificación de los inventarios disponibles en una sola base de datos georeferenciada y con coordenadas UTM obtenidas con GPS. En concreto debería incluir, como mínimo, todos los puntos con bombeos significativos, todos los que dispongan de columnas litológicas fiables (instalados ó no), de análisis químicos y de medidas piezométricas, así como los abandonados sin sellar. Debe prestarse especial atención a los datos de explotaciones por bombeo, superficies, dotaciones de riego y titulares, así como a la fecha de ejecución y la evolución estimada de los bombeos realizados hasta la fecha.

- 2) Se propone una red de control piezométrico más completa pero que integra la ya existente, en la que deben proseguir las medidas con carácter mensual hasta que esté disponible y operativa la red nacional prevista.
- 3) Se propone proseguir las campañas de aforo pero reducidas a las 7-9 secciones de mayor interés y con carácter mensual durante los próximos 2 años, para luego reestructurarla si es preciso con los nuevos datos disponibles.
- 4) Se ha diseñado una red de control de la calidad compuesta por 18 puntos (más 6 alternativos) que se propone para su control periódico mensual durante las campañas de riego y trimestral el resto del año (unos 8 análisis al año en cada punto) durante 1 año, para su posterior reestructuración al final de ese año tras interpretar los datos obtenidos. Los puntos más próximos al río y los de referencias FL-39, FL-26, FL-33, M-5 Y FL-17, que definen a grandes rasgos un perfil N-S del acuífero confinado, deberían incluir determinaciones isotópicas con igual regularidad. En todas las campañas se determinará in situ la conductividad, temperatura y pH del agua, además de la presencia de gas sulfhídrico.
- 5) Se considera urgente la realización de los 11 sondeos de reconocimiento próximos al río Guadalimar y de los 16 propuestos en el sector confinado, que deberán contar en todo caso con un estricto control hidrogeológico y con los medios técnicos adicionales para obtener los mejores resultados (testificación geofísica, medidas de flujos, ensayos de bombeo con piezómetros siempre que sea posible, control sistemático de la calidad/temperatura del agua y presencia o aparición de gas sulfhídrico, etc...).
- 6) Por último, se propone la reconstrucción o revisión del modelo de flujo del acuífero, para lo que se indican las siguientes pautas a raíz de las conclusiones obtenidas y las dificultades encontradas en el ya realizado:
  - Consideración de una geometría mejorada con las nuevas columnas litológicas disponibles con posterioridad al año 2000, fecha en que se hicieron las isolíneas del techo del acuífero en las que se basa el actual modelo. Esta actividad no se considera prioritaria ni imprescindible, dada la adecuada respuesta de la zona confinada en el modelo actual,

aunque sí es imprescindible reconstruir la zona de acuífero libre con los datos obtenidos de los sondeos piezométricos propuestos.

- Establecimiento de una zonación del modelo en base al coeficiente de almacenamiento para todo el sector situado al sur del río Guadalimar, que considere su progresivo incremento desde valores correspondientes a acuífero libre hasta el de  $1 \times 10^{-5}$  determinado en el ensayo de bombeo disponible, e incluso inferiores más al Sur. Tal zonación puede basarse en los nuevos datos de ensayos de bombeo que se obtengan, o hacerse de forma razonable según las cargas hidráulicas sobre el techo del acuífero ya conocidas.
- Como resultado del inventario más completo que se propone deben obtenerse datos más fiables de los bombeos existentes y, si es posible por métodos aproximados, de su evolución global en el tiempo (a nivel anual). En cualquier caso las explotaciones reflejadas en este informe se consideran suficientes y bien distribuidas espacialmente a efectos del modelo, excepto en el sector de acuífero libre al norte del Guadalimar, y en el sector de Villanueva del Arzobispo. Este último debe ser objeto de un estudio específico detallado, como ya se indicó anteriormente, por su desconexión y estado actual.
- Calibración en régimen permanente y transitorio, con nuevos datos de manantiales a nivel mensual y para todo el periodo de datos de evolución piezométrica disponible en el momento de calibración (mínimo 4 años si prosigue la red actual). Después deberá simularse un periodo de 20-30 años representativo de la recarga media interanual, con bombeos supuestos razonablemente.
- Si no se consigue simular adecuadamente la relación río acuífero deberán obtenerse datos válidos al respecto por otras vías. En cualquier caso se aconseja una primera fase de pruebas en la que el río se mantenga inactivo, que puede permitir avanzar más rápido y obtener algunas conclusiones de interés.

- Por último se propone complementar el modelo de flujo con otro de transporte de solutos de las sustancias más significativas (incluidos isótopos estables si ello es posible en el estado actual de conocimientos). Para ello es imprescindible el establecimiento inmediato de la red de control de calidad, hoy inexistente.

Granada, 30 de Noviembre de 2004.

**EL CONSULTOR,**

Fdo: Javier Gollonet Fernández de Trespalacios  
Geólogo, especialista en Hidrogeología.  
Colegiado nº 20 del ICOGA y 370 del ICOG.

**Vº Bº,**  
**EL DIRECTOR DEL PROYECTO,**

Fdo: Juan Carlos Rubio Campos