

**INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA SOBRE MASAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CON PROBLEMAS DE EXPLOTACIÓN EN LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR, PROPUESTA DE USO SOSTENIBLE (ALTO GUADALQUIVIR). 2015-2017. 2ª FASE.**

INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA SOBRE MASAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CON PROBLEMAS DE EXPLOTACIÓN

**Loma de Úbeda (Alto Guadalquivir)**

**INFORME RECOPIULATORIO SOBRE LOS ACUÍFEROS DE LA LOMA DE ÚBEDA**

**TOMO XIV**

**NOVIEMBRE 2016**

## ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO
2. ANTECEDENTES
3. DESCRIPCIÓN DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA 05.23 ÚBEDA
4. METODOLOGÍA
  - 4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DEL ACUÍFERO.
    - 4.1.1 El modelo geológico 3D
      - 4.1.1.1 Elementos del modelo. Superficies de Referencia y Fallas
      - 4.1.1.2 Software utilizado en la modelización 3D
      - 4.1.1.3 Procesado de la información
    - 4.1.2 Perfiles gravimétricos
  - 4.2 PIEZOMETRIA
  - 4.3 RELACIONES ENTRE EL RÍO GUADALIMAR Y LOS ACUÍFEROS JURÁSICO Y TRIÁSICO
  - 4.4 HIDROQUÍMICA E ISÓTOPOS AMBIENTALES
5. RESULTADOS
  - 5.1 CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DEL ACUÍFERO
    - 5.1.1 El modelo geológico 3d
    - 5.1.2 Perfiles gravimétricos
  - 5.2 PIEZOMETRIA
  - 5.3 RELACIONES ENTRE EL RÍO GUADALIMAR Y LOS ACUÍFEROS JURÁSICO Y TRIÁSICO
  - 5.4 HIDROQUÍMICA E ISÓTOPOS AMBIENTALES
    - 5.4.1 Características físico químicas generales
    - 5.4.2 Estudio de las mezclas de aguas. El Análisis de Componentes Principales (ACP)
    - 5.4.3 Estudio de las variaciones temporales
    - 5.4.4 Características del contenido en isótopos estables del agua subterránea
6. CONCLUSIONES
7. RECOMENDACIONES
8. REFERENCIAS

## Autores:

Dirección de los trabajos, piezometría, hidroquímica e isótopos: Antonio González Ramón

Relaciones Río Guadalimar y los acuíferos Jurásico y Triásico. Antonio González Ramón y Javier Heredia Díaz

Modelo geológico 3D: Carlos Marín Lechado

Perfiles gravimétricos: Ana Ruiz Constan y Jesús Galindo Zaldívar (Universidad de Granada)

## 1. RESUMEN EJECUTIVO

En este informe se detallan los trabajos realizados en los acuíferos de la Loma de Úbeda entre los años 2012 y 2015. Se describen los acuíferos implicados en la gestión de la MASb 05. 23 Úbeda, y los trabajos llevados a cabo para su caracterización geométrica. Estos trabajos han permitido la elaboración de un modelo geológico 3D que permite definir en detalle la superficie de los muros de las formaciones miocena, jurásica y triásica, incluyendo los elementos estructurales que las afectan, como fallas, pliegues etc. El modelo geológico realizado permite comprender mejor las relaciones hidrogeológicas entre acuíferos en aspectos sobre cómo y dónde se pueden producir transferencias de aguas entre ellos. Por otra parte, este trabajo debe ser aprovechado para rehacer el modelo matemático de flujo previamente definido, pues supondrá una mejora importante en el mismo. Además, es una herramienta ideal para realizar futuros estudios sobre volúmenes de reservas de agua almacenadas en los acuíferos y sus variaciones.

Se han realizado 8 campañas de medidas piezométricas en la MASb si bien, de los 21 piezómetros que han estado tradicionalmente controlándose ha habido que reducir las medidas a 11 puntos y han dejado de ser operativos 4 de los sensores que previamente estaban instalados. Por otra parte se ha incorporado un nuevo piezómetro a la red.

En la zona profunda del acuífero jurásico confinado las medidas indican que desde el año 2009 se ha producido una estabilización del nivel piezométrico con cotas variables entre 305 y 310 m s.n.m. y un descenso total desde el inicio de los controles en 2001 de 50 m. En la zona libre del acuífero jurásico libre, cerca de los márgenes del río Guadalimar, los niveles se mantienen más o menos estabilizados a lo largo del periodo de medidas. Sin embargo, la mayor parte de las extracciones en esta zona se realizan en el acuífero triásico, donde no hay un control de niveles piezométricos suficiente para conocer su estado.

El informe también analiza las variaciones temporales mensuales en las características físico-químicas e isotópicas del agua bombeada en 11 sondeos profundos, en una galería excavada en areniscas miocenas y en el río Guadalimar. Los datos que han permitido este estudio fueron recopilados entre los años 2008 y 2010. La información obtenida muestra la existencia de zonas con mezclas de aguas relacionadas con areniscas miocenas, margas miocenas, carbonatos jurásicos y areniscas y arcillas triásicas. Además, se observa en algunos puntos la influencia de aguas que circulan por el río Guadalimar. Esto ha permitido una mejor comprensión del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

Finalmente se realizan una serie de recomendaciones sobre mejoras que deben llevarse a cabo para el control de la MASb, posibles trabajos futuros a abordar y posibles actuaciones para mejorar su gestión.



## 2. ANTECEDENTES

Los trabajos para el seguimiento del estado de explotación del acuífero de la Loma de Úbeda se enmarcan en el Convenio de Colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y el IGME (periodo 2012-2015). El acuífero investigado está incluido en la Masa de Agua Subterránea 05.23. (PHG, 2013) del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.

La MASb Úbeda se encuentra situada en el curso alto del Guadalquivir en su margen derecha, entre los materiales del Zócalo Paleozoico, al norte y noroeste, los del Prebético de Cazorla al este y las Unidades Olitostromicas de la Depresión del Guadalquivir al sur y está constituida por formaciones de la Cobertera Tabular de la Meseta. Sus límites iniciales fueron definidos en el catálogo de unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares (MOPU-IGME, 1988); en 1993 se elaboró su correspondiente norma de explotación (ITGE-CHG, 1993) y en 1994 se realizó una primera revisión de dicha norma (DGOH, 1994).

El IGME comenzó la investigación del acuífero en 1995, con motivo de la elaboración del “Proyecto de actualización de la infraestructura hidrogeológica de las Unidades de Cazorla, Quesada, Segura y Loma de Úbeda” que finalizó en 2001 (DGOH-IGME, 2001). Este proyecto fue realizado en el marco de los convenios de colaboración establecidos con la Dirección General de Obras Hidráulicas del MIMAN. En 2001 se elaboró la Norma de Explotación de la U.H. 05.23 Úbeda, que establece los límites actualmente aceptados y define los acuíferos implicados. Posteriormente, organismos como el IGME y el CEDEX, en colaboración con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía y la Diputación Provincial de Jaén han llevado a cabo sucesivos proyectos de investigación en la zona.

En 2004, el IGME realizó un trabajo en el marco del convenio de colaboración entre el IGME y la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía para estudiar las posibilidades de integrar el sector norte del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda en el abastecimiento a la Loma. El IGME también realizó un estudio preliminar sobre las posibilidades de recarga artificial con excedentes de agua de los ríos Guadalimar y Guadalquivir, proyecto que finalizó en 2005.

Entre 2005 y 2007 el IGME realizó una serie de trabajos que incluyeron la perforación de 14 sondeos piezométricos de investigación para estudiar las relaciones entre el río Guadalimar y el acuífero jurásico y la zona libre del acuífero jurásico. Desde el año 2001, se mantiene de manera más o menos continuada una red de control piezométrico, que ha sido posible seguir gracias al desarrollo de los diferentes proyectos referidos. Otros trabajos consistieron en la realización de un primer intento de modelización matemática del acuífero jurásico.

El trabajo más reciente realizado por el IGME (CHG-AAA-IGME 2012) en el marco del “Acuerdo de encomienda de gestión para el desarrollo y ejecución de diversos proyectos en materia de aguas subterráneas, acuíferos, redes de observación hidrogeológica y explotación de masas de agua” entre el IGME y el Organismo de Cuenca. El documento generado en este proyecto consta de 4 Tomos, dos de ellos de anejos. Este extenso informe aborda diversos aspectos de

los distintos acuíferos que componen la MASb y plantea un novedoso modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico que explica satisfactoriamente las observaciones realizadas hasta la fecha. Sobre la base de este modelo conceptual, se desarrolla un modelo numérico tridimensional de flujo que integra los tres acuíferos principales. En función de los resultados obtenidos se plantea un marco de explotación por sectores con el objetivo de alcanzar la sostenibilidad en la explotación del acuífero. Otro aspecto que aborda este trabajo es el análisis de la explotación conjunta entre los acuíferos de la Loma de Úbeda, los embalses superficiales y la regulación general del Alto Guadalquivir.

Por otra parte, el CEDEX, a instancias de la CHG ha realizado dos trabajos (2001 y 2006) enfocados al estudio hidroquímico e isotópico del agua subterránea en el acuífero jurásico. También la CHG junto con la empresa colaboradora CGS realizó en 2005 un informe denominado “diagnóstico sobre el acuífero 05.23 de la Loma de Úbeda y redacción de recomendaciones de actuación, TM. Úbeda (Jaén)”.

Las publicaciones de artículos en revistas, jornadas y congresos han sido numerosas, la mayoría de ellas centradas en el acuífero jurásico. La más antigua data de 1998 y fue publicada por investigadores de la Universidad de Linares (Rey *et al.*, 1998) en la Revista de la Sociedad Geológica de España. Los artículos posteriores se centran en aspectos como la geometría, piezometría, relaciones río acuífero, gestión, hidroquímica, isótopos ambientales y radioactivos, modelización matemática, etc. y han sido publicados por investigadores del IGME, CEDEX, CHG y geólogos consultores que han colaborado en los proyectos de investigación (Gollonet, *et al.* 2001 y 2008; González-Ramón, *et al.* 2002, 2008, 2012, 2013a y b; Rubio-Campos, *et al.* 2004; Araguás-Araguás, *et al.* 2004; Martín-Montañés, *et al.* 2005, Núñez, *et al.* 2005, 2006 y 2008; Rodríguez *et al.* 2007, Heredia *et al.* 2008, 2009, 2011, 2012, 2013a y b y 2014; Palancar y Sánchez-Biec, 2008; Angoloti-Apolinario *et al.* 2008; Gómez-Gómez *et al.* 2012, Ortega *et al.* 2012; De la Varga *et al.* 2013; Pedrera *et al.* 2013 y Morales *et al.* 2014).

En 2007 se publicó, en el marco de colaboración entre el IGME y la Asociación Española de Usuarios de Aguas Subterráneas (AEUAS), un libro que resume el estado de las investigaciones hasta esa fecha. (González-Ramón, *et al.* 2007).

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA 05.23 ÚBEDA**

La poligonal que define la MASb ocupa una superficie de 1173 km<sup>2</sup> y se sitúa en el sur de España, unos 60 km al noreste de la ciudad de Jaén (Figura 1).

Los sedimentos objeto de estudio que constituyen los materiales acuíferos y sus límites, conforman una serie mesozoica y cenozoica que recubre el borde suroriental de la Meseta Ibérica. La Meseta Ibérica está formada por materiales precámbricos y paleozoicos ligeramente metamorizados que fueron plegados durante el Carbonífero.

En el Triásico la sedimentación se inició sobre un paleorelieve paleozoico, con carácter continental detrítico excepto en sus tramos superiores donde adquiere carácter evaporítico. El

espesor medio es algo superior a 300 m. El tramo detrítico está constituido por paquetes de areniscas que se intercalan entre lutitas, sobre estos niveles se sitúa un tramo superior lutítico evaporítico con presencia de yeso.

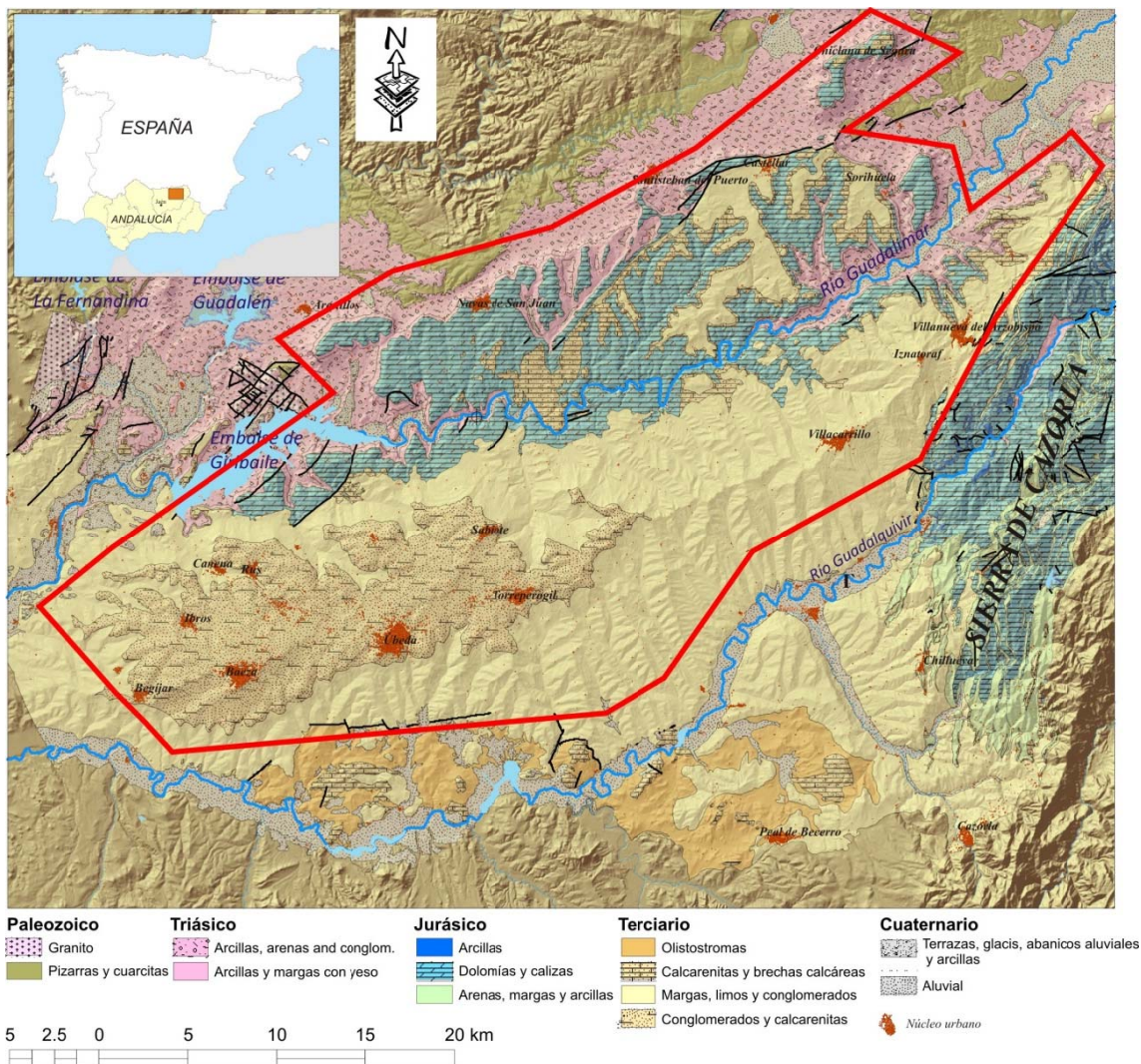


Figura 1. Contexto geológico y geográfico de la MASb 05.23 Úbeda

La secuencia jurásica está constituida por un paquete de carbonatos en continuidad sedimentaria con los materiales triásicos. Los carbonatos presentan un tramo inferior de calizas laminadas, a veces pseudoolíticas, localmente brechificadas y un tramo superior de dolomías brechoides, carniolas y dolomías laminadas.

Hacia el sur, los carbonatos jurásicos están recubiertos por una potente serie margosa del Mioceno superior, si bien, a techo y a muro aparecen lentejones detríticos (areniscas y calcarenitas con intercalaciones margosas a techo, y de arenas y conglomerados en la base que desaparecen lateralmente). El espesor de los materiales miocenos suele variar entre 200 m y 500 m.

Los sedimentos del Jurásico y del Triásico que recubren el zócalo paleozoico aparecen en posición subhorizontal, ligeramente plegados y afectados por fracturas de dirección principal



NE-SO, con saltos que pueden superar los 100 m y que configuran un relieve afectado por fosas y umbrales aplanado por los procesos erosivos. Constituyen una altiplanicie basculada hacia el sur, marcada por los materiales competentes que conforman las areniscas triásicas y los carbonatos jurásicos, que en su mitad meridional aparecen recubiertos por margas y calcarenitas terciarias. En estos últimos materiales, más modernos, la erosión diferencial ha labrado una superficie con una morfología alomada, con las cotas más elevadas en torno a 800 m s.n.m., donde se ubican los principales núcleos de población (Figura 1).

La precipitación media en la zona está comprendida entre 525 y 640 mm/año. La distribución temporal de las precipitaciones es la característica de Clima Mediterráneo, con los periodos más lluviosos en el otoño (octubre a diciembre) y la primavera (marzo a mayo) y en menor medida el invierno, y con un estiaje (julio y agosto) con ausencia casi total de precipitaciones.

Los principales acuíferos que se diferencian son (Tabla 1):

- Acuífero Triásico: se trata de un acuífero de tipo multicapa constituido por areniscas intercaladas entre arcillas. Conforman el nivel explotado inferior, tiene un espesor en torno a 200 m y está separado del Acuífero Jurásico por una capa de lutitas evaporíticas de baja permeabilidad con una potencia comprendida entre 50 y 95 m.
- Acuífero Jurásico: formado por un paquete de carbonatos de entre 80 y 100 m de espesor y elevada permeabilidad. En la zona en que se encuentra confinado por sedimentos miocenos, a veces, aparece recubierto por arenas o conglomerados del acuífero Mioceno Inferior en continuidad hidrogeológica.
- Acuífero Mioceno Inferior: discontinuo y con espesores de entre 10 y 50 m, generalmente se encuentra conectado hidráulicamente al Acuífero Jurásico.
- Acuífero Mioceno Superior: Aparece separado de los anteriores por una potente capa de margas miocenas, presenta un comportamiento multicapa formado por calcarenitas y areniscas con intercalaciones de margas. Su espesor no suele superar 100 m.

Los afloramientos del Jurásico y del Triásico aparecen divididos de NE a SO por el río Guadalimar (Figura 1) a lo largo de más de 40 km, con entrada por su extremo nororiental, a cotas en torno a 440 m s.n.m., y salida por el SO, a unos 340 m s.n.m. En su salida se sitúa la cola del embalse de Giribaile, que recubre parte de los sedimentos triásicos. El caudal medio del río, en este sector, es de unos 4,5 m<sup>3</sup>/s.

Las características litológicas y geométricas del Acuífero Triásico bajo los carbonatos jurásicos se desconocen en detalle, si bien, se sabe que es captado por diversos sondeos situados en la margen izquierda del río Guadalimar, al sur, y por la mayoría de los sondeos situados en su margen derecha, al norte, donde es el principal acuífero explotado.

SISTEMA	SERIES EDAD	LITOLÓGIA	ACUÍFERO
Cuaternario	Holoceno Pleistoceno	Aluvial	Aluvial del Guadalquivir y Guadalimar
Terciario	Mioceno S.	Messiniense-Tortonense S.	Acuífero Mioceno Superior
		Tortonense S.	
		Tortonense I.	Acuífero Mioceno Inferior
	Miocene M.	Olistostromas	
Jurásico	Lías	Dolomías y calizas	Acuífero Jurásico
Triásico	Norien.-Carnien.	Arcillas y margas con yeso	
	Ladiniense	Arcillas, areniscas y conglomerados	Acuífero Triásico
Paleozoico	Carbonífero S.	Granito	
	Carbonífero-Devónico	Pizarras y cuarcitas	

Tabla 1. Relación entre la estratigrafía y los acuíferos de la zona.

El Acuífero Jurásico tiene una superficie aproximada de 875 km<sup>2</sup>; su tercio norte, de unos 250 km<sup>2</sup>, funciona como acuífero libre y en la mayor parte del mismo afloran los carbonatos, si bien, localmente se encuentran cubiertos por restos discontinuos de materiales margo-arenosos del Mioceno. Hacia el sur, el acuífero está confinado por margas miocenas, sobre las que se sitúa, en el suroeste, el Acuífero Mioceno Superior. La superficie aproximada de la zona confinada es de 625 km<sup>2</sup>, con el techo del Acuífero Jurásico situado por debajo de 300 m de profundidad en más del 70 %. Los límites del sector libre están definidos por materiales triásicos sobre los que reposa el acuífero. Hacia el oeste, el acuífero en el sector confinado desaparece progresivamente por acuñamiento; al este, está limitado por cabalgamientos de materiales jurásicos (alternancias de margas y dolomías) de la Sierra de Cazorla y, al sur, el límite lo marcan materiales terciarios de naturaleza olistostrómica que rellenan la depresión del río Guadalquivir.

El Acuífero Mioceno Superior tiene una superficie de afloramientos de 148 km<sup>2</sup> con un espesor de hasta 100 m, si bien los horizontes permeables no suelen superar los 20 ó 30 m. Sus límites quedan definidos por el contacto con las margas terciarias en todo su entorno, que constituyen a su vez el substrato impermeable y lo desconectan del Acuífero Jurásico en su zona confinada, aunque numerosos pozos de explotación, mal diseñados, ponen en contacto ambos niveles productivos.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DEL ACUÍFERO

#### 4.1.1 El modelo geológico 3D

El área modelizada cubre más de 2.500 km<sup>2</sup>. Para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de la Loma de Úbeda se han utilizado diversos programas. Entre los programas utilizados destacan los códigos *Gocad* y *3D GeoModeller* utilizados en las industrias de exploración de hidrocarburo y minera. Estos programas permiten la integración de información cartográfica y estructural de detalle, geofísica (sísmica de reflexión) e información litológica procedente de sondeos.

##### 4.1.1.1 Elementos del modelo. Superficies de Referencia y Fallas

El primer paso, y más importante, en la construcción de un modelo geológico 3D es la definición de sus elementos básicos: superficies de techo y muro de las unidades a modelar y fallas principales que las afectan, que configuran la arquitectura del volumen a construir.

El análisis de datos geológicos de superficie y de subsuelo para el Acuífero de la Loma de Úbeda, ha permitido reconstruir 3 superficies geológicas (base del Triásico, base del Jurásico y base del Mioceno) y un total de 23 fallas. El tipo de datos utilizados para la construcción del modelo 3D se resume en la tabla 2.

Tipo	Datos	Descripción	Fuente
<b>Superficie</b>	Cartografía geológica	Hojas MAGNA: 848, 885, 886, 905, 906, 907, 926, 927 y 928.  Trabajo de campo para este proyecto.	Cartografía Magna y  Fotointerpretación  Observaciones de campo
	Datos estructurales	188 medidas de dirección y buzamiento estratificación  Datos cinemáticos en fallas	Cartografía geológica y fotointerpretación  Observaciones de campo
	Ortofotografías MDT	Ortofotografías (0.5x0.5m) y MDT (5x5 m)	IGN
<b>Subsuelo</b>	Sondeos	195 sondeos	IGME
	Líneas sísmicas	26 líneas (370 km de longitud)	Base de datos de Hidrocarburos del IGME

*Tabla 2. Datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de la Loma de Úbeda.*

Los datos de superficie corresponden principalmente a los contactos litológicos entre las formaciones y los contactos de falla. Estos contactos provienen en su mayor parte de la cartográfica geológica previa del IGME y de las observaciones directas en campo realizadas para este trabajo. Se ha realizado un trabajo de fotointerpretación a partir de fotografías aéreas y el modelo digital de elevaciones en un entorno 3D. También se han incorporado al modelo medidas de la orientación de la estratificación. Los datos de dirección y buzamiento de la estratificación provienen de nuevos datos adquiridos a partir de fotointerpretación. El total de datos de buzamiento incorporado al modelo es de 188 medidas.

Para la construcción del modelo geológico 3D se han utilizado las columnas litológicas de 195 sondeos para captación de aguas subterráneas. Esta información ha sido analizada y recopilada por el IGME. La profundidad media de los sondeos es de unos 450 metros y existen sondeos de más de 800 metros de profundidad.

También se han incorporado al modelo geológico 3D los horizontes sísmicos interpretados y convertidos a profundidad de las siguientes líneas RGAD-89-05, RGAD-89-01, RGAD-89-05, RG-20, RG-87-05, RG-87-03, RG-87-02, RG-1, S82-34S, S83-62, S84-70, S84-68, S84-64, S84-62, BT-1, RG-8, RG-5, RG-4, RG-3, RG-10, S84-60 y S84-58. Estas líneas están disponibles en la base de datos de hidrocarburos <http://info.igme.es/geologiasubsuelo> en formato imagen.

La distribución de los datos de superficie y subsuelo que han permitido construir el modelo 3D se representan en la figura 2. Es importante conocer esta distribución porque informa de la calidad del modelo en diferentes áreas. Zonas con una mayor densidad de datos indican un mayor ajuste del modelo 3D con la realidad.

#### **4.1.1.2 Software utilizado en la modelización 3D**

Para la construcción del modelo geológico 3D se han utilizado numerosos programas. A continuación se describen brevemente las características y utilidad de cada uno de ellos.

##### 3D Geomodeller

3D Geomodeller es un software que permite la construcción de modelos geológicos complejos en 3D (fallas, pliegues, estratos invertidos, intrusiones, etc.). Para ello utiliza datos geológicos de superficie y subsuelo y luego aplica un algoritmo geoestadístico para obtener una solución satisfactoria. Además el programa impone al modelo condiciones geológicas (serie estratigráfica, relaciones de discordancia-on lap, relaciones de corte entre fallas, salto en las fallas, etc). 3D Geomodeller considera que la estratificación y las fallas corresponden a superficies en el espacio 3D análogas a las de los campos potenciales. Mientras que los contactos son isovalores del campo potencial, los buzamientos son gradientes de ese campo. El algoritmo de interpolación de este programa es el "cokriging". El cokriging equipotencial (puntos de contacto de las unidades geológicas) y sus derivadas (datos de orientación) proporcionan una función espacial 3D de la superficie que se quiere modelizar. El programa 3D Geomodeller se ha utilizado para construir el modelo 3D en el sector norte donde afloran las unidades. Los contactos estratigráficos, buzamientos, sondeos y cortes geológicos han sido los datos de entrada al modelo 3D.

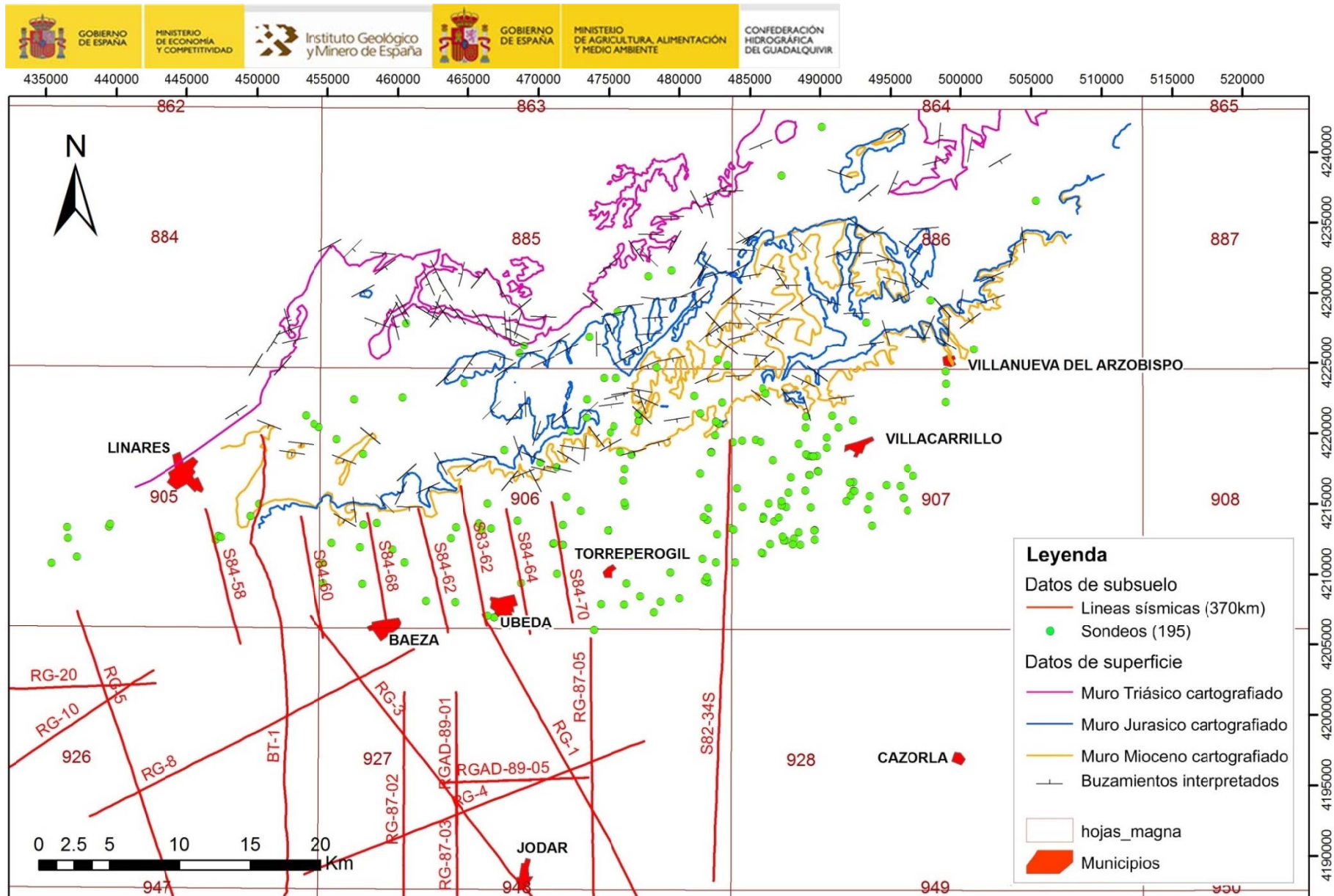


Figura 2. Distribución de datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de la Loma de Úbeda.



## Gocad

El programa *Gocad* (*Geological Objects Computer Aided Design*) es un programa de modelización geológica 3D. Este código presenta numerosos módulos para la modelización de propiedades petrofísicas y facies litológicas. También permite la incorporación de líneas sísmicas, sondeos y diagrfías en el proceso de construcción del modelo 3D. *Gocad* se ha utilizado en este proyecto en diferentes etapas de la construcción del modelo 3D. En primer lugar para obtener datos de dirección y buzamiento a partir de la intersección de la estratificación con el modelo digital del terreno. En segundo lugar, para incorporar los horizontes sísmicos y sondeos en el sector sur del acuífero donde no existe afloramiento. Finalmente, para crear un modelo 3D conjunto del sector norte y sur del acuífero de la Loma de Úbeda.

## ArcGis

ArcGis es un sistema de información geográfica orientado a la gestión y explotación de la información espacial. En este proyecto se ha utilizado ArcGis para la gestión de la información geográfica (sondeos, cartografía geológica, posición de las líneas sísmicas, etc.) y para la exportación de los contactos geológicos y buzamientos como datos de entrada al modelo en el programa *3D Geomodeller*.

## Geographix

Geographix es un programa de interpretación sísmica y se ha utilizado para la interpretación de los horizontes sísmicos de las líneas estudiadas y la transformación tiempo-profundidad. Los horizontes sísmicos interpretados han sido exportados como datos de entrada al modelo en *Gocad*.

## Google Earth

Google Earth es un “globo virtual” que permite visualizar el relieve, fotografías aéreas e información geográfica variada en un entorno 3D. Es un programa libre y gratuito. Google Earth utiliza el modelo digital de elevaciones (MDE) elaborado por la NASA en la [Shuttle Radar Topography Mission](#) (SRTM). La resolución de este modelo es de 1 arco de segundo, unos 30 metros aproximadamente. El sistema de proyección que utiliza Google Earth es el WGS84 con coordenadas geográficas. La resolución de las imágenes aéreas es de 0.5 m en la mayor parte del territorio. Además, se puede visualizar diferentes series de fotografías obtenidas en distintas fechas. También permite importar capas de información (cartografía, sondeos, etc.) mediante archivos *kml* o *kmz*. Este programa se ha utilizado para la digitalización en un entorno 3D de los contactos geológicos y la estratificación.

En el siguiente apartado se describirá brevemente la secuencia metodológica utilizada para la construcción del modelo geológico 3D (figura 3).

### **4.1.1.3 Procesado de la información**

Los perfiles sísmicos utilizados en este proyecto se encuentran originalmente en formato analógico, es decir, es una imagen *tif* escaneada del papel, disponible en la Base de Datos de

Hidrocarburos. Por tanto, el primer paso que se realiza es el de la transformación de estos perfiles a un formato digital estándar *seg-y*. Para la digitalización de la imagen a formato *seg-y* se realiza un tratamiento de la imagen para la eliminación del ruido. A continuación se genera un fichero que correlaciona los píxeles de la imagen con las coordenadas de los shotpoints o CDPs y la escala vertical en tiempo. Por último se procede a la transformación del fichero de imagen de los perfiles sísmicos a un fichero SEG-Y mediante el software IMAGE2SEGY. El software IMAGE2SEGY es una aplicación informática basada en la suite matemática MATLAB y el paquete SEGYMAT que permite transformar una imagen de una sección sísmica, en un archivo SEG-Y que permita la implementación de la sección en diferentes herramientas informáticas de interpretación-modelización sísmica. En las figuras 4 y 5 se muestran algunos de los perfiles sísmicos interpretados.

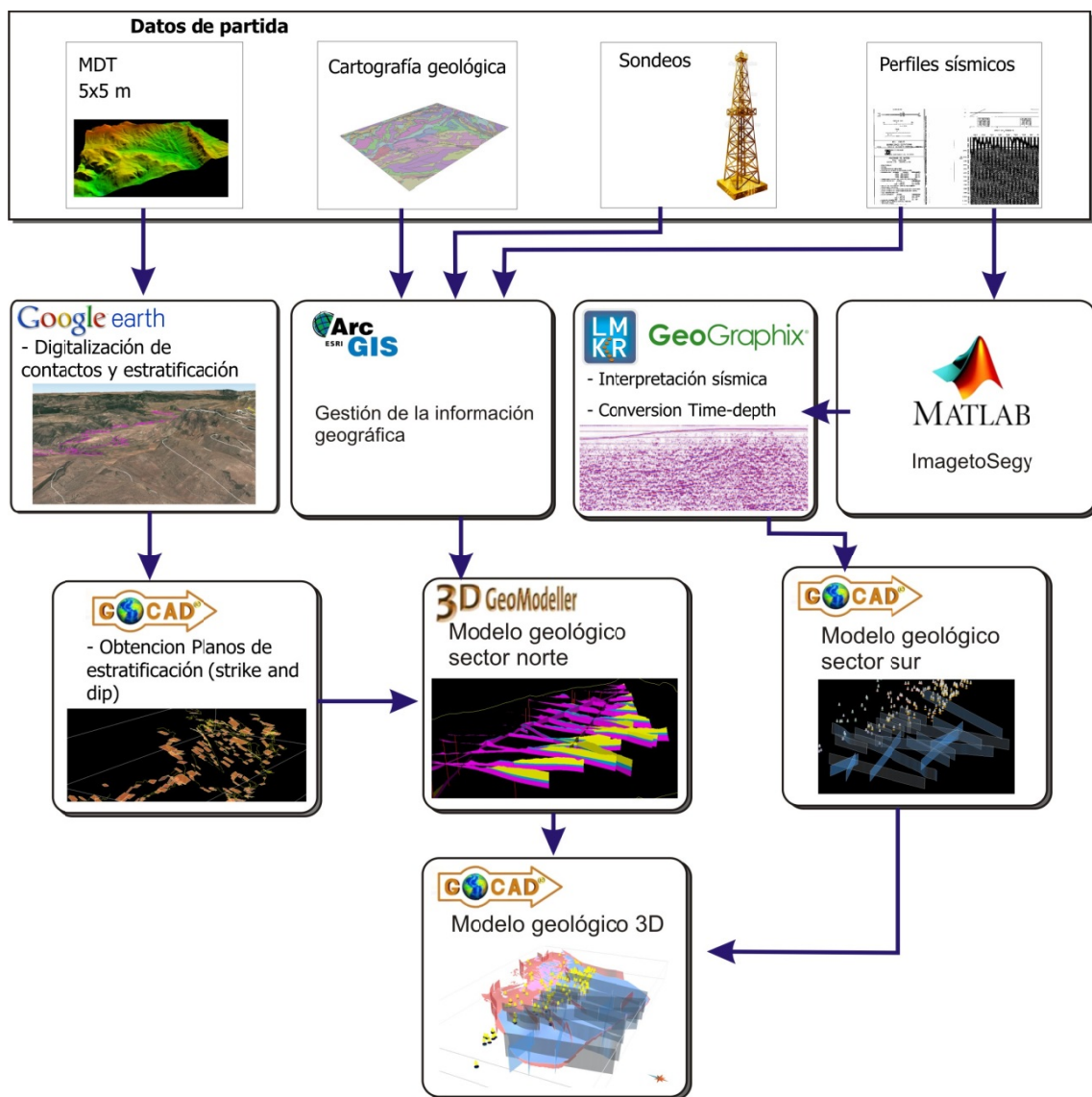


Figura 3. Diagrama de flujo del software utilizado para la realización del modelo geológico 3D del Acuífero de la Loma de Úbeda.



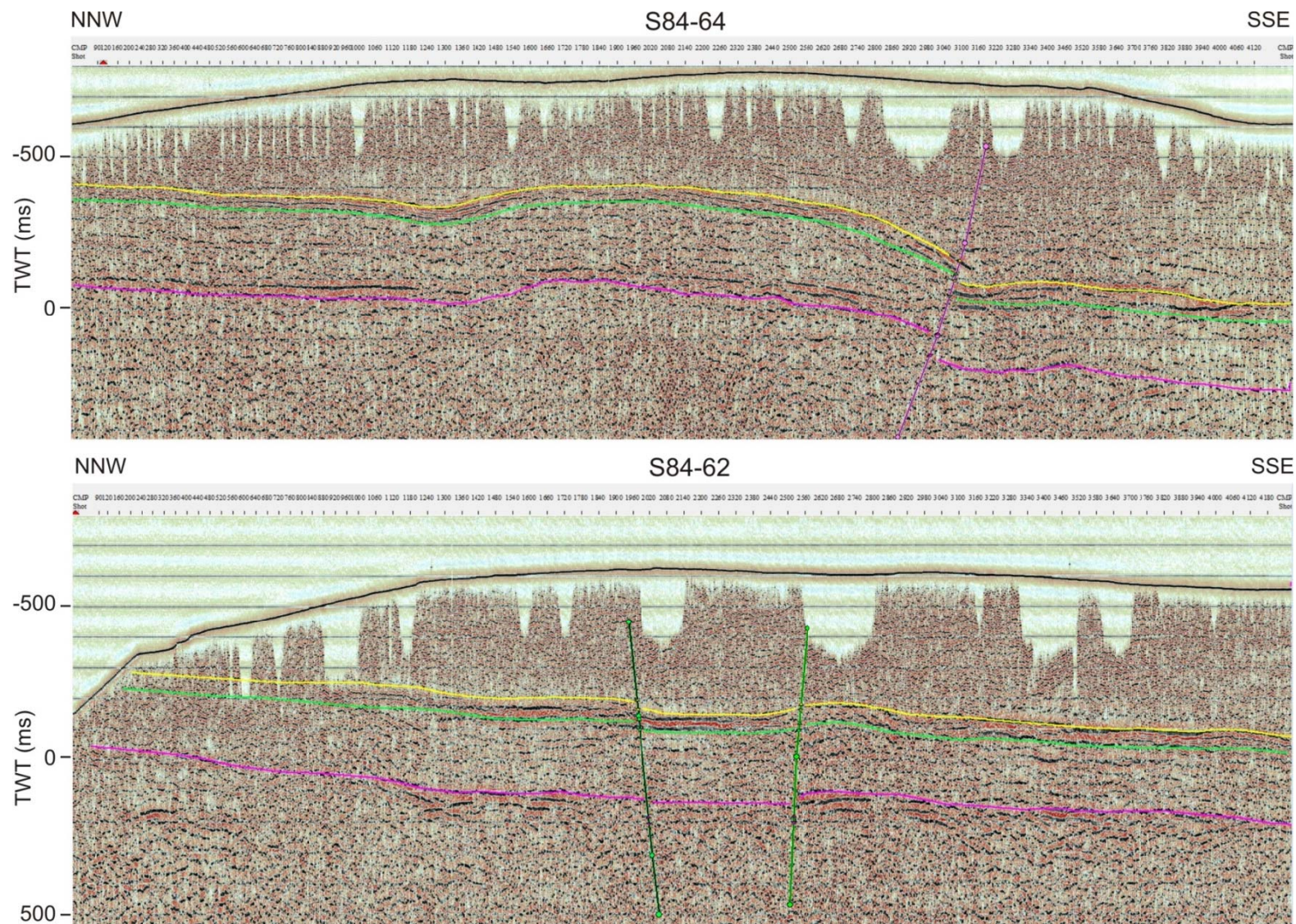


Figura 4. Perfiles sísmicos S84-64 y S84-62. Línea amarilla: base del Mioceno; línea verde: base del Jurásico; línea fucsia: base del Triásico.



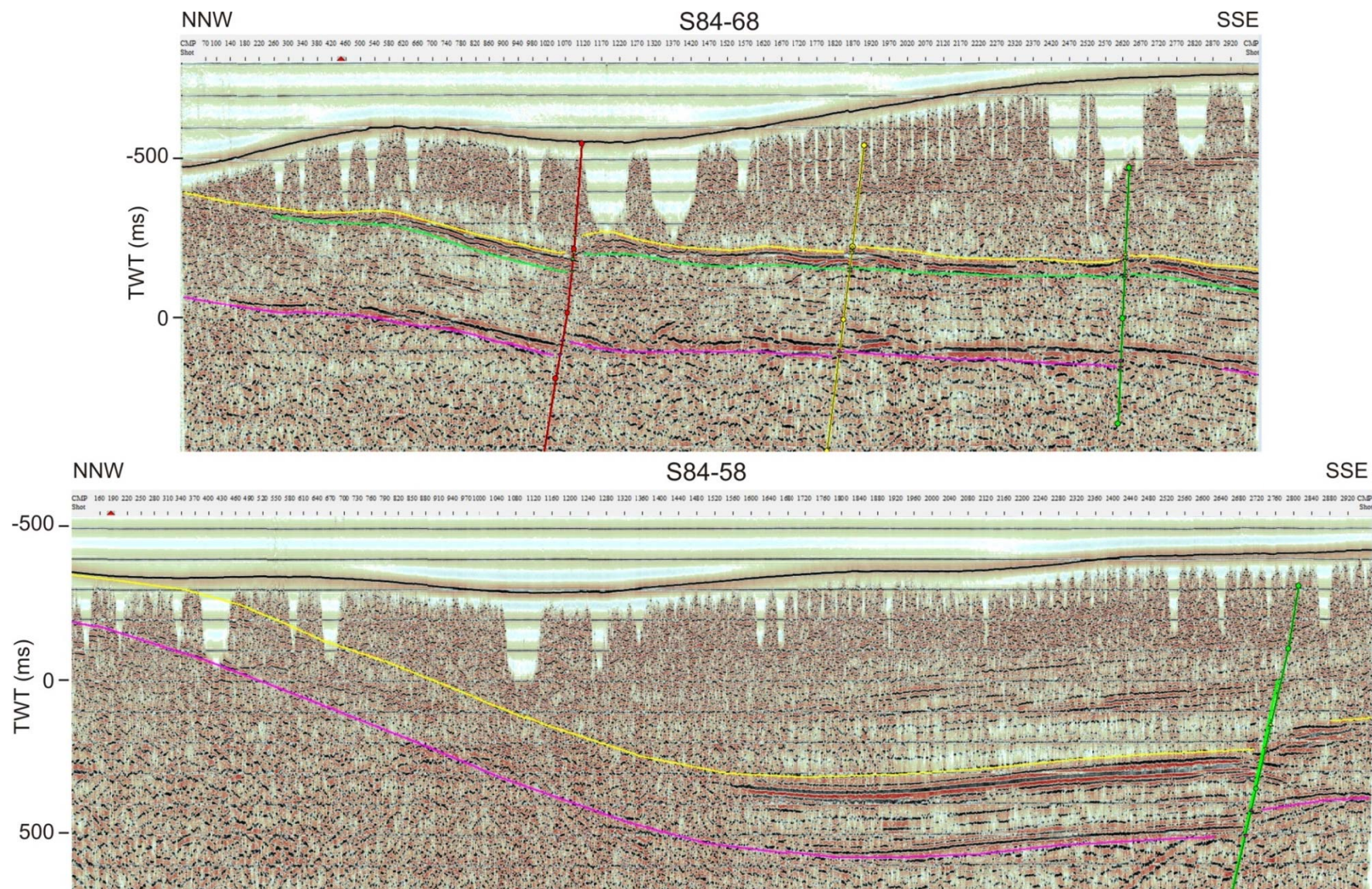
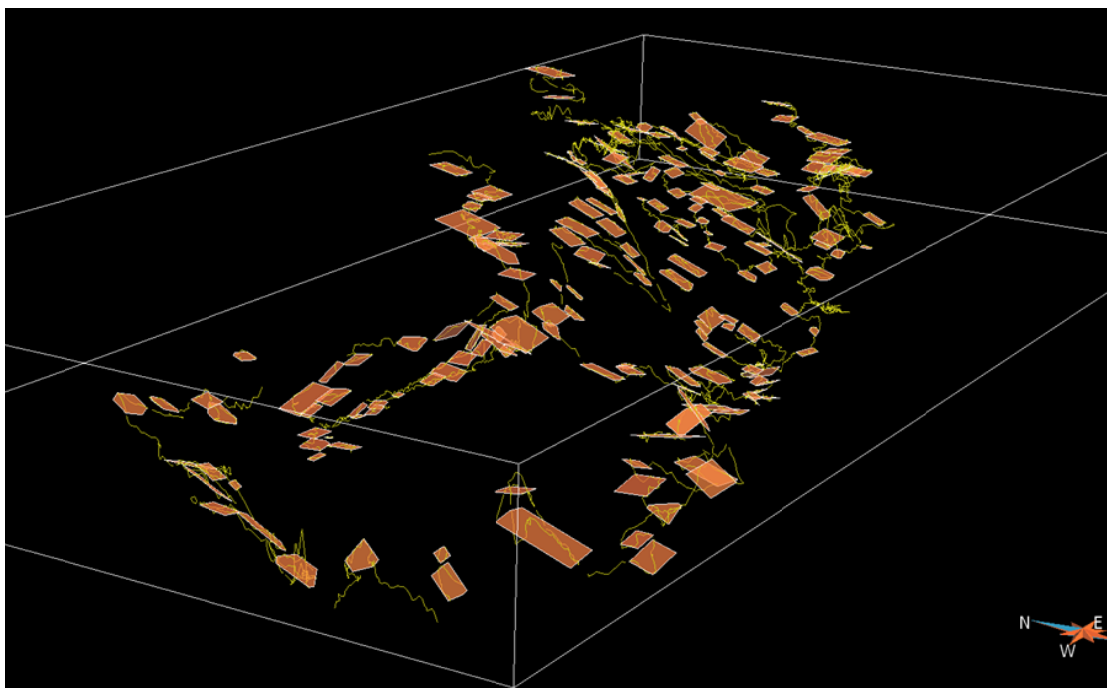


Figura 5. Perfiles sísmicos S84-68 y S84-58. Línea amarilla: base del Mioceno; línea verde: base del Jurásico; línea fucsia: base del Triásico.



Desafortunadamente no existen sondeos profundos con registro de la velocidad sísmica para realizar un calado de los horizontes sísmicos con las unidades geológicas. Sin embargo los horizontes correspondientes a la base y el techo de las unidades interpretadas son fácilmente reconocibles en las líneas sísmicas debido a la presencia de discordancias y a reflectores característicos de gran amplitud. Debido a que existen numerosos sondeos que se encuentran cerca de las líneas sísmicas, es posible definir pares de valores tiempo-profundidad para estos sondeos. Al realizar un tratamiento estadístico de estos valores se observan velocidades intervalo para el Triásico, Jurásico y Mioceno muy constantes en el área de estudio. Las velocidades intervalo obtenidas son de 1900 m/s, 3190 m/s y 2250 m/s para el Mioceno, Jurásico y Triásico respectivamente. Con estas velocidades intervalo medias se ha realizado la conversión tiempo profundidad para los reflectores sísmicos interpretados.

La mejora de los datos cartográficos de partida, requerida para un proyecto de reconstrucción 3D de calidad, se ha conseguido gracias a una importante labor de fotointerpretación. La superposición de las ortofotografías digitales a color junto con otras capas de información (cartografía geológica previa) sobre un modelo digital del terreno, permite interpretar y digitalizar los contactos geológicos en un entorno 3D. Este proceso se ha realizado con el programa Google Earth. Para ello, se importado un archivo *kml* con la información geográfica vectorial de la cartografía previa. Con la vista tridimensional de Google Earth se puede digitalizar directamente sobre el relieve con la herramienta "Añade una ruta". Los contactos digitalizados se guardan en un archivo *kml* que contiene polilíneas 3D que posteriormente se exportan a un formato *shapefile* mediante el programa ArcGis. El archivo *shapefile* que contiene los nuevos contactos estratigráficos y fallas digitalizadas son importados en 3D Geomodeller.



*Figura 6: Planos que se ajustan a los contactos digitalizados en un entorno 3D. Los planos indican dirección y buzamiento de la estratificación y son utilizados en la modelización de las superficies en 3D Geomodeller.*

En el proceso de fotointerpretación con Google Earth también se visualizan las superficies de estratificación. Al digitalizar estas superficies se obtienen polilíneas 3D que se corresponde con la intersección de la estratificación con la topografía y que están directamente relacionadas con la dirección y buzamiento de la estratificación (figura 6). Las líneas 3D se importan al programa *Gocad* y se obtienen los planos de estratificación que se ajustan a estas intersecciones. Mediante este procedimiento se han obtenido 188 nuevos datos de dirección y buzamiento adicionales a los datos indicados en los mapas geológicos previos. El conjunto de datos de buzamiento se importan en 3D Geomodeller, serán datos de entrada que condicionarán la geometría de las superficies modelizadas.

#### **4.1.2 Perfiles gravimétricos**

Con la finalidad de complementar la información proporcionada por los perfiles sísmicos y los datos de sondeos, se realizaron una serie de medidas gravimétricas distribuidas a lo largo de dos perfiles de dirección NNO-SSE. Uno de ellos en el entorno de Úbeda y otro entre Sabiote y Torreperogil (figura 13). Estos datos han sido especialmente relevantes para delimitar las estructuras tectónicas, previamente descritas, en áreas donde no había datos disponibles.

Durante la campaña gravimétrica se realizaron un total de 138 medidas, con un espaciado medio de 300 m. Para ello se utilizó un gravímetro Scintrex Autograv CG-5, con precisión máxima de 0,001 mGal. Este gravímetro corrige automáticamente la deriva instrumental y realiza la corrección de mareas, lo que permite la adquisición de ciclos de medidas diarios. Las estaciones de medida se localizaron mediante un GPS con altímetro barométrico, que permite obtener una precisión inferior a 5 m en la horizontal y a 1 m en la vertical. Además, las variaciones diurnas de cota, relacionadas con cambios de la presión atmosférica, se corrigieron con un barógrafo de medida continua localizado en la estación base.

Los valores de gravedad absoluta se establecieron en referencia a la estación base de Granada, perteneciente a la red gravimétrica del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Por otro lado, la corrección topográfica se calculó para una distancia total de 22 km, utilizando el modelo digital del terreno de 90 m SRTM3 de la NASA (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtn/>). Los nuevos datos gravimétricos se complementaron con 100 datos de gravedad adicionales procedentes de la base de datos del IGME (<http://cuarzo.igme.es/sifeco/default.htm>). Con todos ellos se realizó finalmente el mapa de anomalía de Bouguer de la región estudiada (figura 13). Teniendo en cuenta que las rocas sedimentarias son dominantes en esta región, la densidad de referencia utilizada para el cálculo de la anomalía de Bouguer fue de 2.6 g/cm<sup>3</sup>.

#### **4.2 PIEZOMETRÍA**

Los primeros datos de piezometría en el acuífero se tomaron en el año 1996. La red que ha venido midiéndose en los acuíferos de la Loma de Úbeda de forma más o menos continuada desde el año 2001 ha sido de 21 piezómetros. Desde 2010, hubo de reducirse a 11 piezómetros en los que se han realizado cuatro campañas durante el año 2013: marzo, mayo, julio y octubre; 3 campañas en 2014: marzo, mayo y noviembre; y una campaña en 2015: marzo. Por otra parte de los 4 sensores instalados, 3 han dejado de ser operativos sin que hasta la fecha hayan podido ser sustituidos. Finalmente, se ha incorporado un nuevo

piezómetro, el denominado Peñuela IV, que aporta información sobre la evolución del acuífero triásico cerca de la margen izquierda del río Guadalimar (figura 7 y tabla 3).

nº IGME	DENOMINACION	COORD. UTM X Y	COTA	PROF.	ACUIFERO
2136/1/96	S-2 Cortijo del Mojino	485895.7 4223153.4	427.79	67	Jurásico Libre
2136/1/97	S-3 Las Pulgas	486129.8 4222787.7	476.55	93	Jurásico Libre
2036/4/58	S-4 Los Lobos	483010.5 4222148.3	461.03	125	Jurásico Libre
2036/4/59	S-5 Loma del Robledo	481023.4 4222614.9	484.91	87	Jurásico Libre
2036/4/60	S-6 Ayo. Mostazar	482723.7 4220649.3	397.52	135	Jurásico Libre
2036/4/61	S-7 Embalse de Olvera	477108.4 4220855.4	433.71	118	Jurásico Libre
2036/4/62	S-8 Avenazar-Maestro Ponce	476630 4218449.4	419.07	94	Jurásico Libre
2036/3/48	S-9 Huerta Oliva	472256.9 4220115.6	373.6	104	Triásico
2036/3/48	S-10 Ayo. Mostazar 2	482739.7 4220658.4	396.13	150	Jurásico Libre
2036/4/64	S-11 Embalse de Overa 2	477144.4 4220852.1	432.42	150	Jurásico Libre
2035/8/40	S-12/13 Piezómetro Camino	483359.4 4224895.2	563.86	139	Jurásico Libre
2136/3/51	Pozo de Vicente	498939 4224370	712	195	Jurásico Libre
2036/7/60	El Porvenir I	471094 4212206	789	480	Jurásico Confinado y Triásico (?)
2035/8/29	Camino	483394 4224912	561	Desconc.	Jurásico Libre
2036/4/38	Cabeza Alba	482180 4216585	544	220	Jurásico Confinado
2036/8/15	Pichilín I (viejo)	482637 4212843	645	Desconc.	Jurásico Confinado
2036/8/43	La Imagen II	478081 4207157	628	700	Jurásico Confinado
2036/4/14	La Peñuela I	482417 4219906	438	125	Jurásico Confinado y Triásico
2036/4/34	La Peñuela II	482493 4219829	441	120	Jurásico Libre
2036/6/84	El Puntal	466864 4212135	740	460	Jurásico Confinado y Triásico
2036/4/71	Peñuela IV	482370 4219522	442	190	Jurásico Libre y Triásico

Tabla 3. Principales características de los puntos de control utilizados. En verde los medidos en las últimas campañas.

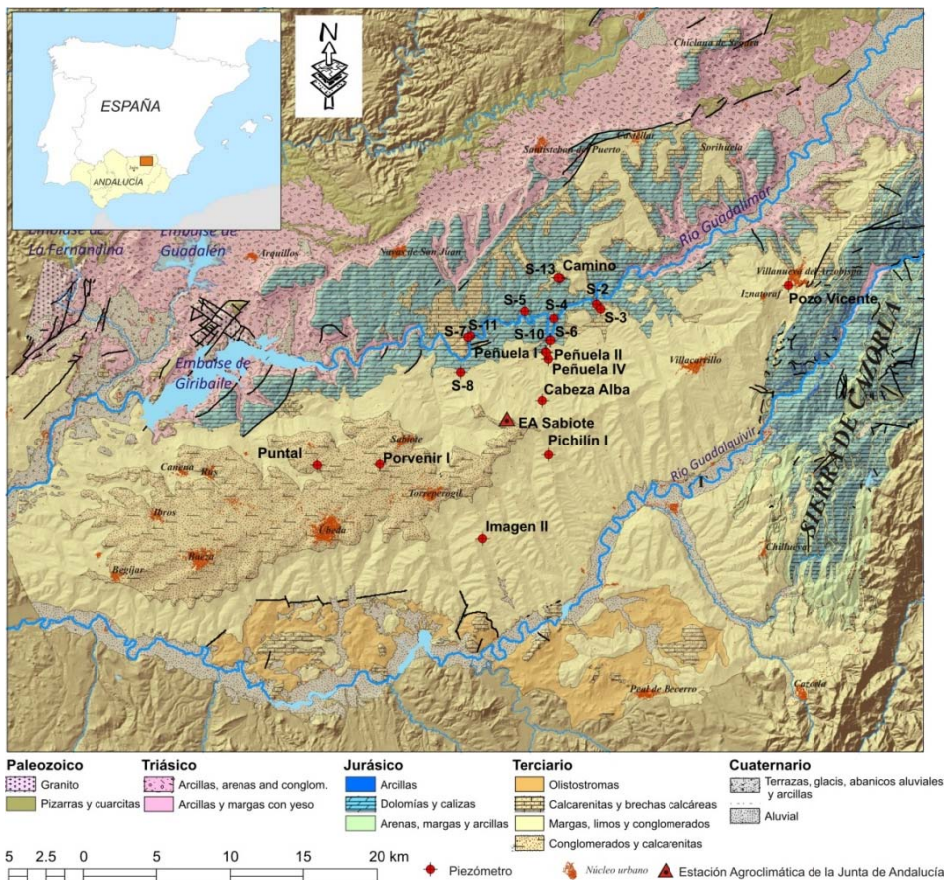


Figura 7. Distribución de la red piezométrica

Los datos correspondientes al piezómetro Camino proceden de los tomados por el IGME, completados con los obtenidos por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, que inició en marzo de 2002 la toma mensual sistemática de datos en el mismo punto.

Por otra parte, se ha elaborado un gráfico en el que se comparan las evoluciones piezométricas en los sectores más importantes de los acuíferos de la Loma con la curva de desviación acumulada de la precipitación con respecto a la media de los datos registrados en la estación agroclimática de la Junta de Andalucía en Sabiote. Los resultados se muestran en el apartado 5.2.

#### 4.3 RELACIONES ENTRE EL RÍO GUADALIMAR Y LOS ACUÍFEROS JURÁSICO Y TRIÁSICO

A finales de noviembre de 2013 se consiguió realizar por primera vez una campaña de aforos diferenciales en el río Guadalimar, que ha permitido evaluar directamente los volúmenes de ganancias o pérdidas sufridas por el río en su travesía por los acuíferos jurásico y triásico. Para ello fue necesario el cese de los desembalses aguas arribas, en el embalse del Guadalmena, durante los días de ejecución de los trabajos, y en el pequeño embalse de Olvera. Se realizaron 6 aforos en el propio cauce del río Guadalimar y tres en arroyos tributarios.

Los aforos se hicieron con la ayuda de un medidor acústico y digital OTT ADC, en cuyo cabezal se encuentran dos convertidores ultrasónicos. Para la medición de la velocidad del flujo de agua emiten señales de ultrasonidos que se reflejan en las partículas del agua y vuelven como señales de eco. Los convertidores reciben las señales de eco y los digitalizan como un patrón de eco mediante un procesador digital de señales (DSP). Tras una breve pausa se repite el proceso creando de este modo un segundo patrón de eco. El DSP comprueba ambos patrones de eco por medio de un método matemático de similitud y calcula su diferencia temporal. Esta diferencia se utiliza después para calcular la velocidad del flujo.

#### 4.4 HIDROQUÍMICA E ISÓTOPOS AMBIENTALES

Entre finales de 2008 y mediados de 2010 se llevó a cabo un muestreo sistemático, con una periodicidad mensual, en 11 sondeos profundos, en una galería de agua excavada en areniscas miocenas y en el río Guadalimar (figura 8). El muestreo se realizó al final de una serie de años secos, seguidos de un año muy húmedo, lo que ha permitido comparar variaciones ocurridas en condiciones hidrológicas extremas.

El número de muestras obtenidas fue de 238. Todas fueron recogidas tras un periodo de bombeo mínimo de 15 minutos y máximo superior a 6 días, con 30 minutos como periodo más común. La recogida se realizó siempre a pocos metros del pozo de bombeo, para evitar cambios en los parámetros físico-químicos. Los análisis químicos han sido realizados en el laboratorio del IGME en Madrid. Los parámetros analizados han sido  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , Fe total y  $\text{SiO}_2$ . Los valores de temperatura ( $T^{\text{a}}$ ), pH, conductividad eléctrica (CE) y alcalinidad se midieron en campo y en laboratorio. En el campo, la alcalinidad se midió por volumetría con HCl como valorante y naranja de metilo como indicador. En laboratorio,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$  se midieron por cromatografía iónica;  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por espectrometría de emisión atómica;  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  y Fe total por espectrometría de absorción atómica y  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por volumetría.



Los análisis isotópicos fueron realizados en el Laboratorio de Aplicaciones Isotópicas del CEDEX. Los resultados se expresan como desviación isotópica de la muestra en tanto por mil con respecto al patrón VSMOW-SLAP (Vienna-Standard Mean Ocean Water-Standard Light Antarctic Precipitation). La incertidumbre para estos análisis es de  $\pm 0,2 \text{ ‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\pm 1,5 \text{ ‰}$  para  $\delta^2\text{H}$ .

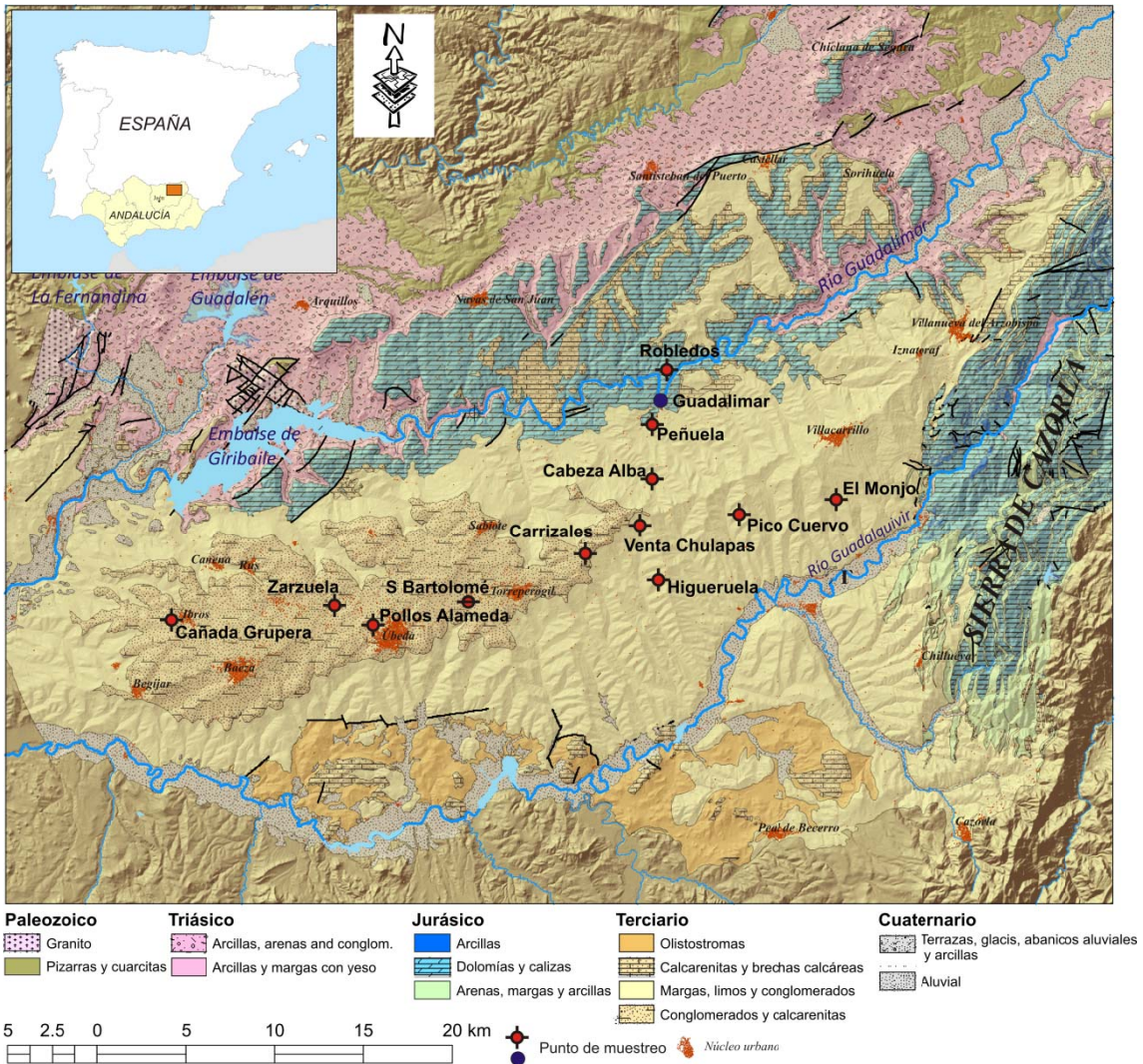


Figura 8. Distribución de puntos muestreados entre 2008 y 2010

## 5. RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DEL ACUÍFERO

#### 5.1.1 El modelo geológico 3D

El modelo geológico 3D del acuífero de la Loma de Úbeda se ha construido a partir de la integración de datos de superficie (cartografía y buzamientos) y de subsuelo (sondeos y perfiles sísmicos). La distribución de estos datos se puede ver en la figura 2. El modelo 3D realizado está formado por 3 unidades o formaciones geológicas, que están limitadas a techo y a muro por superficies estratigráficas. Las unidades geológicas modelizadas son las siguientes:

- Unidad Miocena
- Unidad Jurásica
- Unidad Triásica

Estas unidades geológicas están limitadas por las siguientes superficies:

- Muro o base de la Unidad Miocena
- Muro o base de la Unidad Jurásica
- Muro o base de la Unidad Triásica

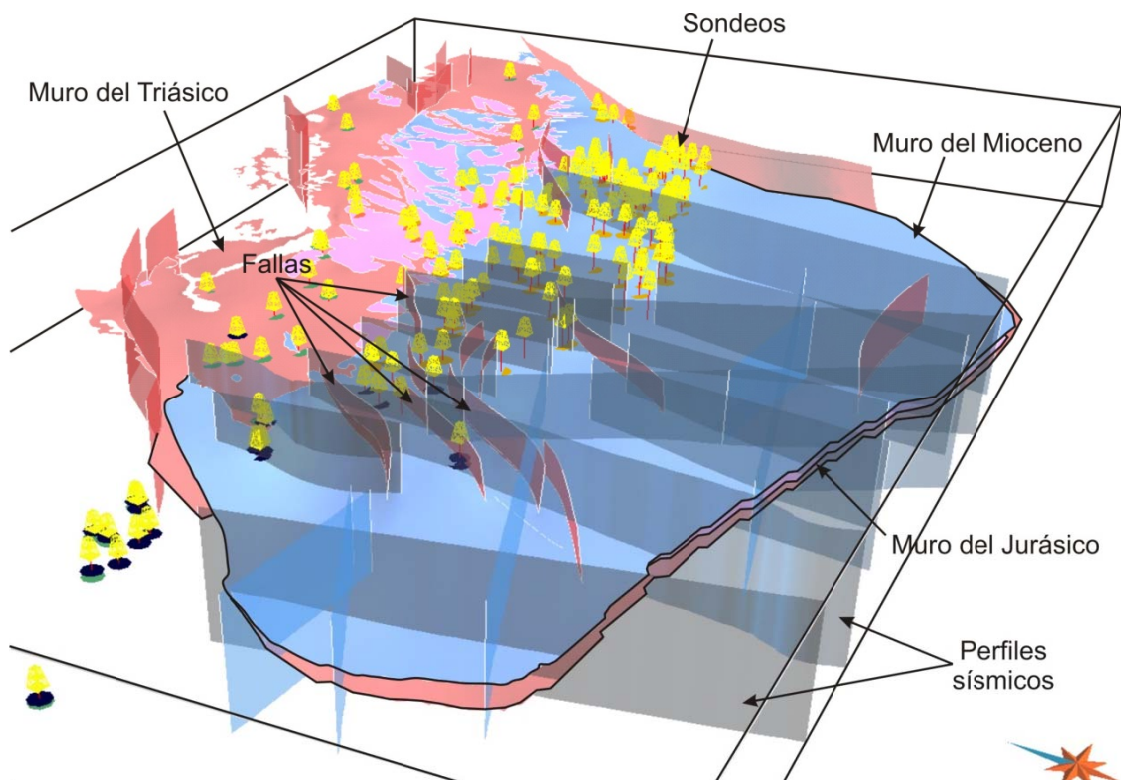


Figura 9. Vista 3D del Modelo geológico 3D del Acuífero de la Loma de Úbeda

El modelo geológico 3D hacia el norte está limitado por los afloramientos del Mioceno, Jurásico y gran parte del Triásico. El límite occidental del modelo se sitúa en el eje Villargordo – Jabalquinto – Linares - Vilches. El límite oriental del modelo se sitúa en el frente de cabalgamiento de la Sierra de Cazorla. Por último, el límite sur del modelo se localiza en el paralelo que pasa por Jódar, en el frente del olistostroma Bético. La fiabilidad del modelo 3D obtenido depende en gran medida del número de datos utilizados y su distribución espacial. De esta manera, en aquellas regiones donde existan más datos, la semejanza del modelo con la realidad será mayor. En las áreas donde no existan suficientes datos, el modelo está más relacionado con la interpretación del modelizador y por tanto será menos fiable.

El modelo geológico 3D muestra en general un morfología tabular para el conjunto Triásico-Jurásico que buza unos 2º de media hacia el sur. En general, el espesor de las unidades se incrementa progresivamente hacia el sur. El conjunto de unidades modelizadas está afectado por numerosas fallas y pliegues suaves.

Las fallas reconocidas en campo e interpretadas a partir de los perfiles sísmicos muestran una orientación media N50E y buzamientos medios de 80º tanto al SE como al NO. Los saltos medios obtenidos para las fallas son de unos 80 m aunque en alguna falla, como la situada al SE de Linares (figuras 10, 11 y 12), se puede alcanzar los 250 m de salto. Las fallas presentan alto ángulo con buzamientos medios de 80º y generalmente son fallas normales. Las longitudes de las fallas son variables con unos 10 km de longitud promedio.

La unidad Miocena (figura 10) tiene espesores variables debido a que aflora y está erosionada. Los mayores espesores se alcanzan, como era de esperar, en el límite sur del modelo, cerca del frente olistostrómico con valores de unos 1000 metros de potencia.

La Unidad Jurásica (figura 11) también tiene espesores variables. Hacia el oeste, disminuye progresivamente su espesor hasta desaparecer por acuñaamiento a la altura de Ibros, Begíjar y Canena. Hacia el sur el espesor va aumentando, alcanzando valores de hasta 220 m de potencia, según se obtiene de la interpretación de los perfiles sísmicos. El valor medio del espesor de los carbonatos jurásicos en el sector que está explotado por los sondeos es de unos 90 m.

La Unidad Triásica (figura 12) tiene unos espesores medios de unos 300 metros.



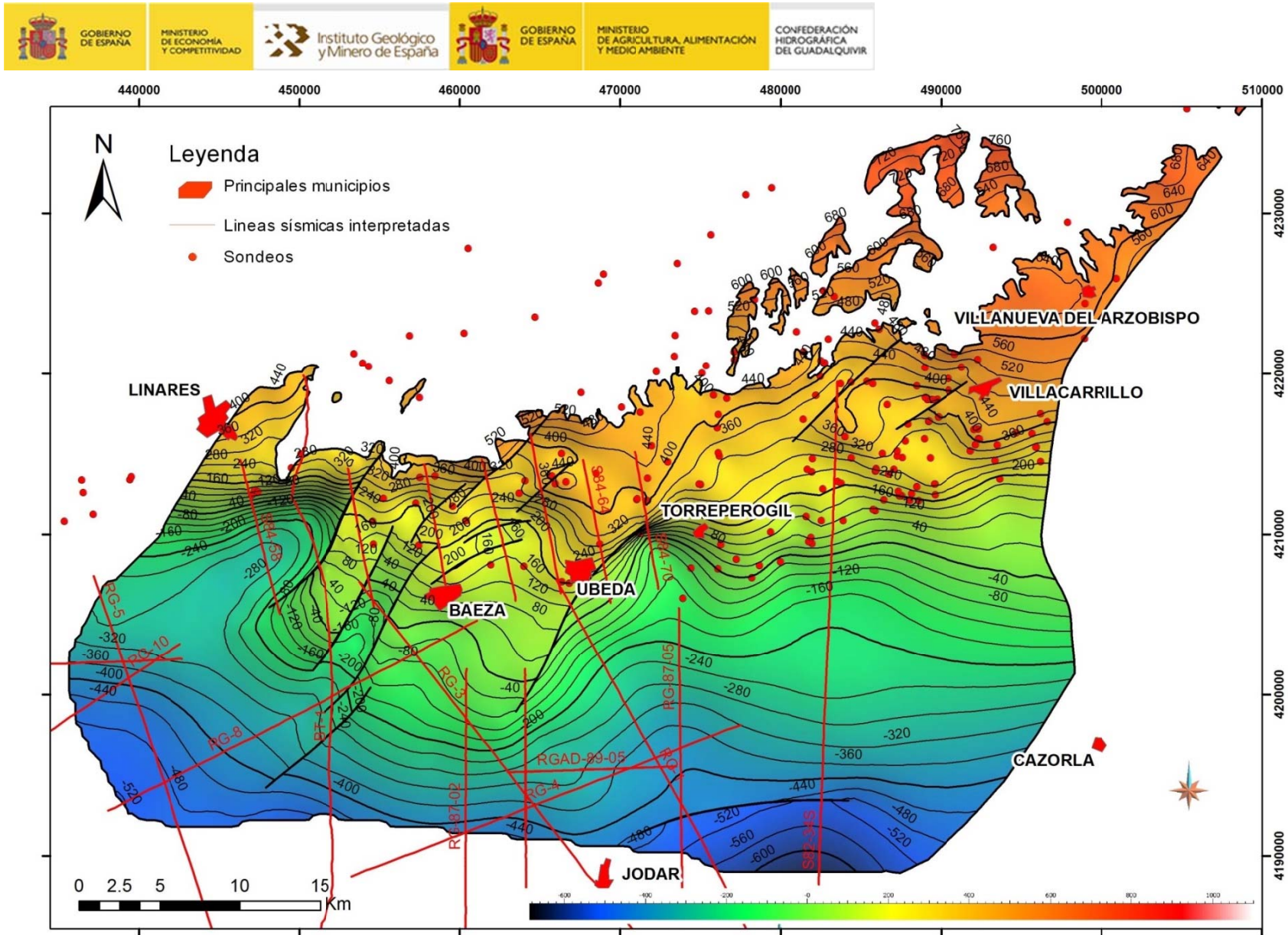


Figura 10. Mapa de isobatas sobre el nivel del mar del muro de la Unidad Miocena.

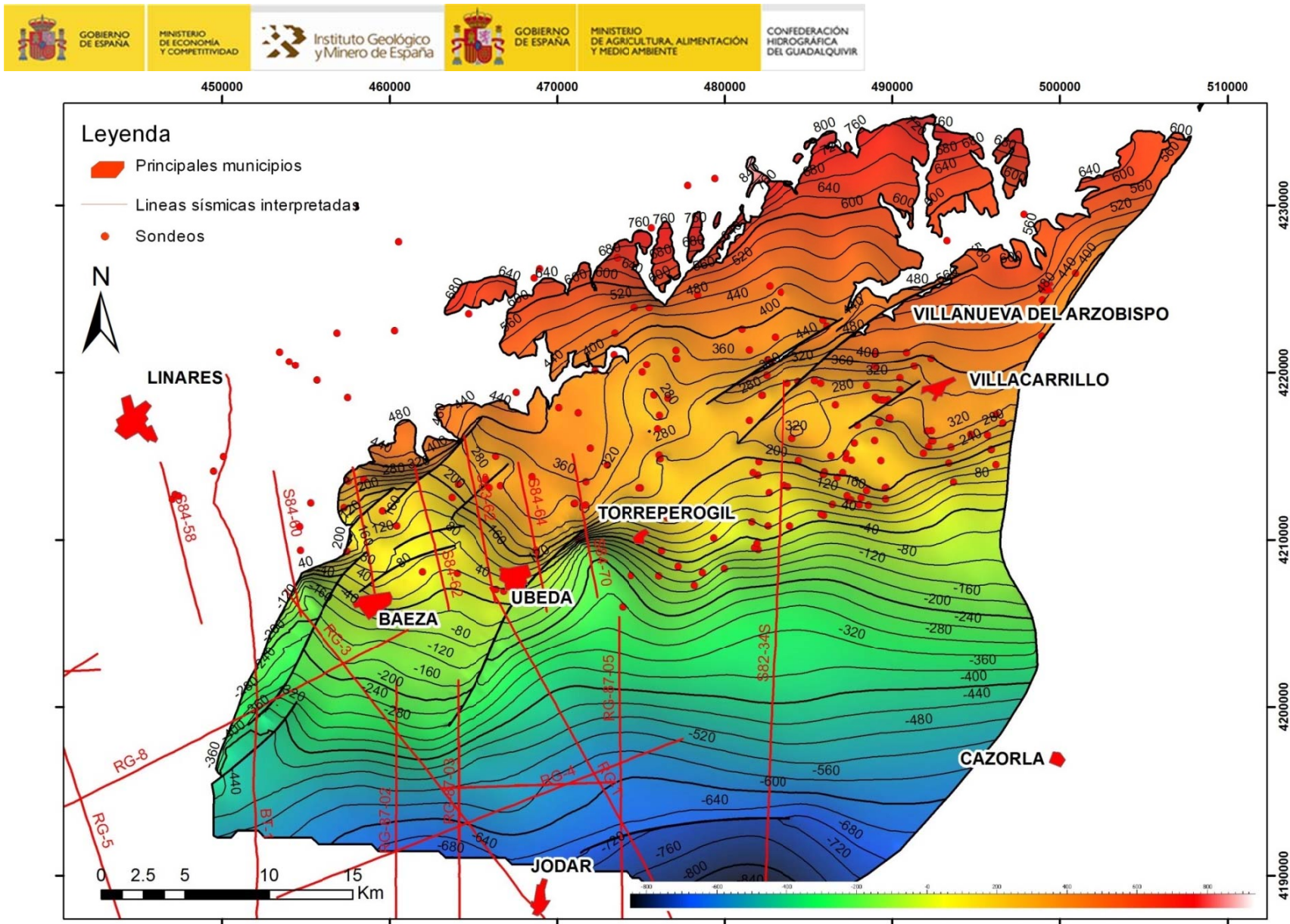


Figura 11. Mapa de isobatas sobre el nivel del mar del muro de la Unidad Jurásica.



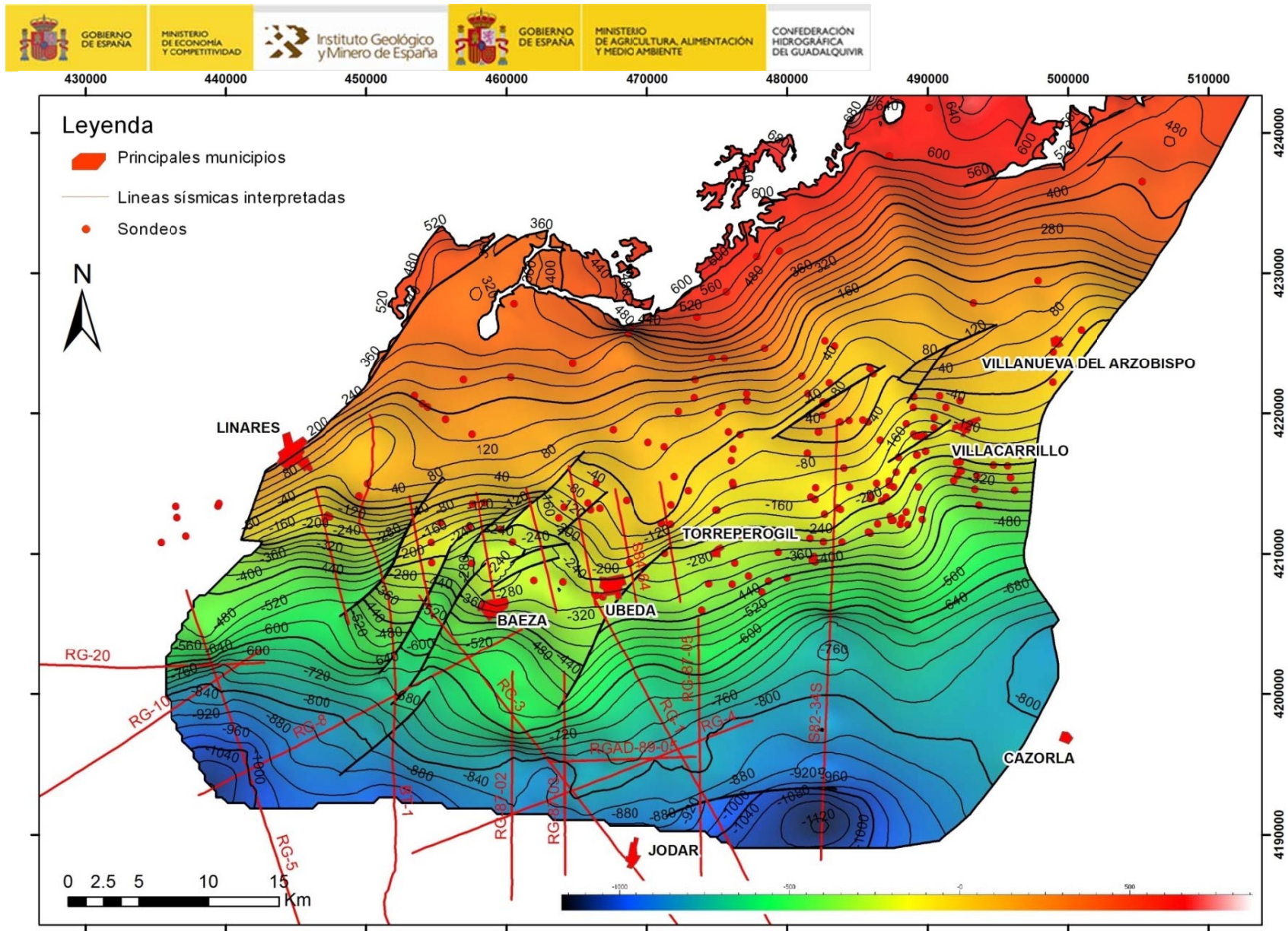


Figura 12. Mapa de isobatas sobre el nivel del mar del muro de la Unidad Triásica.

### 5.1.2 Perfiles gravimétricos

El mapa de anomalía de Bouguer (figura 13) muestra una tendencia general de dirección ENE-OSO y un gradiente suave decreciente hacia el SSE, desde valores de 56 mGal hasta 88 mGal. Este descenso de los valores de gravedad es consistente con el hundimiento general del basamento hacia el SSE. Desde Úbeda hacia el sur de Sabiote, la tendencia general ENE-OSO cambia hacia NE-SO, extendiéndose a lo largo de unos 5 km. Este cambio de tendencia coincide con la existencia de un pliegue monoclinial que deforma los materiales jurásicos y que ha sido detectado mediante sismica de reflexión (perfil S84-70). Al SE de Sabiote, y a lo largo de unos 2 km, los valores de anomalía de Bouguer cambian progresivamente desde ENE-OSO hasta aproximadamente E-O ( $\approx N95^\circ E$ ). El máximo gradiente (5 mGal/km) se observa hacia el noreste de Torreperogil, e indicaría la posición del flanco buzante de un pliegue monoclinial.

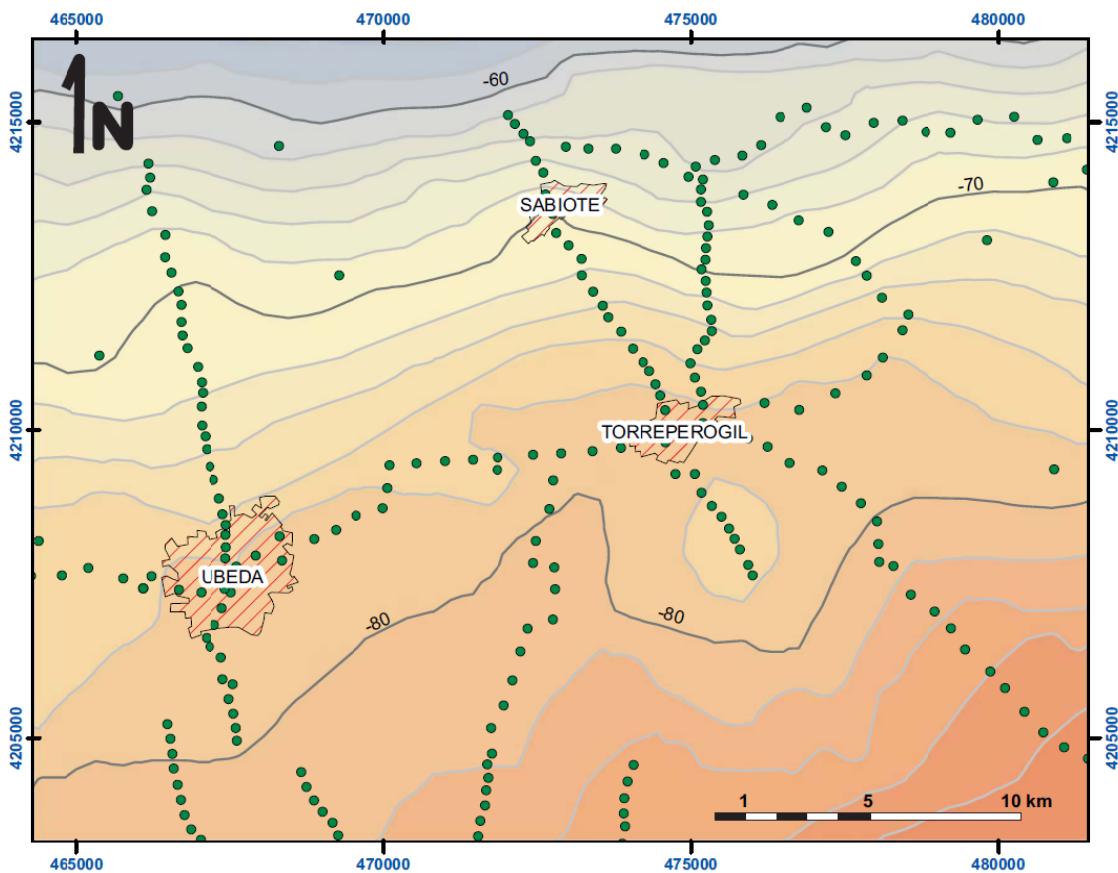


Figura 13. Mapa de anomalía de Bouguer. Los puntos verdes muestran la localización de las estaciones de medida de la gravedad. Isótopos en mGal.

### 5.2 PIEZOMETRÍA

En la figura 14 se muestra la información piezométrica obtenida a partir de la red de control referida en la tabla 3. En el gráfico se observan distintas curvas que se agrupan en tres intervalos de cota fundamentales. Las más elevadas se observan en el "Pozo Vicente" (213630051), representativo de la zona denominada "Villanueva del Arzobispo", las curvas de la zona intermedia corresponden a los piezómetros situados en la margen derecha del río Guadalimar y el grupo inferior a los piezómetros de la margen izquierda. El Pozo Vicente corta

exclusivamente el acuífero jurásico; dejó de controlarse en agosto de 2010, por lo que actualmente se desconoce el estado de la piezometría en esta zona. Entre los años 2001 y 2004 registró un descenso de cerca de 50 m hasta que el nivel piezométrico alcanzó la base del acuífero. Desde entonces hasta la fecha en que se dispone de datos no se ha producido recuperación de niveles en esta zona, lo que debe significar que la explotación del agua subterránea continúa en un volumen equivalente al total de la recarga al acuífero.

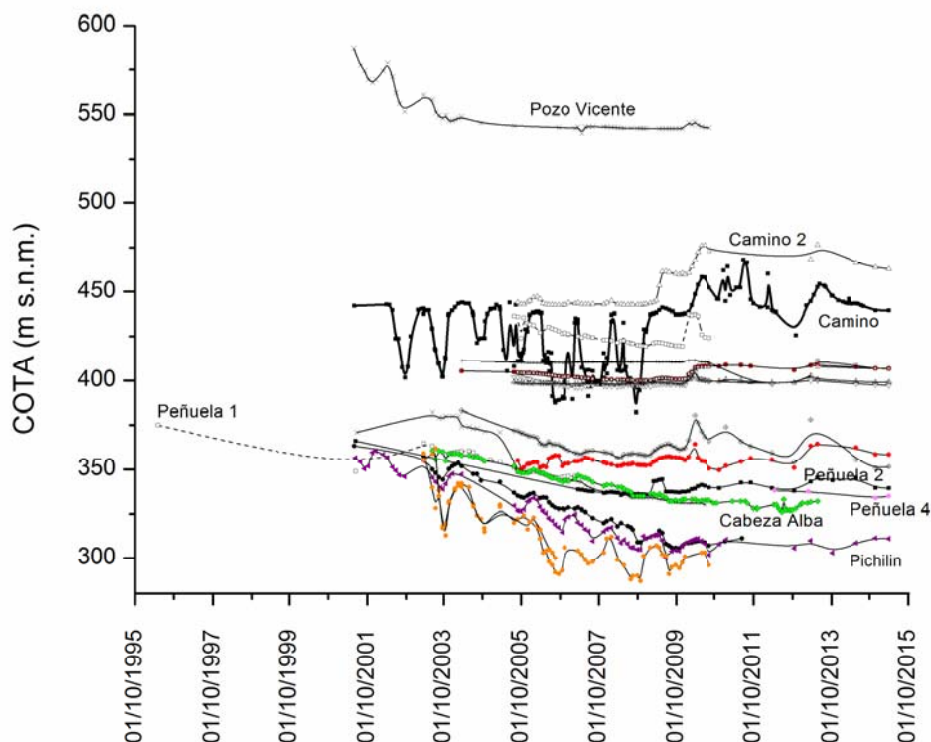


Figura 14. Curvas de evolución piezométrica en los puntos de control desde 1995 hasta la actualidad

En las figuras 15 y 16 se muestran más detalladamente las curvas obtenidas en los grupos de piezómetros situados en ambos márgenes del río Guadalimar. Se han comparado con la precipitación en la Estación Agroclimática de la Junta de Andalucía situada en Sabiote y con la curva de desviación acumulada de la precipitación con respecto a la media en esa misma estación. Las curvas de desviación acumulada muestran con claridad los periodos secos y húmedos y, por lo general, los niveles piezométricos medidos en los acuíferos suelen presentar morfologías similares a ellas.

De la figura 15 se deduce la existencia de un primer periodo, entre octubre de 2000 y octubre de 2004, con precipitaciones en torno a la media, un segundo periodo entre octubre de 2004 y octubre de 2009 con precipitaciones notablemente por debajo de la media, y un tercer periodo con precipitaciones por encima de la media, aunque con el año 2011-2012 más seco que los demás de ese periodo.

Actualmente solo se controlan 6 de los 10 piezómetros que se han estado midiendo en esta zona. Por otra parte los tres sensores de medida horaria de nivel que estaban en los piezómetros S-2, S-7 y S-11 han ido paulatinamente rompiéndose y no han podido ser sustituidos, por lo que actualmente ninguno está operativo.



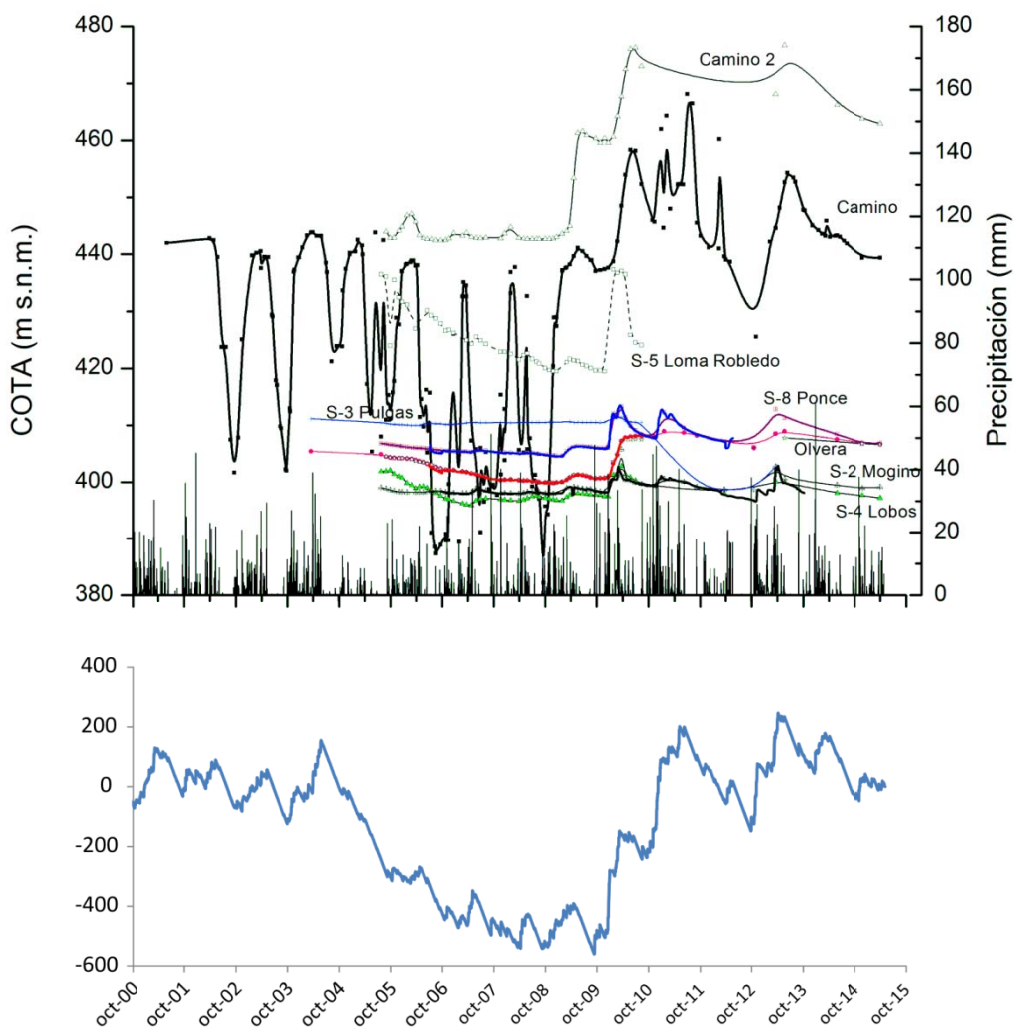


Figura 15. Curvas de evolución de niveles en la margen derecha del río Guadalimar y su comparación con la precipitación en la estación agroclimática de la junta de Andalucía de Sabiote y la curva de desviación acumulada de la precipitación con respecto a la media en esa misma estación.

En informes anteriores ya se ha explicado la razón del extraño comportamiento del piezómetro Camino, con bruscos descensos que normalmente ocurren en estiaje y que se explican por periodos en los que el piezómetro marca niveles relacionados con el acuífero triásico infrayacente al jurásico, al desaturarse la mayor parte del acuífero jurásico en los periodos de estiaje. El piezómetro Camino 2, al cortar exclusivamente carbonatos jurásicos refleja fielmente lo que ocurre en este acuífero. Cuando el piezómetro Camino 2 registra un espesor saturado inferior a 2 m, o bien, cuando la cota del nivel piezométrico está por debajo de 443 m s.n.m. en este mismo punto, se produce el descuelgue del acuífero jurásico en el piezómetro Camino, y el nivel medido pasa a ser el correspondiente al acuífero triásico. Los datos muestran que los periodos lluviosos se reflejan rápidamente en las evoluciones piezométricas, es decir, el tiempo de respuesta a la recarga por precipitaciones es corto.

La información aportada por estos piezómetros en general no es muy relevante sobre “la salud” de los acuíferos de la Loma y su afección por las explotaciones, pues en la margen

derecha del río Guadalimar, el grueso de la explotación actualmente se extrae del acuífero triásico infrayacente a los carbonatos. Ninguno de los piezómetros de esta zona mide lo que ocurre en este acuífero, con excepción del piezómetro Camino, que como ya se ha indicado, muestra la influencia de los dos, con una mezcla de potenciales

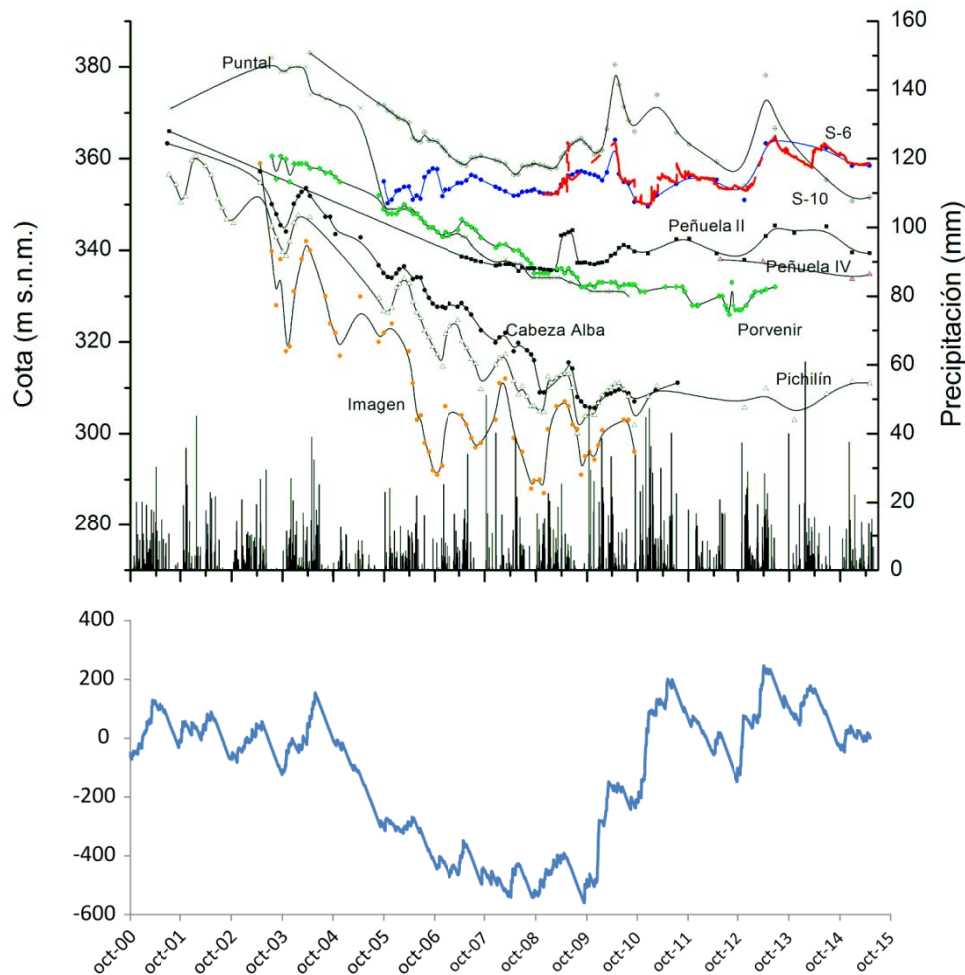


Figura 16. Curvas de evolución de niveles en la margen izquierda del río Guadalimar y su comparación con la precipitación en la estación agroclimática de la junta de Andalucía de Sabiote y la curva de desviación acumulada de la precipitación con respecto a la media en esa misma estación.

Más interesante es el estudio de las evoluciones en los piezómetros de la margen izquierda del río que se muestran en la figura 16. De los 8 piezómetros que se han estado midiendo tradicionalmente en esta zona, actualmente sólo se miden 4 de ellos, y solo uno ubicado en la zona profunda del acuífero jurásico, donde se localizan los sondeos que extraen mayores volúmenes. Por otra parte, en 2012 se construyó un nuevo sondeo en la zona del cortijo de Peñuela, que alcanzó parcialmente el acuífero triásico. El sondeo no fue instalado pues se consideró que no aportaba caudal suficiente. El punto se ha incluido como un nuevo piezómetro (Peñuela IV) que reflejaría, al igual que ocurre con el piezómetro Camino, una equilibrio de niveles entre los acuífero jurásico y triásico, mientras que el piezómetro Peñuela II reflejaría exclusivamente lo que ocurre en el acuífero jurásico en la misma zona.

Los piezómetros situados en la zona profunda del acuífero jurásico (Imagen y Pichilín) y en la zona intermedia (Cabezo Alba, Porvenir y El Puntal) muestran un largo periodo de descensos desde el inicio de las medidas y una posterior estabilización. La estabilización se produce primero en los piezómetros situados más al sur y que cortan el acuífero jurásico a mayor profundidad, y posteriormente en los otros. Las variaciones interanuales están, básicamente, relacionadas con inicios y paradas de los periodos de bombeo agrícola. En cambio, en los piezómetros situados más al norte, junto al río Guadalimar, y que cortan exclusivamente el acuífero jurásico, se refleja una evolución más o menos acorde con la curva de desviaciones acumuladas, con descensos y subidas relacionadas con los periodos secos y húmedos. También se aprecia en el acuífero la influencia del caudal circulante por el río Guadalimar, tal y como se detalla en los informes anteriores a éste (CHG-AAA-IGME, 2012).

### 5.3 RELACIONES ENTRE EL RÍO GUADALIMAR Y LOS ACUÍFEROS JURÁSICO Y TRIÁSICO

En la figura 17 se muestra un plano en el que se han situado los puntos aforados y sus resultados. Los resultados han permitido demostrar por primera vez la existencia de ganancias de importancia previas a la entrada del cauce en los afloramientos de carbonatos jurásicos, es decir, debidas a descargas procedentes del acuífero triásico. La ganancia de caudal medida fue de 410 l/s. Esto responde a las previsiones apuntadas por el modelo de flujo realizado en 2012 (CHG-AAA-IGME, 2012), donde se indica que debía existir una descarga importante del Acuífero Triásico hacia el río Guadalimar.

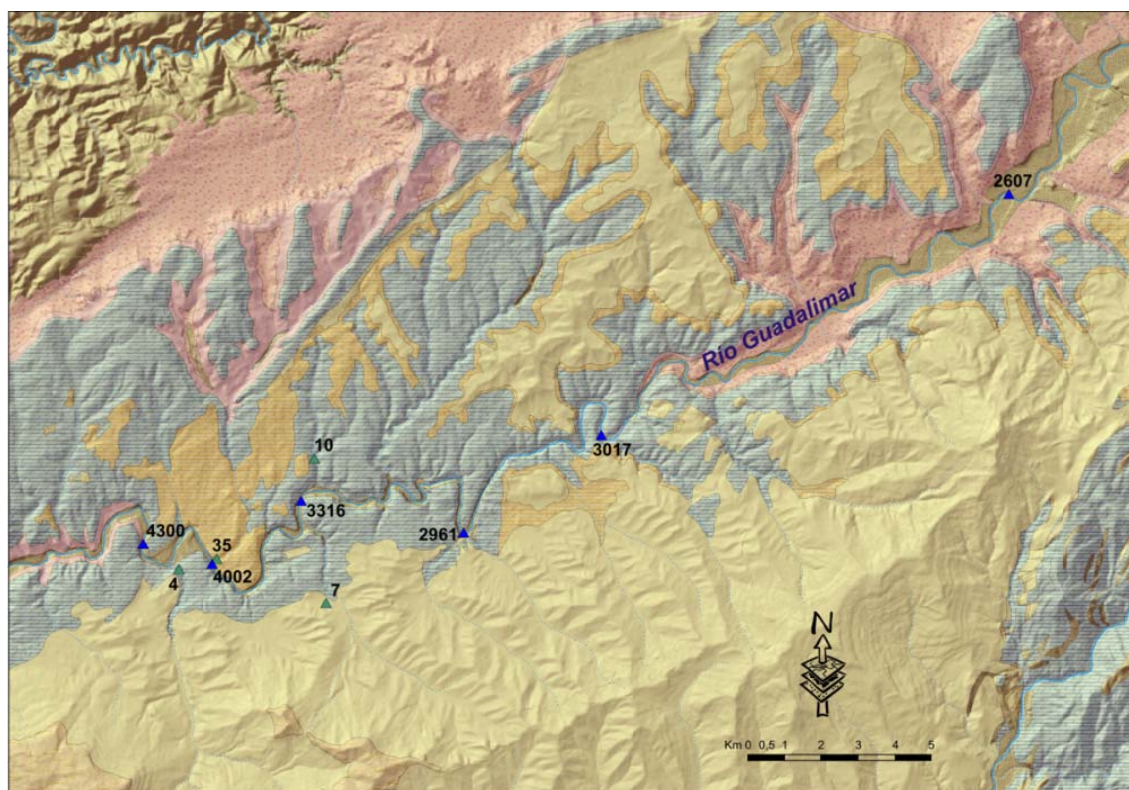


Figura 17. Localización de los puntos aforados en el entorno del Río Guadalimar a finales de noviembre de 2013. Los triángulos azules corresponden a puntos aforados en el cauce principal y los verdes en cauces tributarios.

En el tramo atravesado por el acuífero jurásico se han podido cuantificar parcialmente pérdidas en la zona en que estas ya habían sido identificadas con otras técnicas (meandro donde se sitúan los piezómetros S6 y S10), lo que confirma los resultados de los trabajos anteriores. Finalmente, se han podido también cuantificar los volúmenes de ganancias aguas abajo de esta zona de pérdidas hasta la entrada del río en el embalse del Giribaile. En resumen los caudales aforados han estado comprendidos entre 2607 l/s y 4300 l/s con un caudal medio de los 6 aforos de 3367 l/s.

## 5.4 HIDROQUÍMICA E ISÓTOPOS AMBIENTALES

### 5.4.1 Características físico-químicas generales

En el diagrama de Piper de la figura 18 se han diferenciado los puntos muestreados con distintos símbolos; su situación se puede ver en la figura 8. En el diagrama se observa una tendencia en los cationes hacia una sustitución del  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  por el  $Na^+$  y en los aniones dos conjuntos de facies. Por una parte las aguas evolucionan de bicarbonatada a sulfatada cálcico-magnésica y por otra de bicarbonatada cálcico-magnésica a clorurada sódica. Estos rangos de variación se interpretan como el resultado de mezclas entre aguas características de los carbonatos jurásicos y de las areniscas miocenas (bicarbonatada cálcico-magnésica), del Triásico (sulfatada cálcico-magnésica) y de las margas Miocenas (clorurada sódica) (González-Ramón *et al.*, 2012 y 2013a).

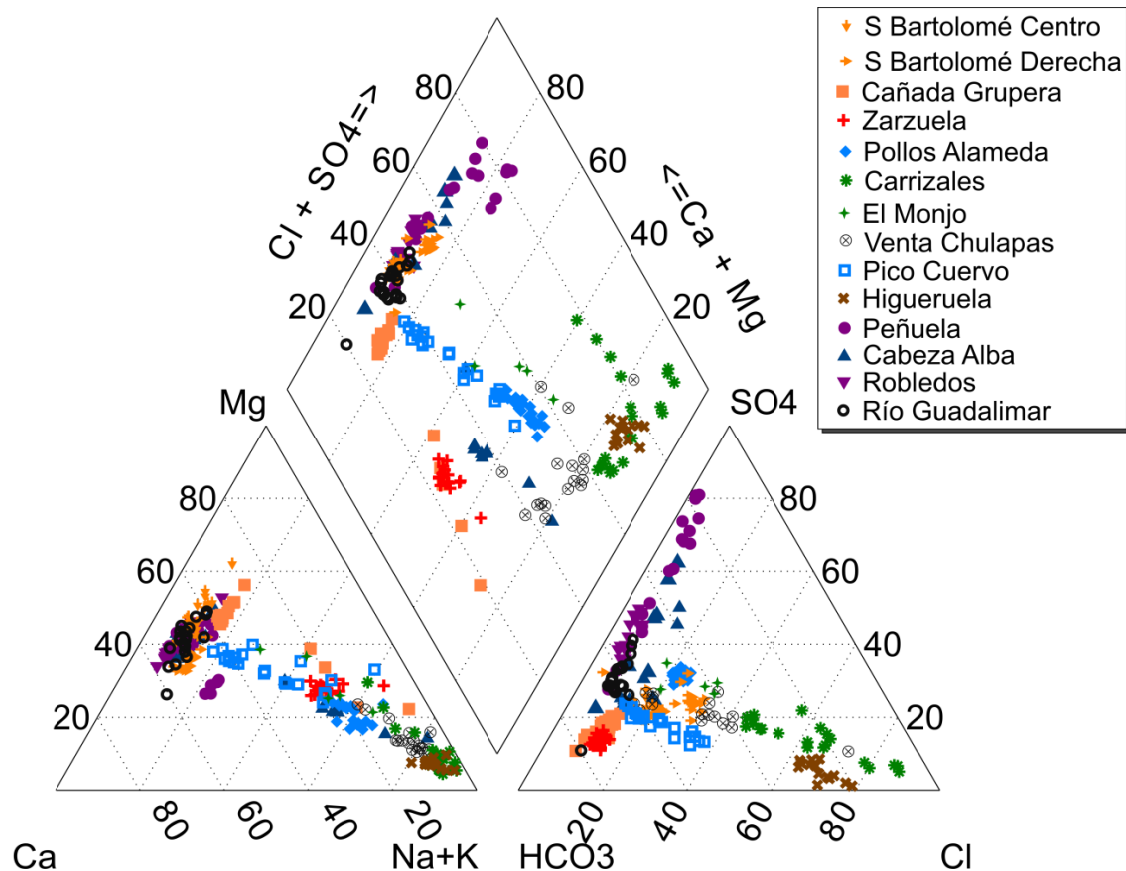


Figura 18. Diagrama de Piper de las muestras estudiadas



	CL	SO4	HCO3	NO3	NA	MG	CA	K	PH	CONDUC	SIO2	TEMPE
CL	1	-0.135	0.332	-0.211	<b>0.937</b>	-0.247	-0.337	<b>0.560</b>	0.235	<b>0.922</b>	-0.092	<b>0.584</b>
SO4	-0.135	1	-0.215	0.152	-0.071	<b>0.668</b>	<b>0.782</b>	0.269	-0.208	0.144	0.055	0.007
HCO3	0.332	-0.215	1	-0.364	0.429	-0.117	-0.379	0.378	-0.324	0.321	0.313	0.326
NO3	-0.211	0.152	-0.364	1	-0.346	0.464	0.499	-0.383	0.213	-0.138	0.299	<b>-0.542</b>
NA	<b>0.937</b>	-0.071	0.429	-0.346	1	-0.371	-0.432	<b>0.733</b>	0.148	<b>0.881</b>	-0.039	<b>0.725</b>
MG	-0.247	<b>0.668</b>	-0.117	0.464	-0.371	1	<b>0.830</b>	-0.178	-0.166	-0.013	0.200	-0.414
CA	-0.337	<b>0.782</b>	-0.379	0.499	-0.432	<b>0.830</b>	1	-0.218	-0.182	-0.090	0.032	-0.444
K	<b>0.560</b>	0.269	0.378	-0.383	<b>0.733</b>	-0.178	-0.218	1	-0.098	<b>0.632</b>	0.107	<b>0.656</b>
PH	0.235	-0.208	-0.324	0.213	0.148	-0.166	-0.182	-0.098	1	0.124	-0.167	-0.180
CONDUC	<b>0.922</b>	0.144	0.321	-0.138	<b>0.881</b>	-0.013	-0.090	<b>0.632</b>	0.124	1	-0.024	<b>0.568</b>
SIO2	-0.092	0.055	0.313	0.299	-0.039	0.200	0.032	0.107	-0.167	-0.024	1	-0.030
TEMPE	<b>0.584</b>	0.007	0.326	<b>-0.542</b>	<b>0.725</b>	-0.414	-0.444	<b>0.656</b>	-0.180	<b>0.568</b>	-0.030	1

Tabla 4. Matriz de correlación entre los distintos parámetros físico-químicos analizados.

La CE del agua aparece fundamentalmente correlacionada con los valores de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  y, en menor medida, también con la  $T^{\text{a}}$  (tabla 4), esto sugiere que la mezcla de agua intersticial procedente de las margas miocenas, con valores muy elevados de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , con aguas que circulan por el acuífero jurásico, mucho menos mineralizadas, es la que condiciona fundamentalmente la mineralización del agua en los acuíferos de la Loma, al menos en los puntos que perforan el acuífero jurásico bajo las margas miocenas. Por otra parte, el  $\text{NO}_3^-$  aparece correlacionado de forma negativa con la  $T^{\text{a}}$ , lo que es lógico, pues caracteriza aguas más superficiales y de menor recorrido en los acuíferos, y por tanto con menor  $T^{\text{a}}$ . Otra característica importante es la buena correlación entre el  $\text{SO}_4^{2-}$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  y la ausencia de correlación entre el primero y la CE. Esto se explica porque la mayoría de las muestras proceden de sondeos profundos, en los que los valores más elevados en  $\text{SO}_4^{2-}$  coinciden con las aguas de menor mineralización, pues se trata de aguas relacionadas con los acuíferos jurásico y triásico. La mezcla de estas aguas con aguas intersticiales procedentes de las margas miocenas provoca la reducción del  $\text{SO}_4^{2-}$ , que pasa a gas sulfhídrico, pues en las margas existen condiciones fuertemente reductoras y elevada presencia de materia orgánica. Estas aguas, con bajos contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$  y altos contenidos en  $\text{Cl}^-$ , son las que tienen la CE más elevada.

#### 5.4.2 Estudio de las mezclas de aguas. El Análisis de Componentes Principales (ACP)

Los ACP permiten identificar los factores que influyen decisivamente en la variabilidad del conjunto de datos estudiados. En trabajos hidroquímicos son utilizados especialmente para estudiar la procedencia de la mineralización y los principales factores que influyen en la misma, pero también se utilizan para diferenciar grupos o familias de aguas dentro de la muestra disponible.

De forma muy resumida, el fundamento del ACP es realizar una transformación lineal de los datos y construir un sistema de coordenadas en el cual la varianza del mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje, la segunda varianza en el segundo eje y así sucesivamente.

En la figura 19 se muestra el ACP para las variables consideradas (gráficos superiores) y para las observaciones en los planos de los factores 1 y 2, que explican el 56 % de la varianza total, y de los factores 1 y 3, que explican el 48 %. El factor 1 representa la mineralización total, a la

que contribuyen decisivamente el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Na}^+$ , también con una elevada contribución de la  $\text{T}^{\text{a}}$ . El factor 2 refleja muy bien la influencia de aguas que han tenido relación con el acuífero triásico, con el  $\text{SO}_4^{2-}$  con el mayor peso seguido del  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ , todos ellos correlacionados entre sí. Por otra parte, también los valores isotópicos ambientales del agua tienen un peso significativo. En el factor 3 es el pH el valor que contribuye con mayor porcentaje, con cerca del 22 %, lo que aporta información sobre los procesos de disolución-precipitación que pueden afectar a los carbonatos que forman el acuífero jurásico, posiblemente relacionada con mezclas de aguas reductoras y oxidantes.

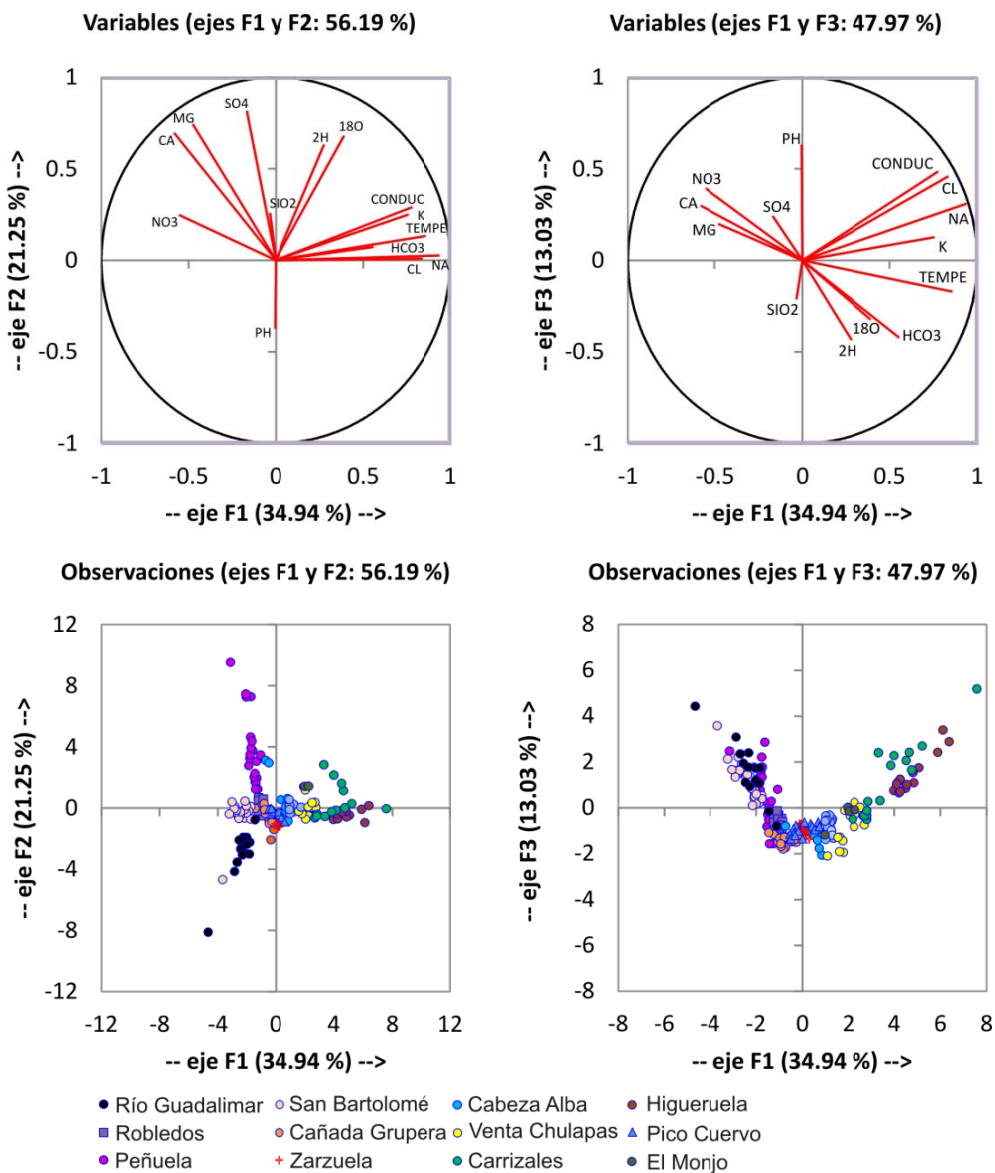


Figura 19. ACP de las variables consideradas (gráficos superiores) y de los casos (inferiores) en los planos de los factores 1 y 2 y 1 y 3.

En los gráficos inferiores se asigna una diferente simbología a las observaciones procedentes de cada punto muestreado. Esto permite visualizar con mayor claridad los procesos que

afectan a las aguas estudiadas. En ambos gráficos se aprecia una clara ordenación de las observaciones según el eje 1 que es consecuencia del grado de mineralización de las aguas muestreadas. Las aguas con menor mineralización corresponden al río Guadalimar y a la galería San Bartolomé, seguida de los sondeos Peñuela y Robledos, a continuación se sitúan las aguas muestreadas en la zona occidental y oriental del área y finalmente, se observa una evolución lineal norte-sur en la zona central, que está relacionada con la profundidad a la que es captado el acuífero jurásico. El factor 2 muestra la gran variabilidad del contenido en  $\text{SO}_4^{2+}$  de las aguas muestreadas en el sondeo Peñuela, con mayor o menor influencia del acuífero jurásico o triásico según la época de muestreo. En los sondeos Cabeza Alba, Carrizales y Venta Chulapas se observa algo parecido, si bien en este caso las diferencias son debidas a la mayor o menor influencia del agua intersticial muy mineralizada procedente de las margas miocenas. El factor 3 muestra la existencia de un ambiente de aguas más ácidas en las zonas centrales de los acuíferos y zonas de aguas más básicas tanto en la zona profunda situada al sur, como en las áreas con aguas más jóvenes situadas al norte y oeste de los acuíferos.

De los ACP se puede deducir que las variables de estudio más interesantes serían por una parte la  $\text{CE}$ ,  $\text{T}^\circ$  y  $\text{Cl}^-$  y por otra el  $\text{SO}_4^{2+}$ , el pH y el  $\delta^{18}\text{O}$ .

#### 5.4.3 Estudio de las variaciones temporales

Los sondeos Peñuela y Robledos se ubican en el entorno de un pronunciado meandro que describe el río Guadalimar, que ha podido constatararse como un tramo perdedor, donde el río alimenta al acuífero jurásico (González-Ramón *et al.*, 2008) (figura 8 y figura 17). El sondeo Robledos tiene 230 m de profundidad, con un espesor de carbonatos jurásicos cortado de unos 80-100 y el resto materiales triásicos. No se conoce la posición del nivel piezométrico en este sondeo, sin embargo, se sabe que el espesor saturado en el acuífero jurásico es del orden de 30 m, pues se mide en un piezómetro cercano. El sondeo Peñuela tiene 220 m de profundidad y una columna similar. Tampoco aquí se conoce la posición del nivel piezométrico, pero sí en un sondeo situado muy cerca, que solo corta el acuífero jurásico; el espesor saturado es generalmente del orden de 10 m. El agua extraída en ambos sondeos corresponde a una mezcla aportada por los acuíferos jurásico y triásico en porcentajes variables que dependen de la situación climática y de los periodos de bombeo (figura 20). Sus aguas presentan facies bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica, que evoluciona hacia sulfatada cálcico-magnésica en los periodos de estiaje, cuando el bombeo es mayor, y en dirección sur, del sondeo Robledos hacia el Peñuela.

En el resto de sondeos muestreados no se conoce con precisión la columna litológica cortada, si bien todos ellos deben penetrar en el Acuífero Jurásico profundo bajo las margas miocenas. La excepción es el sondeo Cañada Grupera, que corta exclusivamente areniscas y margas miocenas. Por otra parte se muestreó también la galería de San Bartolomé, de abastecimiento a Úbeda, excavada exclusivamente en areniscas miocenas y el río Guadalimar a la altura de los sondeos Robledos y Peñuela. Además, los sondeos Zarzuela y Pollos Alameda cortan el acuífero Mioceno Superior, antes de alcanzar el acuífero jurásico profundo. Se dispone, por tanto de muestreos que abarcan toda la variedad de aguas implicadas en los acuíferos de la Loma de Úbeda.

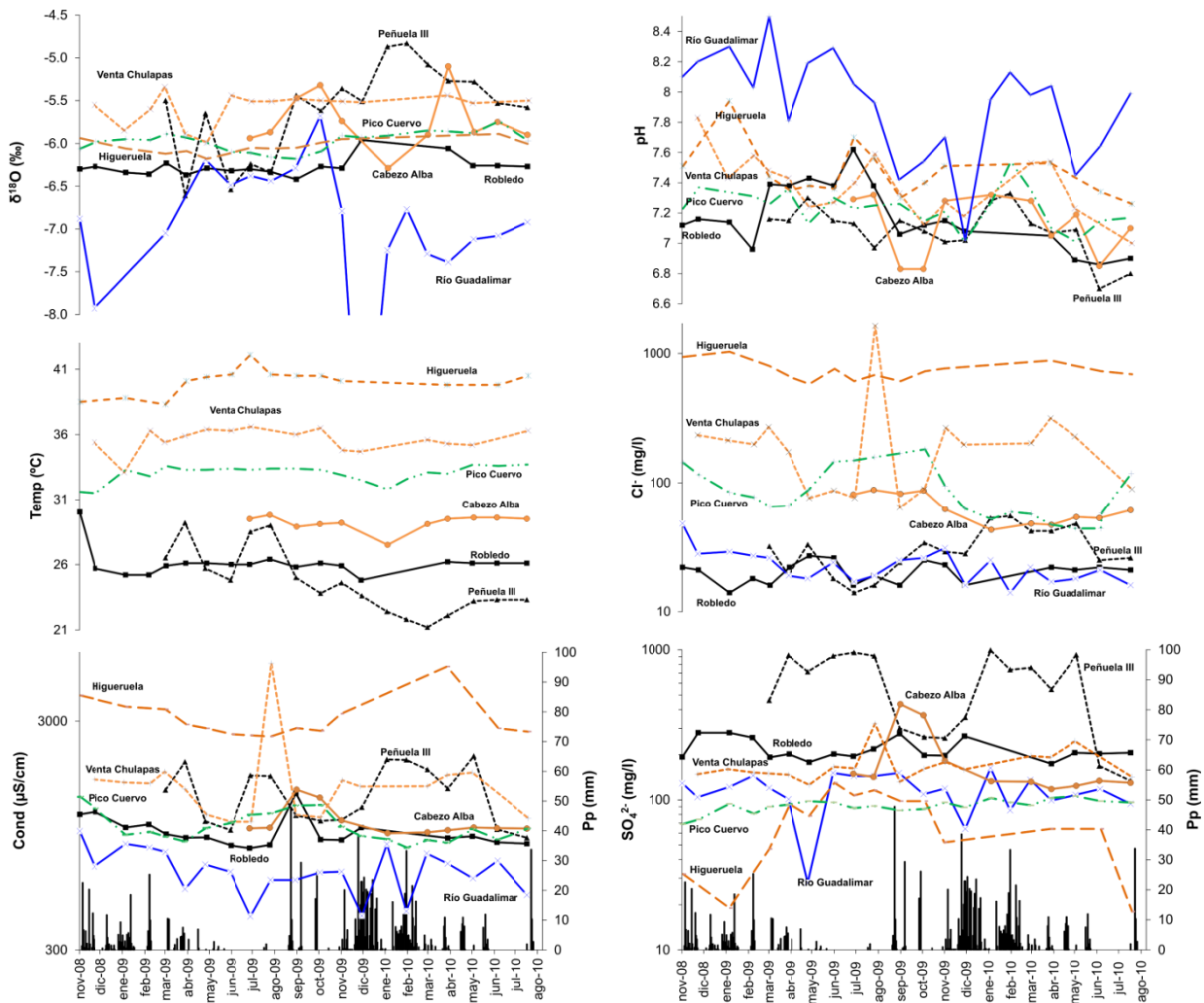


Figura 20. Evolución temporal de algunos parámetros físico-químicos e isotópicos en los sectores central y oriental de los acuíferos de la Loma de Úbeda

En el sondeo Cabezo Alba se observan aguas bicarbonatadas-sulfatadas o sulfatadas cálcico-magnésicas o sódicas, con incrementos del  $\text{HCO}_3^-$  en sentido contrario al del  $\text{SO}_4^{2-}$  (figura 18). El  $\text{SO}_4^{2-}$  se incrementa en estiaje, durante las campañas de bombeos. En la zona meridional, donde el acuífero se encuentra a gran profundidad bajo las margas miocenas, el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Na}^+$  van siendo paulatinamente los iones mayoritarios. En Venta Chulapas y Carrizales la mezcla con aguas de facies clorurada sódica es menor durante las campañas de bombeo, en cambio en el sondeo Higuera, el situado más al sur, el agua presenta unas características más uniformes a lo largo del año con los valores del  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  más elevados de todos los muestreados (figuras 20 y 21).

En la zona oriental, el sondeo Pico Cuervo presenta aguas bicarbonatadas con inferiores valores en  $\text{SO}_4^{2+}$  que en los anteriores, con excepción del Higuera donde existen las aguas más reductoras. El sondeo El Monjo presenta aguas similares, aunque con valores en  $\text{SO}_4^{2+}$  ligeramente más elevados (figura 18), lo que sugiere que tal vez este sondeo corte las arcillas triásicas bajo el acuífero jurásico.



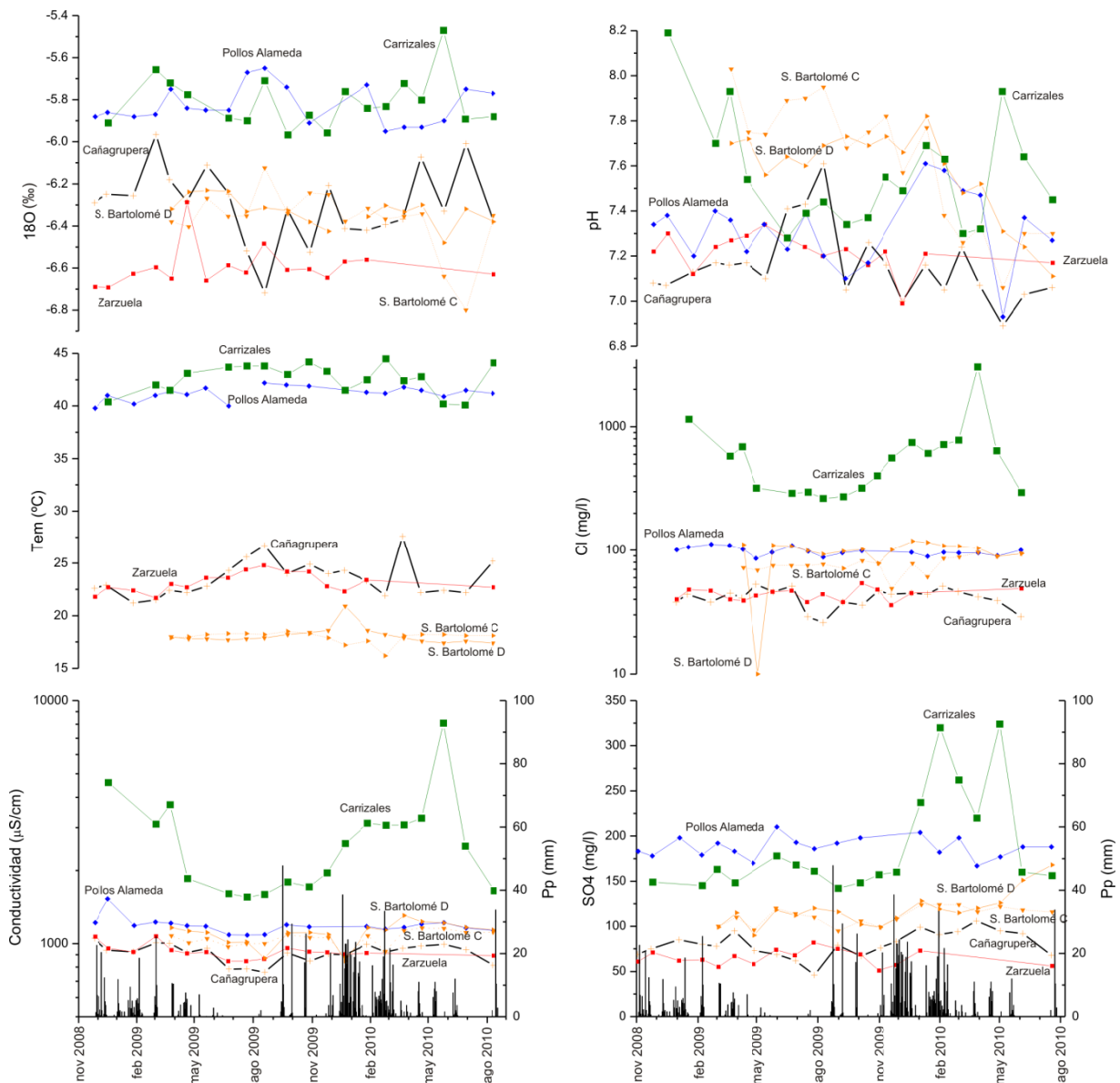


Figura 21. Evolución temporal de algunos parámetros físico-químicos e isotópicos en los sectores central y occidental de los acuíferos de la Loma de Úbeda

Los puntos muestreados en la zona occidental (S. Bartolomé, Zarzuela, Pollos Alameda y Cañada Gruper) presentan, en general, aguas de facies bicarbonatada cálcico magnésica con algunas muestras con elevados valores en  $\text{Na}^+$  pero bajos en  $\text{Cl}^-$  y a su vez moderados contenidos en  $\text{SO}_4^{2+}$ , curiosamente más elevados en las aguas más superficiales, las de las galerías de San Bartolomé. Estas características parecen indicar que no existe influencia del acuífero triásico en las aguas captadas por estos puntos, pues el  $\text{SO}_4^{2+}$  no es mayoritario y parece estar asociado a materiales miocenos. Por otra parte, las areniscas miocenas que coronan la serie geológica podrían condicionar en gran medida el quimismo de las aguas captadas por los sondeos profundos, pues el contenido en  $\text{Cl}^-$  es bajo (figura 21), y el lavado de las margas miocenas suele aportar mucho  $\text{Cl}^-$  al agua subterránea (González-Ramón, *et al.*, 2012). Esto no parece ocurrir cuando el agua ha circulado fundamentalmente por las areniscas miocenas.

### 5.3.4 Características del contenido en isótopos estables del agua subterránea

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se han usado para estudiar el origen de la recarga al conjunto de las aguas estudiadas. Los valores más ligeros de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  corresponden al agua del río Guadalquivir (figuras 20 y 22) y se ajustan bien a la Línea Meteórica Media Mundial (LMMM). No obstante, hay bastantes muestras del río que están evaporadas en distinto grado, es decir, se sitúan claramente por debajo de la LMMM (Clark and Fritz, 1997). Esto se ha relacionado con la existencia de desembalses en la presa del Guadalmena situada aguas arriba (González-Ramón, *et al.*, 2012 y 2013a). Las aguas con signos de evaporación serían aguas que previamente habrían estado almacenadas en dicho embalse.

En el sondeo Robledos, ubicado en la margen derecha del río, es donde se observa una mayor uniformidad en los valores (figura 20) y un mejor ajuste a la LMMM (figura 22). Esto sugiere que ese sondeo recibe agua de procedencia poco o nada variable en el tiempo. En el resto de puntos los valores isotópicos muestran características de aguas evaporadas. Además, en general se observa bastante dispersión de valores, lo que indica que la procedencia del agua en ellos es variable. El sondeo Peñuela, el más cercano al río en su margen izquierda, es el que muestra la mayor variación en el tiempo, y aunque en menor media, también se observa una variación importante en los sondeos Cabeza Alba y Venta Chulapas (figuras 20 y 22).

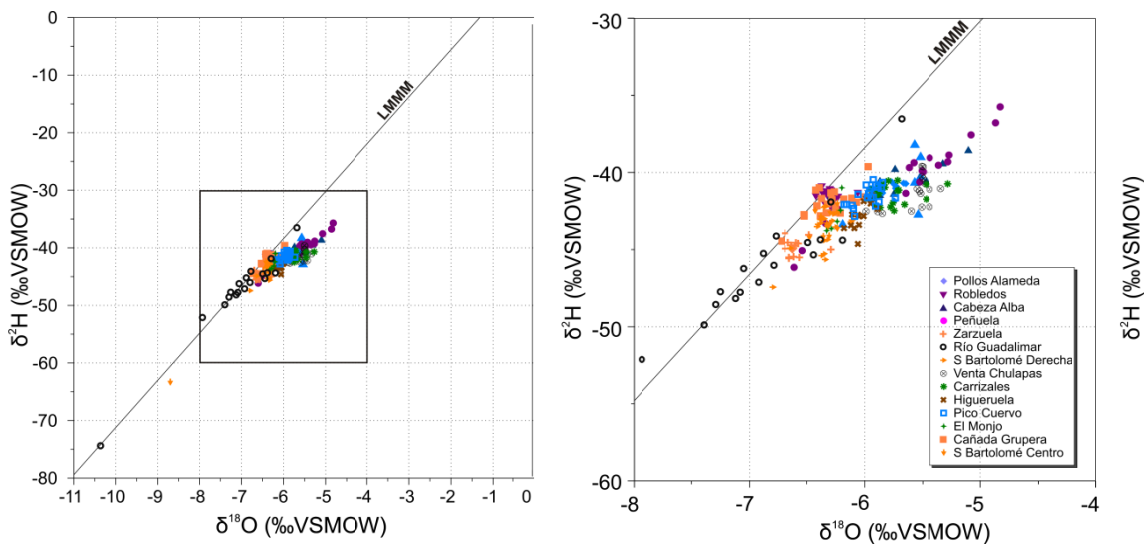


Figura 22. Relación entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  y la línea meteórica media mundial (LMMM). Derecha: detalle de la zona enmarcada en el gráfico izquierdo

Curiosamente el sondeo Higuera, el más profundo y alejado del río y ubicado en el jurásico confinado, presenta valores parecidos a los del sondeo Robledos, aunque con aguas más pesadas que aquél. Dado que este sondeo tiene aguas cloruradas sódicas (ver Figura 18) y valores de la relación Cl/Br cercanas a las del agua de mar, es posible que el enriquecimiento isotópico de esas aguas se deba en parte a la mezcla con agua de origen marino de las margas, que además podría estar evaporada en origen (González-Ramón *et al.*, 2012).

La superficie de afloramiento de las areniscas miocenas se sitúa en torno a la cota 800 m; en cambio, en los acuíferos jurásico y triásico, la cota de los afloramientos varía entre 400 y 800 m con una media de 600 m. Estas diferencias pueden explicar que los valores analizados en las

aguas relacionadas con el acuífero mioceno sean, en general, inferiores a los observados en el resto de puntos que captan aguas procedentes de los acuíferos jurásico y triásico. Estos últimos puntos suelen mostrar características de aguas evaporadas (Clark and Fritz, 1997), además, se observa bastante dispersión de valores, lo que indica que la procedencia del agua en ellos es variable. Los valores de los puntos de la zona occidental de la Loma de Úbeda están más agrupados, especialmente los procedentes de los sondeos Zarzuela y Pollos Alameda. En este último aparecen aguas más pesadas, similares a las observadas en el resto de puntos que captan el acuífero jurásico confinado (Cabeza Alba, Pico Cuervo, El Monjo, Carrizales, Venta Chulapas e Higuera) y con menor variabilidad, posiblemente debido a que se trata de un sondeo de uso industrial con bombeos diarios a lo largo de todo el año (figuras 20, 21 y 22). Las aguas más ligeras de la zona occidental son las captadas por el sondeo Zarzuela, lo que parece indicar que se trata de un sondeo que bombea fundamentalmente aguas procedentes del acuífero detrítico mioceno. El sondeo Cañada Grupera muestra valores característicos del acuífero mioceno pero con algunos otros que parecen evolucionar hacia aguas similares a las captadas por el sondeo Pollos Alameda (figura 21).

## 6. CONCLUSIONES

En la MASb 05.23 Úbeda se distinguen 4 formaciones acuíferas superpuestas en la vertical denominadas de muro a techo: Acuífero Triásico, Acuífero Jurásico, Acuífero Mioceno Inferior y Acuífero Mioceno Superior. Entre ellos existen complejas relaciones hidráulicas, con áreas en las que hay transferencias de aguas. Además, también existe relación con las aguas superficiales circulantes por el río Guadalimar, que atraviesa los acuíferos jurásico y triásico desde el NE hacia el SO.

Para caracterizar la geometría de los acuíferos se ha realizado un modelo geológico en 3 dimensiones con la ayuda de software utilizado por las industrias de explotación de hidrocarburos y minería. Estos programas permiten integrar información cartográfica y estructural de superficie con información geofísica (sísmica de reflexión) y procedente de columnas de sondeos. Para la elaboración del modelo se ha utilizado información procedente de 195 sondeos y de 26 líneas sísmicas a las que se les ha realizado una nueva interpretación. Por otra parte, se ha realizado una nueva fotointerpretación de la cartografía geológica incluyendo numerosas medidas de dirección y buzamiento de la estratificación y de datos cinemáticos en fallas. El resultado final es la reconstrucción de tres superficies geológicas (base del triásico, base del Jurásico y base del Mioceno) y un total de 23 fallas.

Para complementar la información de los perfiles sísmicos y sondeos, se realizaron medidas gravimétricas distribuidas a lo largo de dos perfiles, uno en el entorno de Úbeda y otro entre Sabiote y Torreperogil. Estos nuevos datos gravimétricos se complementaron con 100 datos adicionales procedentes de la base de datos del IGME. La información obtenida ha sido especialmente relevante para delimitar las estructuras tectónicas, previamente descritas, en áreas donde no había otra información disponible.



El modelo muestra una morfología tabular con buzamientos de unos 2° hacia el sur para el conjunto mesozoico (Triásico y Jurásico), con espesores que se incrementan gradualmente hacia el sur. El conjunto está afectado por numerosas fallas y pliegues suaves. Las fallas son generalmente normales, con una orientación media N50E y buzamientos de unos 80° tanto al SE como al NO. Los saltos medios obtenidos son de 80 m con longitudes de unos 10 km de promedio. El Jurásico disminuye progresivamente su espesor hacia el oeste hasta desaparecer; en cambio, hacia el sur el espesor va aumentando hasta valores de 220 m. Su espesor medio en la zona explotada es de 90 m. El triásico tiene espesores medios de unos 300 m.

En el marco del proyecto se han realizado 8 campañas de medidas piezométricas en 12 puntos, complementadas con las realizadas por la CHG en el único punto de control ubicado en la MASb. Los datos obtenidos son comparados con los curvas de desviación de la media acumulada con respecto a la precipitación de datos procedentes de la estación agroclimática de la Junta de Andalucía ubicada en Sabiote. La información piezométrica obtenida caracteriza el acuífero jurásico libre en ambas márgenes del Guadalimar y confinado en la zona sur, excepto en los piezómetros Camino y Peñuela 4 donde hay una mezcla entre los acuíferos jurásico y triásico. Estos dos sondeos cortan por completo el acuífero jurásico y penetran parcialmente en el acuífero triásico. Desde 2010 no hay información en el sector de Villanueva del Arzobispo.

En el acuífero jurásico libre se observa una rápida respuesta a las precipitaciones en los periodos húmedos, con subidas del nivel piezométrico. En general, los niveles se mantienen más o menos estabilizados a lo largo del periodo de medidas. Sin embargo, la mayor parte de las extracciones en esta zona se realizan en el acuífero triásico, donde no hay un control de niveles piezométricos suficiente para conocer su estado. Es posible que en este acuífero se esté produciendo un desequilibrio que lleve a descensos acumulados interanuales, pero esto por ahora no ha podido ser comprobado.

Actualmente, solo se controla un piezómetro en la zona profunda del acuífero jurásico (el piezómetro Pichilín), donde la explotación es más importante, sin embargo este piezómetro refleja bien lo que ocurre en este sector. Los datos indican que las variaciones interanuales de la piezometría en esta zona están básicamente controladas por los inicios y paradas de las campañas de bombeo para regadío de olivar. Por otra parte, desde aproximadamente el año 2009, se observa que se ha producido una estabilización del nivel piezométrico a cotas en torno a 305-310 m s.n.m., con un descenso total desde 2001 de unos 50 m.

Se interpretan datos hidroquímicos e isotópicos temporales obtenidos en sondeos, en una galería y en el río Guadalimar, procedentes de una serie mensual continuada de muestreos realizados entre 2008 y 2010. La información obtenida muestra la existencia de zonas con mezclas de aguas relacionadas con areniscas miocenas, margas miocenas, carbonatos jurásicos y areniscas y arcillas triásicas. Por otra parte, además se observa en algunos puntos la influencia de aguas que circulan por el río Guadalimar.

En el acuífero jurásico confinado se observa una gran influencia en la mineralización de aguas intersticiales contenidas en las margas miocenas, que se caracterizan con tener valores muy elevados de Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>. En los sondeos situados cerca del cauce del río Guadalimar, en ambas

márgenes, se observan diferencias estacionales en la mineralización del agua subterránea que dependen de grado de mezcla del agua procedente de los acuíferos jurásico y triásico y del río Guadalimar. En estiaje, cuando el acuífero jurásico tiene un pequeño espesor saturado, el agua se caracteriza por elevados contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$  y una  $T^\circ$  más elevada, lo que se relaciona con agua mayoritariamente procedente del acuífero triásico. En la zona central del acuífero jurásico confinado se observan en estiaje aguas características de mezclas entre los acuíferos jurásico y triásico, pero en los periodos invernales hay una gran influencia de aguas intersticiales de las margas miocenas. Más al sur, donde el acuífero jurásico aparece a mayor profundidad, la mineralización del agua es más estable, con una mayor influencia de las aguas contenidas en las margas miocenas. En la zona occidental muchos sondeos cortan el acuífero superior mioceno y bajo él las margas miocenas y el acuífero jurásico. La composición química de las aguas muestra la influencia de aguas contenidas en las areniscas miocenas.

El agua circulante por el río Guadalimar muestra importantes variaciones en los valores isotópicos, que son consecuencia de la existencia o no de desembalses en el embalse del Guadalmena, situado aguas arriba. En la mayoría de los puntos muestreados se observa una importante variabilidad en los valores isotópicos que dependen en gran medida del grado de mezcla de aguas contenidas en los diferentes acuíferos implicados. Las aguas contenidas en las margas miocenas son aguas que han sufrido evaporación previa a su infiltración. En las areniscas miocenas las aguas se caracterizan por unos valores isotópicos más ligeros que las aguas contenidas en el acuífero jurásico, lo que permite su diferenciación.

## 7. RECOMENDACIONES

La **modelización geológica 3D** de los acuíferos supone un importantísimo avance que va a permitir en el futuro estudiar mejor las complejas relaciones entre acuíferos existentes. En 2012 se presentó un **modelo numérico tridimensional multicapa** para tratar de simular las relaciones entre los distintos acuíferos existentes (CHG-AAA-IGME, 2012). Sin embargo, el avance que supone la modelización geológica implica que **dicho modelo debe rehacerse por completo, basado en la nueva geometría definida y en la información sobre mezclas de aguas que aportan los nuevos datos hidroquímicos e isotópicos**. Esto permitirá una aproximación más realista al estudio de los acuíferos y a la mejor comprensión del modelo de funcionamiento hidrogeológico. Por tanto podrá contribuir decisivamente a mejorar la toma de decisiones en lo que respecta a los volúmenes de aguas concesionadas en los diferentes sectores modelizados.

Otro aspecto importante que puede ser abordado gracias a la existencia del modelo geológico es el **estudio de los volúmenes de agua almacenados en el acuífero jurásico**. Esto podría llevarse a cabo de manera precisa gracias a la existencia de los testigos de los sondeos que el IGME construyó para el estudio de la piezometría. A partir de estos testigos es posible estudiar detalladamente la porosidad y permeabilidad de la matriz del acuífero, lo que junto con la información existente de ensayos de bombeo permitirá alcanzar un grado de conocimiento satisfactorio del agua que el acuífero almacena. Esto también puede abordarse en las areniscas

triásicas y miocenas mediante una campaña de recogidas de muestras de rocas en campo, lo que permitiría también abordar el **estudio de reservas** en estos acuíferos.

Actualmente **el control piezométrico en el conjunto de acuíferos es claramente insuficiente**. En la margen derecha del Guadalimar, en la zona norte, **el acuífero jurásico está suficientemente bien controlado, no así el acuífero triásico**, precisamente donde se están extrayendo actualmente los mayores volúmenes. **Urge la construcción de varios piezómetros enfocados al control exclusivo de este acuífero** aislando previamente el acuífero jurásico, solo así se podrá valorar el impacto que las explotaciones de agua subterránea producen, ya que el acuífero triásico también influye de manera muy importante en lo que ocurre en la margen izquierda del Guadalimar, pues contribuye a la recarga del acuífero jurásico confinado profundo.

En la **zona del acuífero profundo** solo existe un piezómetro en el que se puedan medir los niveles directamente. Este piezómetro se encuentra desprotegido y en cualquier momento podrían quedar inutilizado por caídas de piedras o actos vandálicos o accidentales de cualquier tipo. La construcción de nuevos puntos de control en esta zona es cara y compleja, por lo que **debería al menos de protegerse este piezómetro** y estudiar la posibilidad de instalar un sensor de medida continua en él. Por otra parte **deben buscarse nuevos puntos de control en la zona profunda confinada o bien construir piezómetros en ella**. Como ya se ha dicho, la construcción de piezómetros en esta zona es costosa, pero los volúmenes de extracciones existentes y el impacto socioeconómico de las extracciones en la economía de la zona es de tal importancia que justifica sobradamente esta inversión.

También en el sector occidental, **en el entorno de Villacarrillo y Villanueva del Arzobispo deben buscarse o construirse piezómetros**, pues actualmente no existe ningún control sobre lo que ocurre en estas zonas.

Otro aspecto importante es conocer, con la mayor precisión, los **volúmenes de explotación anuales, los puntos desde donde se producen y sus variaciones interanuales** en función de la pluviometría y de otras posibles causas. Esto permitirá precisar los datos de entrada al modelo de flujo y mejorar su calibración.

Debería llevarse a cabo un análisis profundo sobre la **posibilidad de utilización de caudales en periodos húmedos para recarga artificial**, tanto procedentes del río Guadalimar como del río Guadalquivir, y llevar a cabo experiencias en zonas a concretar. La viabilidad de la recarga artificial ha sido avalada por el modelo de uso conjunto realizado en 2012 (CHG-AAA-IGME, 2012; Gómez-Gómez y González-Ramón, 2012).

## 8. REFERENCIAS

Angoloti-Apolinario, J.M.; Gómez García, L.M.; Bellver-Gallego; Gollonet-Fernández de Tres Palacios (2008). Balance tras quince años de explotación del acuífero jurásico profundo de la Loma de Úbeda y perspectivas de futuro para un uso sostenible. *VII Simposio del Agua en Andalucía*: 795-808. IGME.



CHG-AAA-IGME (2012). *Realización de investigaciones complementarias en la Loma de Úbeda. Pautas para la sostenibilidad del acuífero*. 4 T. Informe interno

CHG-CGS (2005). *Diagnóstico sobre el acuífero 05.23 de la Loma de Úbeda y redacción de recomendaciones de actuación, TM. Úbeda (Jaén)*. Informe interno.

CHG-IGME (2001). Norma de explotación de la U.H. 05.23 Úbeda. *Revisión y actualización de las normas de explotación de las Unidades Hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete-Barbate. Propuesta de normativa y definición de nuevas Unidades hidrogeológicas*. Convenio CHG-IGME año 2000-2001.

DGOH (1994). *Unidad hidrogeológica 05.23 Úbeda*. Normas de explotación de las unidades hidrogeológicas: 01, 08, 13, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 38, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 53, 60, 61, 62 y 63 en la Cuenca del Guadalquivir. Memoria y Planos.

DGOH-IGME (2001). *Proyecto de actualización de la infraestructura hidrogeológica de las Unidades de Cazorra, Quesada, Segura y Loma de Úbeda*. Informe interno

Gómez-Gómez, J.; González-Ramón, A. (2012). Simulación de la gestión conjunta de recursos hídricos superficiales y subterráneos en la Loma de Úbeda. *VIII Simposio del Agua en Andalucía*. Vol.II: 957-969. Cádiz.

González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Benavente, J.; Hidalgo, M.C.; Marín-Lechado, C.; Molina-Molina, A.; López-Martos, J.J.; Peinado, T. y Rubio-Campos, J.C. (2002). Acuíferos del borde de la meseta en la provincia de Jaén. *Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces*: 219-229. IGME-CHG-COPTJA-DPG.

González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Peinado, T.; Moreno, J.A.; Núñez, I.; Heredia, J. y Rubio-Campos, J.C. (2008). Relación hidrogeológica entre el acuífero jurásico de la Lomas de Úbeda y el río Guadalimar. En: López-Geta, J.A.; Rubio, J.C. y Martín-Machuca, M. (Eds.). *VII Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. 251-262.

González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Rubio-Campos, J.C. y Núñez, I. (2007). *Los acuíferos de la Loma de Úbeda (Jaén)*. González-Ramón, A., Rubio-Campos, J.C. y López-Geta, J.A. (Eds.). IGME-AUAS. Madrid. 56 p.

González-Ramón, A., Heredia, J., Rodríguez-Arévalo, J., Manzano, M., Ortega, L., Muñoz de la Varga, D., Moreno, J.A. y Díaz Teijeiro, M.F. (2012). Evolución temporal de las características físico-químicas e isotópicas en el agua subterránea de los acuíferos de la Loma de Úbeda (sur de España). *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. San Sebastián.

González Ramón, A.; Moreno Martínez, J.A. y Heredia Díaz, J.G. (2013a). Variaciones temporales en los parámetros físico-químicos e isotópicos del agua subterránea en la zona suroccidental de la Loma de Úbeda (Sur de España). *X Simposio del Hidrogeología*. T-XXX: 295--304. Granada.

González-Ramón, A.; Rodríguez-Arévalo, J.; Martos-Rosillo, S.; Gollonet, J. (2013b). Hydrogeological research on intensively exploited deep aquifers in the “Loma de Úbeda area (Jaén, Southern Spain). *Hydrogeology Journal*. 21: 887-903

Gollonet, J.; González-Ramón, A.; Moreno, J.A. (2008). Nuevos datos sobre la geometría del acuífero jurásico profundo de la Loma de Úbeda. En: López-Geta, J.A.; Rubio, J.C. y Martín-Machuca, M. (Eds.). *VII Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. 241-250.

Gollonet, J.; Rubio-Campos, J.C.; Martín-Montañés, C.; González-Ramón, A. y Peinado, T. (2001). Los acuíferos de la Loma de Úbeda, reserva estratégica para el desarrollo del olivar. *Jornadas sobre presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. Linares (Jaén). T-1: 379-383. DPG-UJ-IGME.

Heredia, J.; González-Ramón, A.; Rodríguez, J.; Gollonet, J. Roldán, F. y Rubio, J.C. (2008). Acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda. Propuesta para una explotación sostenible basada en la modelación numérica. En: López-Geta, J.A.; Rubio, J.C. y Martín-Machuca, M. (Eds.). *VII Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. 779-794.

Heredia, J.; Manzano, M.; Ortega; L.; González-Ramón, A.; Rodríguez Arévalo, J.; Muñoz de la Varga, D. (2012). Contraste numérico de las aportaciones preliminares del <sup>222</sup>Rn al modelo de funcionamiento del Sistema Acuífero Profundo de Úbeda, SAPU (Jaén, España). *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. San Sebastián, España.

Heredia, J.; Manzano, M.; González Ramón, A. Ortega L.; Rodríguez-Arévalo; J. y Muñoz de la Varga, D. (2013a). Modelación numérica del sistema acuífero profundo de Úbeda: Gestión Hídrica e Investigación. *X Simposio del Hidrogeología*. T-XXX: 753-763. Granada.

Heredia J.; Manzano M.; González-Ramón A.; Ortega L.; Rodríguez Arévalo J.; Muñoz de la Varga D. (2013b). El modelo de flujo de la Loma de Úbeda (España): una herramienta de gestión sostenible y de investigación. En: González, Kruse, Trovatto, Laurencena (eds.). *VIII Congreso Argentino de Hidrogeología “Agua subterránea recurso estratégico”* Tomo II. La Plata, Argentina

Heredia, J.; Rodríguez, J. y González-Ramón, A. (2009). Identificación de un modelo conceptual mediante modelación numérica integrando información isotópica e hidroquímica: El acuífero profundo de Úbeda (España). En: Mariño, E.E. y Schulz, C.J. (Eds.). *Aportes de la hidrogeología al conocimiento de los recursos hídricos. VI Congreso Argentino de Hidrogeología*. T II: 681-690. Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

Heredia, J.; González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Moreno, A. y López-Geta, J.A. (2011). Un modelo tridimensional de flujo como herramienta para la planificación de la explotación sostenible de un sistema acuífero profundo: la Loma de Úbeda (Jaén). *Congreso Ibérico Aguas Subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI*. Zaragoza.

Heredia, J.; Pardo-Igúzquiza, E.; González-Ramón, A. (2014). Stochastic Modelling of the 3D Geometry of a Faulted and Folded Deep Carbonate Aquifer: Loma de Úbeda (Southern Spain). *Mathematics of Planet Earth*. Lecture Notes in Earth System Sciences, pp 767-770

ITGE-CHG (1993). *Propuesta de Normas de Explotación de la U.H. 05.23 (Úbeda)*.

Martín-Montañés, C.; Gollonet, J.; González-Ramón, A.; Rubio-Campos, J.C. y Rodríguez-Medina, I.C. (2005). Uso conjunto en abastecimiento urbano. Posibilidades de aplicación a la Comarca de Úbeda. *Jornadas Internacionales: De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada*. Alicante. Spain.

MOPU-IGME (1988). *Estudio 07/88. Delimitación de las Unidades Hidrogeológicas del territorio peninsular e islas Baleares y síntesis de sus características. Cuenca del Guadalquivir*.

Morales J.; Azañón, J.M., Stich, D., Roldán, F.J., Pérez-Peña, J.V.; Martina, R., Cantavella, J.V., Martín, J.B., Mancilla, F., González-Ramón, A. (2014). The 2012–2013 earthquake swarm in the eastern Guadalquivir basin (South Spain): A case of heterogeneous faulting due to oroclinal bending. *Gondwana Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2014.10.017>.

Muñoz-de la Varga, D.; Rodríguez-Arévalo, J.; Manzano-Arellano, M.; Bardasano, L.; Prado-Perez, A y Ortega, L. (2013). Cartografía isotópica de  $^{18}\text{O}$  en la precipitación como herramienta para la identificación de áreas de recarga en el sistema acuífero de la loma de Úbeda (Jaén, Andalucía). *X Simposio del Hidrogeología*. T-XXX: 509-515. Granada.

Núñez, I.; Araguás-Araguás, L.; Rubio-Campos, J.C.; González-Ramón, A.; Pérez-Zabaleta, E.; Gollonet, J. (2005). Evolución hidrogeoquímica en el acuífero carbonatado Jurásico de la Loma de Úbeda, Jaén. J.A. López-Geta; J.C. Rubio y M. Martín Machuca (Eds). *VI Simposio del Agua en Andalucía*. Tomo I: 519-531. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 14. IGME. Sevilla

Núñez, I.; Araguás-Araguás, L.; Moreno, L.; Rubio-Campos, J.C.; González-Ramón, A.; Pérez Zabaleta, E. y Gollonet, J. (2006). Evolución hidrogeoquímica del acuífero carbonatado profundo de la Loma de Úbeda (Jaén). *Boletín Geológico y Minero*, 117 (Núm. Monográfico Especial): 613-616.

Núñez, I.; González-Ramón, A.; Araguás-Araguás, L.; de la Losa, A.; Pérez-Zabaleta, E.; Díaz-Tijeiro, F. y Heredia, J. (2008). Resultados de los estudios hidroquímicos del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda. En: López-Geta, J.A.; Rubio, J.C. y Martín-Machuca, M. (Eds.). *VII Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. 263-270.

Ortega, L.; Manzano, M.; Heredia, J.; Rodríguez-Arévalo, J.; González-Ramón, A. y Muñoz, D. (2012) Información preliminar del  $^{222}\text{Rn}$  como trazador de la red de flujo del sistema acuífero de la Loma de Úbeda (Jaén, España). *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. San Sebastián, España.

Palancar, M.; Sánchez-Biec, J. (2008). Análisis preliminar de la viabilidad de una propuesta de ordenación de los recursos hídricos de la Masa de Agua Subterránea 05.23 Loma de Úbeda. *VII Simposio del Agua en Andalucía*. IGME. 771-778

Pedraza, A.; Ruiz-Constán, A.; Marín-Lechado, C.; Galindo-Zaldivar, J.; González-Ramón, A.; Peláez, A. (2013). Seismic transpressive basement faults and monocline development in a foreland basin (Eastern Guadalquivir, SE Spain). *Tectonics* 32: 1-16



Rey, J., Redondo, L. e Hidalgo, M.C. (1998). Interés hidrogeológico de las dolomías liásicas de la Cobertera Tabular de la Meseta (norte de Úbeda, provincia de Jaén). *Rev. Soc. Geol. España*, 11 (3-4): 213-221.

Rodríguez, J.; Pérez, E.; Díaz, M.F. y Heredia, J. (2007). A contribution to the characterization of a deeply confined carbonate aquifer in Úbeda (southern Spain) from a reinterpretation of existing geological and geophysical data and new data on environmental isotopes. *XXXV IAH Congress-Groundwater and Ecosystems*. International Association of Hydrogeologists.

Rubio-Campos, J.C.; Gollonet, J.; González-Ramón, A. y Luque-Espinar, J.A. (2004). El acuífero carbonatado de La Loma de Úbeda y su utilización en el olivar de Jaén. *Jornadas Agua y Globalización en el Mediterráneo. XI Congreso Mundial del Agua*. Granada-Madrid.