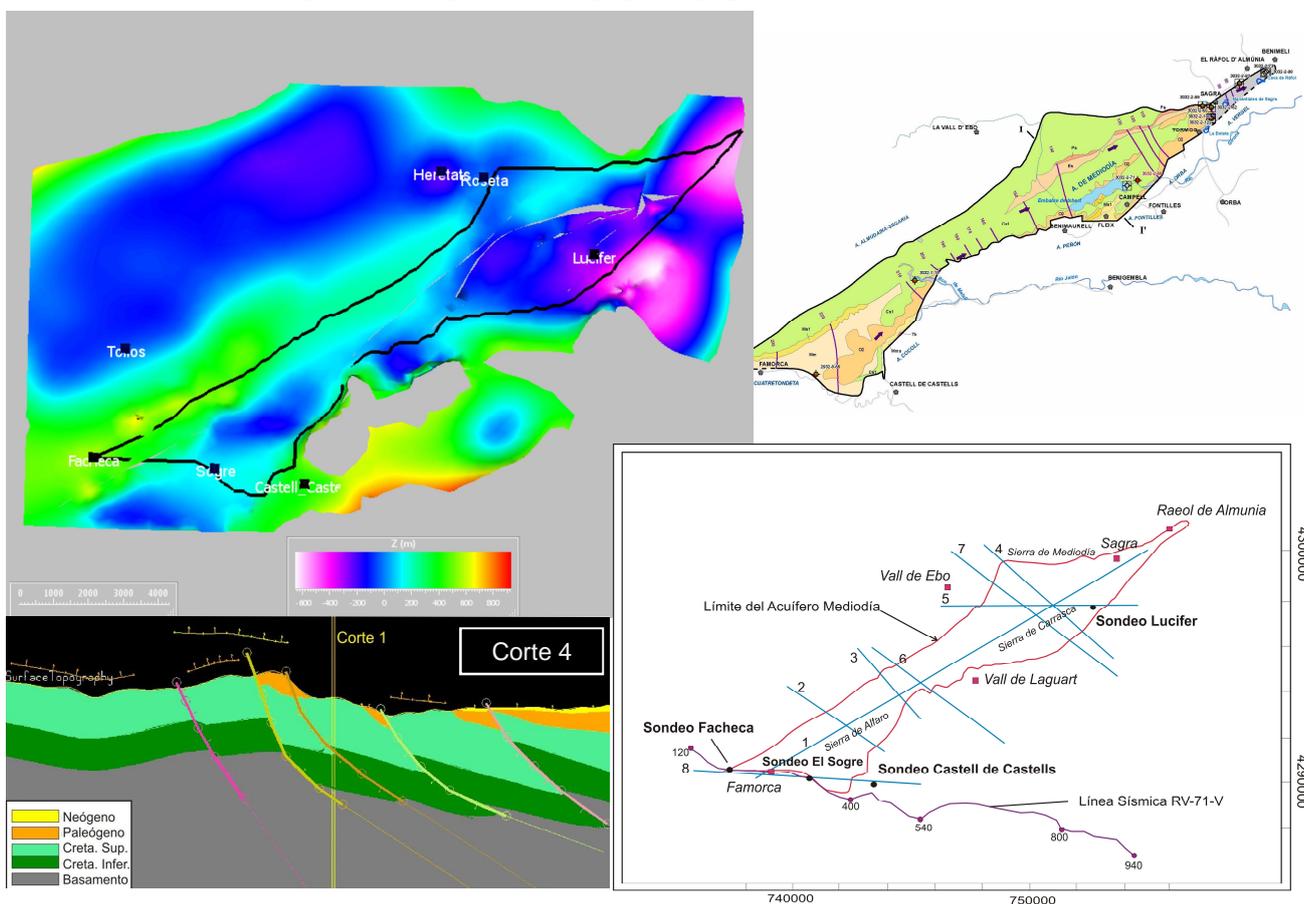


DESARROLLOS METODOLÓGICOS EN GEOLOGÍA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS PROFUNDOS DE LA PROVINCIA DE ALICANTE (HIDROPROAL)

MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE MEDIODÍA Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA



Julio de 2013

Carmen Rey Moral
 José Luis García Lobón
 Carlos Marín Lechado
 María Isabel Reguera García
 Ángela Jiménez Sanz

ÍNDICE

RESUMEN	7
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Justificación del estudio y antecedentes	9
1.2 Localización.....	10
1.3 Objetivos.....	10
2 METODOLOGÍA DE LA MODELIZACION EN 3D. SOFTWARE UTILIZADO	15
3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA	19
3.1 Estratigrafía.....	19
3.2 Estructura geológica	20
3.3 Cortes geológicos	23
3.4 Hidrogeología.....	25
4 GEOLOGÍA DE SUBSUELO Y DATOS GEOFÍSICOS.....	29
5 CONSTRUCCIÓN Y CALIDAD DEL MODELO 3D	33
6 PETROFÍSICA. ACTUALIZACIÓN DE RESERVAS HIDROGEOLÓGICAS	39
6.1. Sistema poroso.....	39
6.2. Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas	39
6.3. Curvas de explotación	42
7 CONCLUSIONES. IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS DEL MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE MEDIODÍA.....	45
7.1 Consideraciones sobre el modelo geológico 3D	45
7.2 Límites del acuífero	46
7.3. Cálculo de reservas.....	48
7.4. Calidad del modelo y alternativas	49
7.5. Implicaciones hidrogeológicas del modelo geológico 3D.....	49
8 REFERENCIAS	51
ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL.....	55
1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL	55
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE.....	56
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO MEDIODIA.....	59
4. LISTADO DE FICHEROS	61

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Composición de las dos hojas MAGNA (821, Alcoy y 822, Benisa) en las que se delimita el acuífero Mediodía (línea roja). Aparece superpuesta la situación de los sondeos eléctricos verticales, y los puntos de navegación de la sección sísmica RV-71-V. Además se acompañan dos cortes geológicos de las hojas donde se ve la estructura del acuífero en profundidad. 17

Figura 2. Esquema de la metodología utilizada para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de Mediodía. En cada uno de los pasos se detalla el software utilizado. Explicación en texto. 17

Figura 3. Columna estratigráfica sintética del acuífero Mediodía donde se indican los niveles de acuíferos (principal y secundario) y acuitardos. También se marcan los límites que se han utilizado como superficies de referencia en la construcción del modelo 3D (muros de Cretácico Inferior, Cretácico Superior, Paleógeno y Neógeno). 20

Figura 4. Contexto hidrogeológico del acuífero Mediodía. Se observa como hacia el noroeste el acuífero se integra en la unidad tectónica de Almudaina-Segaria (fuente, DPA, 2010). 21

Figura 5. Esquema de situación de los cortes geológicos utilizados en la modelización 3D, junto con el límite del acuífero Mediodía, la situación de la línea sísmica, sondeos y algunas referencias geográficas. 23

Figura 6. A modo de ejemplo se presentan tres de los ocho cortes geológicos (ver situación en figura 5) utilizados como secciones para la construcción del modelo en 3D. El proceso de modelización contribuyó a la mejora de los mismos a la hora de interpretar toda la estructura en profundidad, por lo que algunos cortes fueron modificados a posteriori. El corte 8 coincide con la línea sísmica RV-71-V (figura 11). 24

Figura 7. Hidrogeología del acuífero de Mediodía. Se representan los datos hidrogeológicos principales: puntos de agua, flujo subterráneo, niveles piezométricos, etc., además de las unidades geológicas principales. Tomada de Atlas de Hidrogeología de Alicante (DPA-IGME, 2013, in prep.). 25

Figura 8. Evolución piezométrica del acuífero de Mediodía. 26

Figura 9. Esquema de los cuatro sondeos del acuífero de Mediodía y su localización geográfica. 30

Figura 10. Curva de conversión tiempo-profundidad deducida a partir de los datos de velocidad RMS de la línea sísmica RV-71-V6. 31

Figura 11. Línea sísmica interpretada a partir de los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells donde se han marcado los reflectores correspondientes al muro del Mioceno, Cretácico Superior y Cretácico Inferior. En aquellos sondeos donde no se especifica el muro de una formación se ha dejado como supuesto muro. Se incluye el corte inferior (corte 8) de la figura 6. 32

Figura 12. Modelo geológico 3D de Mediodía proyectado sobre las secciones utilizadas para su cálculo. La serie estratigráfica es la misma que se muestra en las figuras 6 y 11: Basamento, Cretácico Inferior, Cretácico Superior, Paleógeno y Neógeno. En rosa el Keuper diapírico intrusivo. 33

Figura 13. Modelo geológico 3D de las superficies Cretácico Inferior, Cretácico Superior, fallas (F) y Keuper intrusivo (diapiro Parcent). Se trata de un monoclinial sencillo, salvo en su extremo NE. 34

Figura 14. Muro del Cretácico Superior del acuífero de Mediodía (base impermeable del acuífero) con valores de z (cota nivel del mar) sobre la que se ha superpuesto el límite del acuífero proyectado sobre la superficie y los sondeos. Explicación en texto. 35

Figura 15. Mapa de isobatas del muro del Cretácico Superior de Mediodía (base impermeable del acuífero). Las máximas profundidades se sitúan en el noreste del acuífero. Referencia: nivel de mar. 35

Figura 16. Sondeos próximos al acuífero de Mediodía, situados al Noroeste del límite del acuífero. En todos ellos se ha marcado los límites de las principales superficies de referencia. 37

Figura 17. Muro del Cretácico Superior del acuífero de Mediodía (base impermeable del acuífero) forzando el paso de dicho muro por los sondeos (modelo de gOcad). 38

Figura 18. Curvas de reservas del Acuífero Mediodía obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero. 41

Figura 19. Mapa de isobatas del muro del Cretácico Superior según el informe IGME, 1989, del Acuífero Mediodía, con corte ilustrativo del mismo. El Cretácico Superior profundiza hacia el sureste más que en los modelos de este trabajo, alcanzando los -900 m.s.n.m. 42

Figura 20. Curvas de explotación del acuífero Mediodía desde el sondeo Lucifer. 43

Figura 21. Corte modelado número 8 del acuífero Mediodía. Con línea discontinua se marca la superficie piezométrica media en esta zona. 46

Figura 22. Corte del acuífero Mediodía en su sector central, a) Arriba: según el Atlas hidrogeológico de Alicante (DPA, 2013), b) Según el modelo 3D obtenido en este trabajo. 47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Resumen de datos utilizados durante el proceso de modelización 3D del acuífero de Mediodía. 17

Tabla II. Límites en profundidad y en tiempo del muro y techo de las distintas formaciones en los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells. 31

Tabla III. Datos incorporados al modelo 3D del acuífero Mediodía. 36

Tabla IV. Diferencias en metros entre cotas de sondeo y valor de isobata para el Muro del Cretácico Superior del modelo 3D del acuífero Mediodía (posición de sondeos en figura 14). Signo negativo cuando la superficie calculada queda por debajo del marcador del sondeo, positivo al contrario. 36

Tabla V. Resumen de reservas del acuífero Mediodía. Reservas dadas por los modelos 3D del acuífero (Geomodeller y gOcad) para porosidades del 0.5% y 3%, respectivamente. 40

Tabla VI. Ajustes polinómicos de las curvas de reservas del acuífero Mediodía (figura 18) con los diferentes modelos geométricos y porosidades usados en este estudio. 42

Tabla VII. Reservas explotables del acuífero Mediodía desde el sondeo Lucifer. 43

Tabla VIII. Reservas totales y explotables del acuífero Mediodía. 48

RESUMEN

El acuífero de Mediodía, situado en el sector noreste de la provincia de Alicante, tiene una extensión de unos 43 km², constituyendo los afloramientos permeables casi el 100% de su superficie. Este acuífero constituye una de las principales fuentes de suministro de agua potable y de riego de la comarca de Tormos, Sagra, Ráfol de Almunia, Vall de Laguart y Calpe. El acuífero lo forman calizas y calizas dolomíticas de edades comprendidas entre el Cenomaniense y el Santoniense, con un espesor medio del orden de 500 m. Sus recursos medios renovables han sido estimados en unos 14.35 hm³/año (Mapa hidrogeológico de la provincia de Alicante, DPA, 2010).

En este informe se presentan los desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo y resultados e implicaciones hidrogeológicas del modelo geológico 3D del acuífero de Mediodía. Este modelo, realizado con los códigos Geomodeller y gOcad, se ha construido con los objetivos de evaluar el volumen total de reservas de agua almacenada y de establecer las relaciones geométricas entre las diferentes unidades acuíferas implicadas. Se han diferenciado en el modelo geológico 3D cinco unidades geológicas y seis fallas principales.

La consideración de datos geofísicos de exploración petrolera, entre los que cabe destacar el perfil de sísmica de reflexión RV-71-V (campaña RV, 1984-85), la recopilación de 7 columnas litológicas de sondeos de investigación hidrogeológica, y la información estructural generada con motivo de este estudio han contribuido a conseguir un nuevo avance en el conocimiento geológico e hidrogeológico de este acuífero.

Los materiales del acuífero de Mediodía, principalmente cretácicos, aparecen afectados por una tectónica compresiva, con cabalgamientos NE-SO en la zona Este del acuífero y un recubrimiento cuaternario en el extremo Norte. Puede distinguirse, además, un sistema de fallas transversales a la dirección anterior, que tienen generalmente escasa incidencia, y un sistema de fallas inversas longitudinales que está especialmente desarrollado en la Sierra de Mediodía.

Es un acuífero libre prácticamente en el 100% de su extensión. En la actualidad, presenta un volumen de roca saturada estimado en este estudio entre 6.5 y 9.1 km³. Tomando como referencia la media de la porosidad abierta de las formaciones acuíferas equivalentes del Cretácico Superior muestreadas en el vecino acuífero de Carrascal-Ferrer, se obtiene un valor de 0.5%. Si se considera los valores más altos de porosidad dados por estudios anteriores del acuífero (DPA-IGME, 1989) que sitúan la porosidad media en un 3%, las reservas totales de agua en el acuífero quedarían comprendidas entre 33 y 273 hm³, respectivamente, para las porosidades mencionadas. Del mismo modo, las reservas dinámicas, las que quedarían por encima de la cota de drenaje del manantial de menor nivel piezométrico en época de aguas altas, quedarían comprendidas entre 11 y 66 hm³.

Los nuevos datos geológicos integrados en el modelo geológico del acuífero de Mediodía, además de proporcionar unos valores aproximados de reservas totales de agua, permiten a los gestores y planificadores del agua disponer de un mejor conocimiento de la estructura del acuífero. El modelo 3D generado indica que es posible la conexión lateral con los acuíferos de Almudaina-Segaria, que se integran en la misma Unidad tectónica que Mediodía. Por otro lado, las capas de información georeferenciadas de techo y muro de las distintas unidades acuíferas serán fundamentales para poder construir futuros modelos matemáticos de flujo y transporte, con los que evaluar las reservas potencialmente explotables, además de para conocer

los sectores más favorables para la captación de reservas de agua en situaciones de emergencia.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del estudio y antecedentes

Desde la elaboración del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), durante la década de los años setenta y ochenta del anterior siglo, el Instituto Geológico y Minero (IGME) realiza, en Convenio con la Diputación Provincial de Alicante (DPA), estudios encaminados a mejorar el conocimiento hidrogeológico del agua subterránea en dicha provincia. El aumento de la demanda y la repercusión que el cambio climático está teniendo en la disponibilidad de recursos hídricos en zonas semiáridas ha obligado a dar un giro en la política de gestión del agua. La planificación del agua subterránea en estas regiones tiene que hacer un mayor énfasis en la evaluación de las reservas, sin dejar de mejorar la evaluación de la recarga a los acuíferos. No es posible gestionar bien un recurso si no se sabe de cuanto se dispone. La DPA entendió, años atrás, esta situación por lo que inició una línea de investigación encaminada a mejorar el conocimiento de la reservas de agua subterránea en la provincia de Alicante, realizando numerosos trabajos en diferentes acuíferos de la provincia. Todo este esfuerzo ha contribuido, sin duda, a que Alicante sea una de las provincias españolas en las que más se ha avanzado en este sentido.

Con todo, la DPA ha querido dar un paso más en la mejora del conocimiento hidrogeológico del subsuelo alicantino y en el marco del Convenio %Acuerdo específico de cooperación 2010-2013, en materia de aguas subterráneas, entre el IGME y la DPA+ha financiado la actividad %Desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo para la caracterización de recursos hidrogeológicos profundos de Alicante+, dedicada a la evaluación de reservas hídricas ante la previsión de fenómenos extremos, cuyos resultados parciales se presentan en esta Memoria.

En este trabajo se describe y aplica un procedimiento metodológico para la modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas totales de agua subterránea en acuíferos profundos. Para alcanzar estos objetivos se han aprovechado los recientes y notables avances en la modelación matemática de reservorios geológicos profundos, integrando la información geológica, sondeos y geofísica existente (sísmica, especialmente). Durante los 30 últimos años los métodos y la tecnología en la investigación de formaciones geológicas profundas, y en especial la de naturaleza carbonática, han avanzado drásticamente gracias a la industria petrolera (Ahr 2008, Lucia 1999). En este sentido, la reciente incorporación de los modelos geológicos 3D en la investigación hidrogeológica ha contribuido a conseguir un notable avance en el conocimiento de los acuíferos estudiados, encaminado a la mejora en la evaluación y la gestión de los recursos hídricos subterráneos (Gill et al. 2011, Robins et al. 2004, Ross et al. 2005, Wu et al. 2008). En relación con lo anterior, debe destacarse la mejora del conocimiento del subsuelo profundo de la provincia de Alicante adquiridas por el IGME gracias a los proyectos de investigación realizados con motivo de la búsqueda de estructuras geológicas para almacenamiento geológico de CO₂ (García Lobón, et al. 2011).

Para aplicar la metodología propuesta, en coordinación con el Departamento del Ciclo Hídrico de la DPA, se han elegido diferentes acuíferos. Su selección ha intentado cubrir cierto espectro de posibilidades referentes a la disponibilidad de información para la elaboración de modelos geológicos 3D. En esta Memoria se presenta una metodología para la evaluación de reservas y los resultados de su aplicación en el acuífero de Mediodía. Desde el punto de vista metodológico, el acuífero investigado en

este caso representa a diferentes acuíferos alicantinos en los que existe poca información geofísica, pero que cuenta con información geológica de calidad, con buena exposición desde superficie.

1.2 Localización

El acuífero Mediodía se encuentra situado en el sector nororiental de la Cordillera Bética (figura 1) y en concreto en la zona conocida genéricamente como Prebético Oriental o Prebético Alicantino. Con una extensión de unos 43 km² se enclava en la comarca alicantina de la Marina Alta, siendo la superficie de afloramiento permeable prácticamente el 100%. Se trata de una sierra de dirección NE-SO cuya cota topográfica varía entre 800-900 m en las zonas noreste y suroeste, y 500 m en la zona central del acuífero. Las poblaciones principales son La Vall de Laguar al noreste y Facheca en el extremo suroeste del acuífero. El río Girona al norte (asociado al embalse de Isbert) y el río Jalón y Barranco de Malafí al sur representan los principales cursos de escorrentía superficial.

Se ha incluido el Acuífero de Mediodía en el Proyecto de modelación en 3D porque:

1) Existe buena exposición de la geología superficial, con datos estructurales de calidad, lo que permite el ensayo de modelaciones geológicas con técnicas y software modernos disponibles en el IGME. En estos casos, es necesario reinterpretar los contactos geológicos que se van a modelar sobre el Modelo Digital del Terreno (MDT) tapizado con la ortoimagen correspondiente.

2) La información hidrogeológica previa es abundante. Se realizó un completo estudio hidrogeológico de la Subunidad Mediodía en 1989 (DPA-IGME, 1989). Otro hito hidrogeológico importante fue el estudio de determinación de las reservas útiles del acuífero de Mediodía (DPA-IGME, 2009).

3) Se trata de un acuífero profundo con un buen nivel de recursos medios renovables y de reservas.

En cambio, los datos de subsuelo son escasos (ver capítulo 4, más abajo). Se dispone de una línea sísmica (RV-71-V) de calidad media-baja. No existen datos de gravimetría ni electromagnéticos. Algunos Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) cartografían el cuaternario del extremo NE del acuífero, pero son prácticamente irrelevantes para la modelación 3D del mismo.

1.3 Objetivos

Como se ha indicado más arriba, uno de los objetivos del convenio vigente entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y La Diputación Provincial de Alicante es el «Desarrollo metodológico para la evaluación de reservas hídricas ante la previsión de fenómenos extremos». En este marco, dos son los objetivos fundamentales de este trabajo. El primero consiste en desarrollar metodologías para la modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas hídricas de acuíferos profundos, y el segundo, en aplicar esta metodología al acuífero de Mediodía.

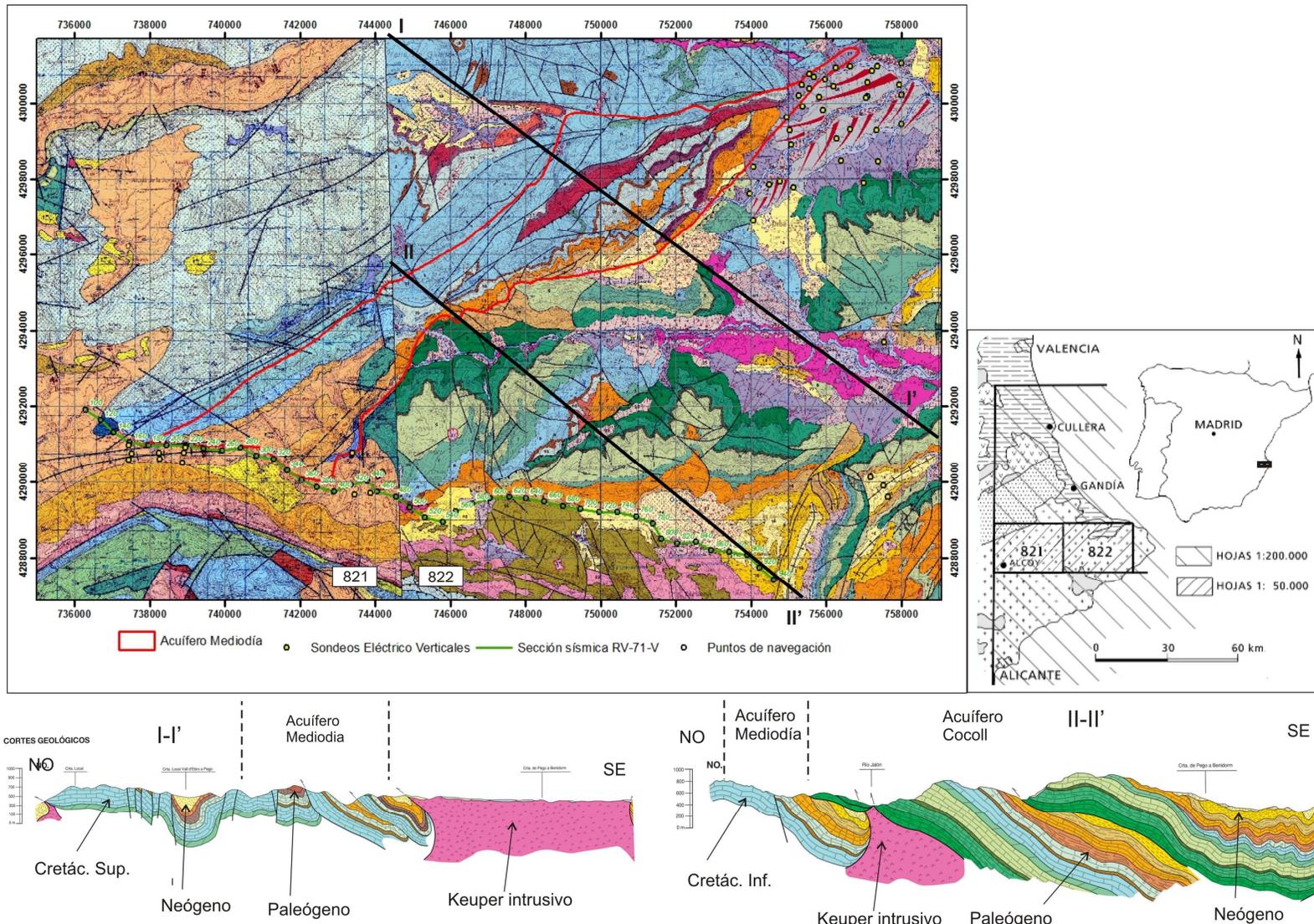


Figura 1. Composición de las dos hojas MAGNA (821, Alcoy y 822, Benisa) en las que se delimita el acuífero Mediódia (línea roja). Aparece superpuesta la situación de los sondeos eléctricos verticales, y los puntos de navegación de la sección sísmica RV-71-V. Además se acompañan dos cortes geológicos de las hojas donde se ve la estructura del acuífero en profundidad.

Los objetivos mencionados implican el uso de metodologías de caracterización geológica y petrofísica de las áreas con información geofísica (sísmica de reflexión, principalmente) y sondeos profundos. Precisamente la integración e interpretación de información geofísica previa (sísmica de reflexión), de nuevos datos estructurales y petrofísicos, de datos procedentes de sondeos mecánicos de investigación hidrogeológica y el posterior análisis 3D de toda esta información han permitido conseguir resultados relacionados. Entre éstos cabe citar: **i)** la consecución de capas georeferenciadas de techo y muro de formaciones geológicas exportables a modelos de flujo y transporte de aguas subterráneas, **ii)** la posible utilización del modelo 3D como una herramienta de soporte de decisiones para emplazar nuevas captaciones de agua subterránea, y **iii)** la mejora del conocimiento de los límites laterales del acuífero.

2 METODOLOGÍA DE LA MODELIZACION EN 3D. SOFTWARE UTILIZADO

Para alcanzar los objetivos de desarrollo metodológico y evaluación de reservas mencionados en el apartado anterior, se plantean las siguientes actividades:

1. Recopilación y análisis de la información geológica, sondeos y geofísica existente.
2. Selección de Superficies de Referencia de objetivo hidrogeológico profundo (pe., próximas a los límites del Cretácico Superior, e incluso Inferior).
3. Desarrollo metodológico para la Cartografía de subsuelo de Superficies de Referencia y generación de modelos geológicos 3D, integrando toda la información de geología de superficie y subsuelo disponible.

Analizada la información de partida, el paso más importante en la construcción de un modelo geológico 3D es la selección y 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 (datos estructurales y columna estratigráfica sintética) y de subsuelo (7 sondeos y la línea sísmica RV-71-V) disponibles en la región, ha permitido seleccionar y reconstruir 5 superficies en un modelo geológico 3D del acuífero de Mediodía:

- Muro Neógeno
- Muro Paleógeno
- Muro Cretácico Superior
- Muro Cretácico Inferior
- Techo Triásico (diapírico intrusivo)

Dentro del límite del acuífero existen 6 fallas inversas principales que con dirección NE-SO tienen reflejo en superficie principalmente en el sector noreste del acuífero generando los mayores relieves. Además se han tenido en cuenta 8 fallas de menor importancia situadas fuera del límite definido como límite del acuífero.

La metodología seguida durante el proceso de modelización se puede resumir en la figura 2:

- Los datos de partida (A) incluyen el Modelo Digital del Terreno (MDT, en este caso 10*10 m), ortofotografía y cartografía geológica (shape de polígonos y contactos). Además se pueden incorporar los datos de geofísica disponibles (sondeos, sísmica, etc.). La conversión tiempo-profundidad (figura 2B) de las líneas sísmicas aporta información muy valiosa a la hora de determinar las profundidades de las superficies a modelar.
- El trabajo de revisión cartográfica 3D se inicia con la corrección de los contactos y buzamientos a partir de la cartografía geológica existente en

formato shape (figura 2A). Estos datos previos se ven densificados y mejorados con la incorporación de contactos (figura 2C) obtenidos de imágenes 3D (superposición del MDT y ortofotografías). A la vez, se densifica la información de datos estructurales de superficie utilizando técnicas de cartografía en 3D como la medida de dirección y buzamiento de capas utilizando la regla de las uves.

- La obtención de planos de estratificación (con su correspondiente dirección y buzamiento, figura 2D) permite elaborar cortes geológicos (figura 2E) con toda la información estructural, donde además se tienen en cuenta los buzamientos aparentes de las estructuras atravesadas.
- El uso del software de modelización geológica Geomodeller 3D (figura 2F) implica la preparación de cortes consistentes como input básico al modelo, junto con sondeos y sísmica interpretada en términos de las superficies de referencia principales. Los cortes incorporan toda la información estructural obtenida en (C) y (D) anterior.
- Por último, calculado el modelo matemático 3D en Geomodeller, se transfiere a gOcad donde se afinan las superficies de referencia y se calcula el volumen total de roca y de volumen saturado del acuífero (figura 2G), teniendo en cuenta la porosidad y superficie piezométrica.

Como se ve en el esquema de la figura 2 el proceso permite incorporar nuevos datos (tanto de geología superficial como de subsuelo) constantemente, así como calcular el modelo cuantas veces se quiera en función de los datos introducidos, hasta obtener la solución final que cumpla nuestras expectativas.

El software utilizado es el siguiente (ver figura 2):

- Global Mapper. Digitalización de contactos y estratificación. Densificación de datos. gOcad: Obtención de planos de estratificación (strike&dip).
- Arc-Gis. Elaboración de cortes geológicos con la herramienta cross-section que permite trabajar con buzamientos aparentes.
- SMT. Kingdom. Interpretación sísmica y conversión tiempo-profundidad.
- 3D Geomodeller. Elaboración del modelo geológico.
- gOcad. Mejora de superficies de referencia. Cálculo del volumen de roca del acuífero. Modelación de reservas y curva de explotación.

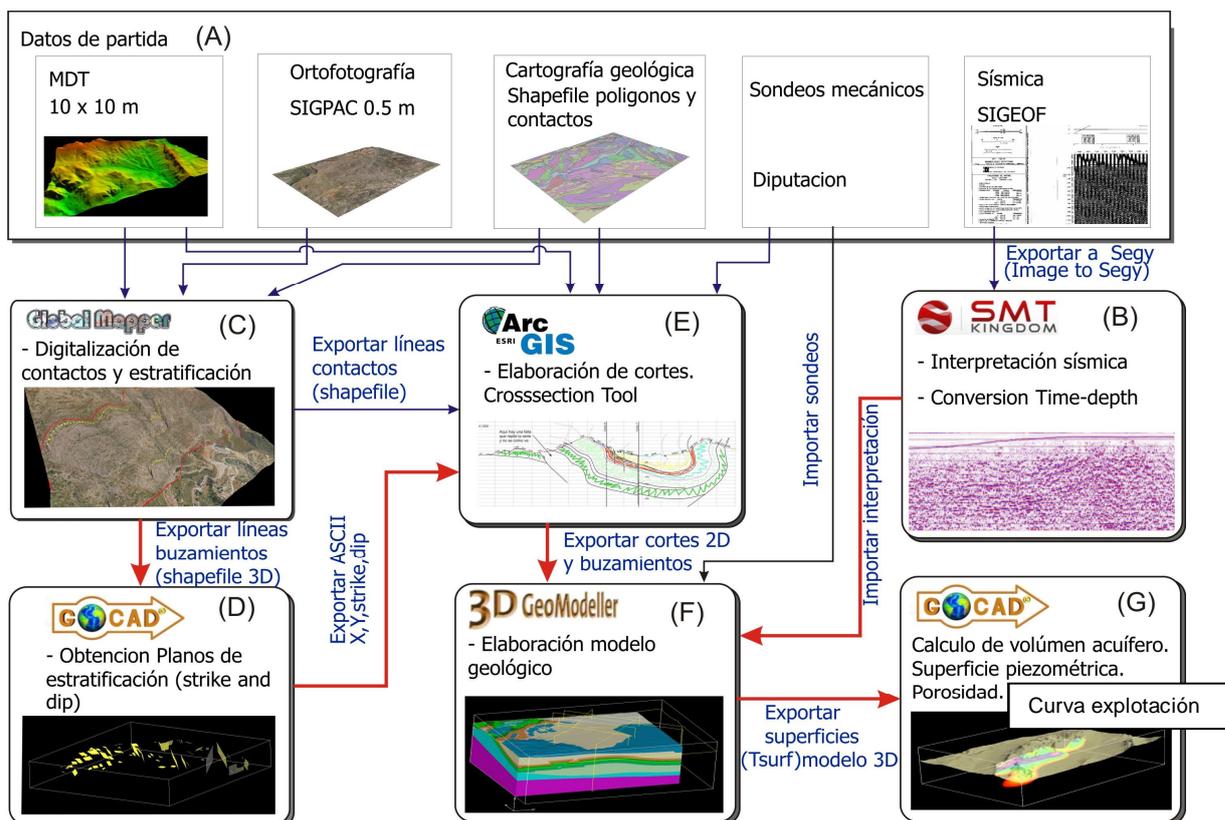


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada para la construcción del modelo geológico 3D del acuífero de Mediodía. En cada uno de los pasos se detalla el software utilizado. Explicación en texto.

Un resumen de los datos utilizados durante el proceso de modelización 3D se puede ver en la tabla I.

Tipo	Datos	Descripción	Fuente
Superficie	Cartografía geológica	Hojas 821 (Alcoy) y 822 (Benisa)	Cartografía Magna y fotointerpretación
	Datos estructurales	116 medidas de dirección y buzamiento estratificación	Fotointerpretación y datos estructurales del MAGNA
	Ortofotografía/MDT	286 km ² de ortofotografías con 0.5 m de resolución. MDT de 10 m de resolución	Instituto Geográfico Nacional
Subsuelo	Cortes geológicos	8 cortes	6 elaborados para este proyecto. 2 procedentes del MAGNA
	Sondeos	7 sondeos hidrogeológicos para modelo 3D	Diputación Alicante
	Líneas sísmicas	RV-71-V. 19.7 km de línea a interpretar	Campaña RV (1984-85)

Tabla I. Resumen de datos utilizados durante el proceso de modelización 3D del acuífero de Mediodía.

3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

3.1 Estratigrafía

Según hojas MAGNA 821 y 822, la serie estratigráfica se puede resumir en:

Triásico (Keuper). Margas, yesos, margas yesíferas y arcillas abigarradas. Forman la base del cabalgamiento frontal de la unidad Almudaina-Segaria y el impermeable de base en las zonas más septentrionales.

Cretácico Inferior. Serie margosa (margas grises y ocreas, margas arenosas, calizas de ostreidos y orbitolinas), ausente en las zonas más septentrionales por cortar el cabalgamiento términos progresivamente más modernos, configura el impermeable de base hacia el sur.

Cretácico Superior (Cenomaniense-Turonense). Constituido por una formación de naturaleza dolomítica (calizas, calizas dolomíticas y margas esporádicas). Forman parte del acuífero principal con sus 150 m de potencia. Son muy transmisivas y probablemente homogéneas e isotrópicas, con gran capacidad de almacenamiento.

Cretácico Superior (Senonense Inferior). Formado principalmente por calizas (Caliza de Graderío. Calizas micríticas tableadas y calizas y margas con $\% \text{Aceramus}$), con 350 m de potencia configuran, junto con las dolomías del Cenomaniense-Turonense, el cuerpo principal del acuífero. Presentan un marcado carácter kárstico lo que ocasiona una circulación muy localizada en redes de drenaje preferencial, esto determina su heterogeneidad y anisotropía.

Cretácico Superior (Campanense). Margas y margocalizas.

Cretácico Superior (Maastrichtense Superior). Materiales calizos de 80 m de potencia (calizas micríticas con $\% \text{Aceramus}$ en la base y nódulos de silex). Apenas están saturadas dentro del acuífero y se desconoce su comportamiento hidrogeológico.

Paleoceno. Margas y margocalizas.

Eoceno. Se trata de 150 m de calizas (tiene importancia como acuífero en el sector Vall de Laguart-Tormos; calizas micríticas con $\% \text{Nummulites}$ y alveolinas). Parecen tener una mayor circulación subterránea con carácter intergranular en relación a las anteriores.

Oligoceno. Calcarenitas, conglomerados y margas.

Mioceno. Alrededor de 50 m de calizas bioclásticas. Alternancia de calizas y margas (facies turbidíticas), conglomerados esporádicos, margocalizas y margas gris-azuladas. Tienen pobres propiedades hidráulicas. A techo alternancia de margas azules y areniscas finas (Flysch). Actúa localmente como impermeable de techo.

La columna estratigráfica sintética del acuífero Mediodía se puede ver en la figura 3, donde se marcan los límites que se han usado como Superficies de referencia para la construcción del modelo geológico 3D:

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA SINTÉTICA ACUÍFERO MEDIODIA

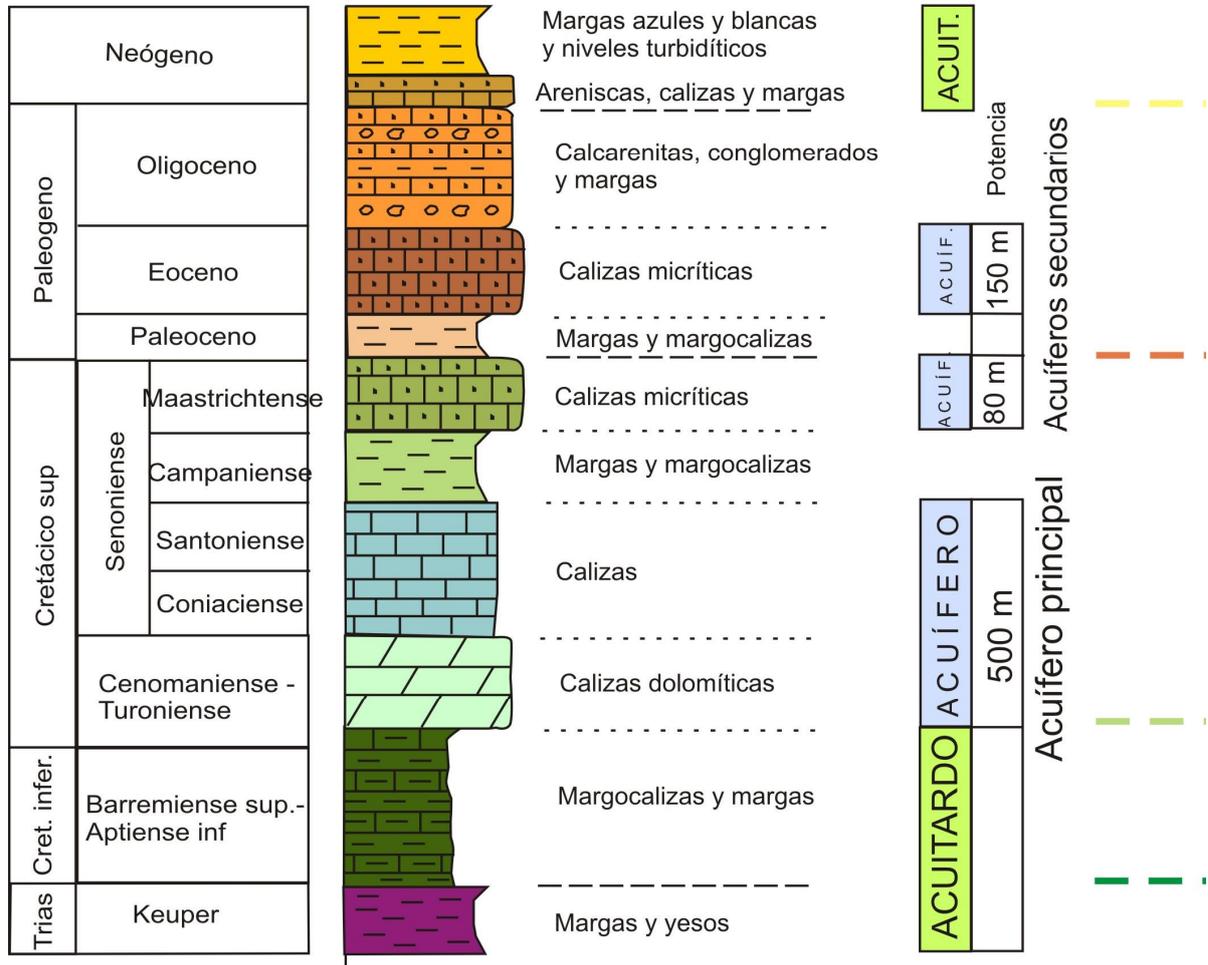


Figura 3. Columna estratigráfica sintética del acuífero Mediodía donde se indican los niveles de acuíferos (principal y secundario) y acuitardos. También se marcan los límites que se han utilizado como superficies de referencia en la construcción del modelo 3D (muros de Cretácico Inferior, Cretácico Superior, Paleógeno y Neógeno).

3.2 Estructura geológica

Geológicamente, la región corresponde al sector nororiental de la Cordillera Bética y en concreto a la zona conocida genéricamente como Prebético Oriental o Prebético Alicantino.

La edad de los afloramientos está comprendida entre el Triásico en Facies Muschelkalk y Keuper y el Mioceno Superior, además de los diferentes depósitos de edad cuaternaria, que recubren en gran medida las zonas y áreas deprimidas, así como las laderas de los grandes relieves. La zona está formada por una serie de relieves en su mayoría de edad mesozoica (Cretácico, principalmente), separados por depresiones más o menos estrechas y alargadas con dirección bética (NNE-SSO y E-

O), donde afloran materiales del Paleógeno y sobre todo del Neógeno. En cuanto a la estructura, la región se configura esencialmente como un apilamiento de pliegues y cabalgamientos con directriz bética y fuerte vergencia al NO. Un dato importante a tener en cuenta en la estructuración de los materiales es el papel jugado por las fallas transcurrentes de gran magnitud y de directriz bética, por las que extruye el Triásico en facies Keuper (probablemente en forma de diapiros) que a su vez, hace el papel de nivel de despegue de los cabalgamientos del área.

Los materiales de interés hidrogeológico que componen el área, principalmente cretácicos y terciarios pertenecientes a la subunidad Mediodía, aparecen afectados por una tectónica compresiva, con cabalgamientos en la zona este del acuífero y un recubrimiento cuaternario en el extremo norte. Los materiales pueden enmarcarse en una unidad tectónica perfectamente diferenciada cuyos límites coinciden, a grandes rasgos, con los de la unidad hidrogeológica Almudaina-Alfaro-Mediodía-Segaría. Con 40 km de longitud y casi 10 km de anchura máxima, esta unidad se extiende desde el Vall de Ceta hasta Vergel, con una dirección típicamente bética, NE-SO (figura 4).

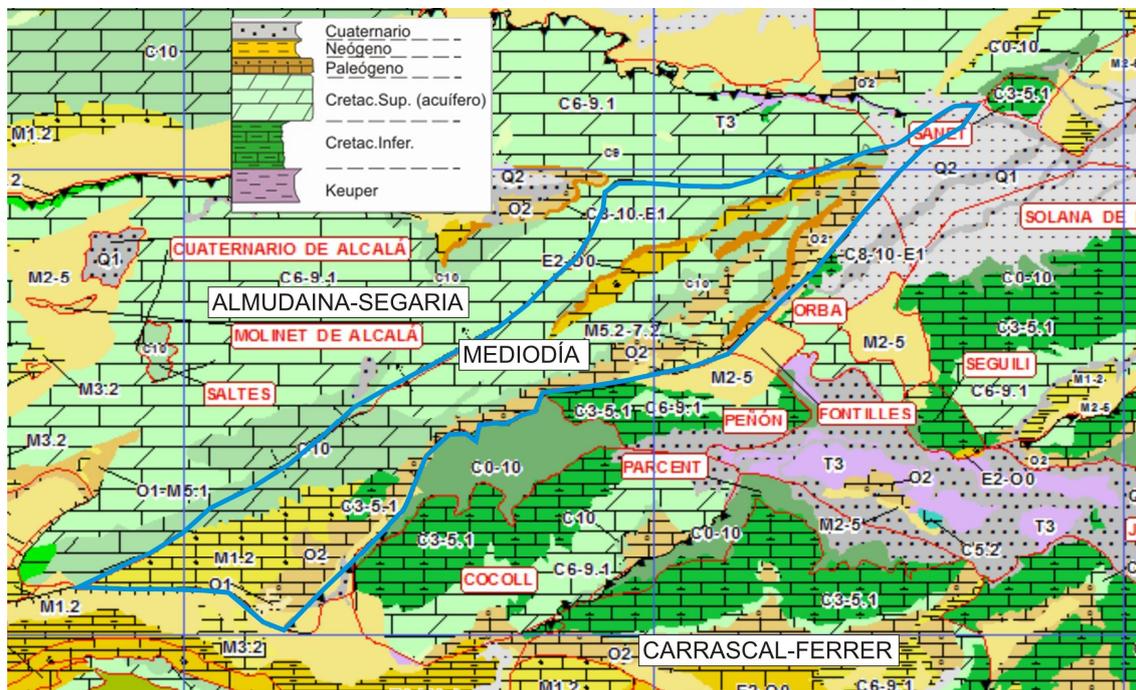


Figura 4. Contexto hidrogeológico del acuífero Mediodía. Se observa como hacia el noroeste el acuífero se integra en la unidad tectónica de Almudaina-Segaría (fuente, DPA, 2010).

Dentro de la unidad tectónica Almudaina-Alfaro-Mediodía-Segaría puede hacerse a su vez una nueva división que, a grandes rasgos, la diferencia en dos en su sentido longitudinal. El rasgo tectónico que señala la posición del límite entre los dos sectores (siendo la parte sur el acuífero Mediodía), se corresponde con el de una antiforma que produce un levantamiento de la serie en su núcleo, antiforma que hacia el NE va siendo sustituida progresivamente por el frente de una escama bajo la que se produce una inyección de los materiales triásicos.

Dentro del área puede distinguirse, además, un sistema de fallas transversales, que tienen generalmente escasa incidencia, y un sistema de fallas directas longitudinales que está especialmente desarrollado en la Sierra de Mediodía. Estos dos sistemas de fallas corresponden a las dos fases tectónicas mayores, compresiva y distensiva, características de las Cordilleras Béticas.

3.3 Cortes geológicos

Se han interpretado seis nuevos cortes geológicos para tratar de caracterizar en profundidad el acuífero Mediodía, además de utilizar dos cortes de la hoja geológica MAGNA 822, Benisa (cortes 4 y 6 en figura 5; IGME, 2008).

En la figura 5 se observa la localización de los cortes donde se ha utilizado toda la información de subsuelo disponible (cuatro sondeos y una línea sísmica). Estos cortes son el input básico al software de modelización 3D (3D Geomodeller), incorporando la información procedente de la revisión cartográfica y análisis estructural descritos en el apartado metodológico 2. Los espesores de las capas aflorantes se obtienen del trabajo de revisión cartográfica citado, de datos de sondeos y de la interpretación de la sísmica, mientras que el de las no aflorantes, en el área delimitada por el acuífero, como por ejemplo el Cretácico Inferior, se deducen de espesores de las series estratigráficas obtenidas en áreas cercanas. A modo de ejemplo se muestran tres cortes (iniciales y modelados por Geomodeller) en la figura 6. En los cortes, el basamento incluye Jurásico, no aflorante ni interpretable en la sísmica, y el Keuper (que se supone actúa como un diapiro uniforme rompiendo toda la estructura).

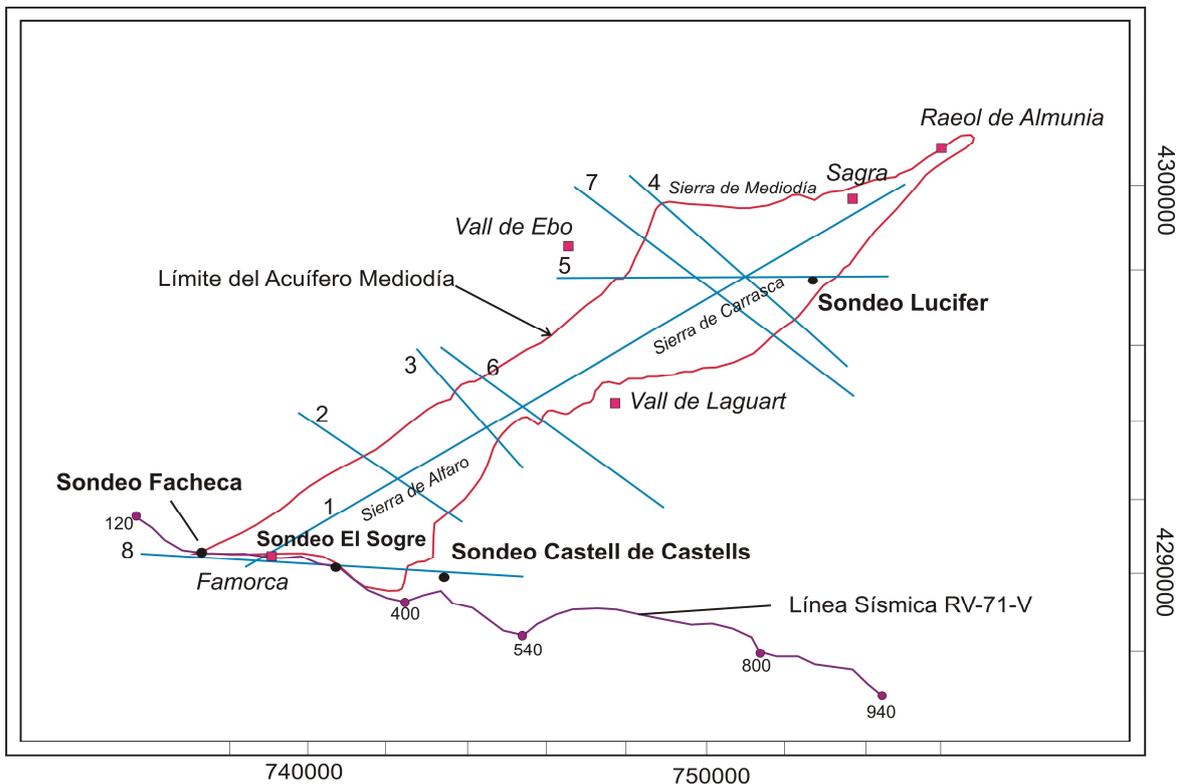


Figura 5. Esquema de situación de los cortes geológicos utilizados en la modelización 3D, junto con el límite del acuífero Mediodía, la situación de la línea sísmica, sondeos y algunas referencias geográficas.

A la vista de los cortes geológicos realizados, la estructura del acuífero de Mediodía se puede describir regionalmente como un monoclinal NE-SO con un antiformal en el sector occidental que produce un levantamiento de la serie en su núcleo. El antiformal hacia el noreste se va haciendo más laxo. En la parte oriental el frente de una escama, a favor de la cual se produce una inyección de Trías, marca el límite este del acuífero.

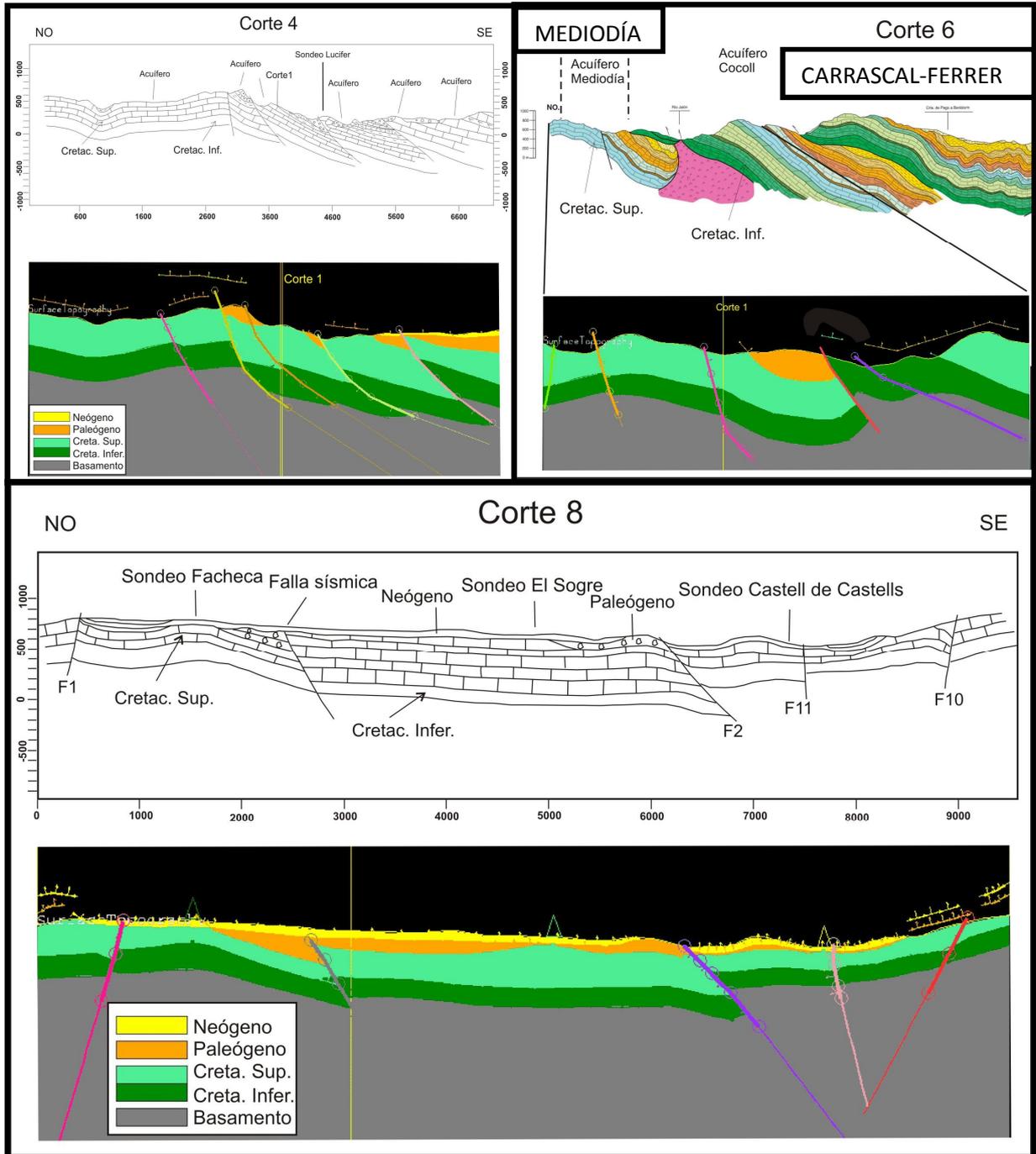


Figura 6. A modo de ejemplo se presentan tres de los ocho cortes geológicos (ver situación en figura 5) utilizados como secciones para la construcción del modelo en 3D. El proceso de modelización contribuyó a la mejora de los mismos a la hora de interpretar toda la estructura en profundidad, por lo que algunos cortes fueron modificados a posteriori. El corte 8 coincide con la línea sísmica RV-71-V (figura 11).

3.4 Hidrogeología

El acuífero de Mediodía y se localiza íntegramente dentro de la comarca de La Marina Alta, entre la sierra de Alfaro, que posee una dirección NE-SO, y las depresiones de los ríos Ebo o Girona y Jalón o Gorgos. Sus afloramientos presentan un relieve abrupto con altitudes entre los 200 y 1000 m. Existe una red hidrográfica bien desarrollada, donde los ríos Girona y Jalón o Gorgos son los principales cauces. El clima de la zona es de tipo mediterráneo húmedo, presentando un carácter mediterráneo cálido en su sector suroccidental, y subtropical cálido en la zona nororiental, más próxima a la costa mediterránea. La precipitación media oscila entre los 700 y los 1000 mm/año, con un gradiente ascendente hacia el NE. La temperatura media anual aumenta también desde el interior hacia el mar, desde los 14° hasta los 18 °C; mientras la evapotranspiración potencial (ETP) media varía entre los 750 y 850 mm/año.

El acuífero está formado por 150 m de dolomías del Cenomaniense . Turoniense, 350 m de calizas del Senoniense inferior y 150 m de calizas del Eoceno (sólo presentes en La Vall de Laguart-Tormos). Tiene forma alargada, con unos 21 km de longitud y una anchura media algo mayor de 2 km (máximo de 6 y mínimo de 0.4 km) y ocupa una extensión superficial de unos 43 km², que en su práctica mayoría corresponde a afloramientos de materiales permeables (figura 7).

La base impermeable del acuífero está determinada por las formaciones margosas del Albiense-Cenomaniense, mientras que el techo del mismo lo constituyen los materiales margosos miocenos en facies Tap en los sectores donde éstos están presentes.

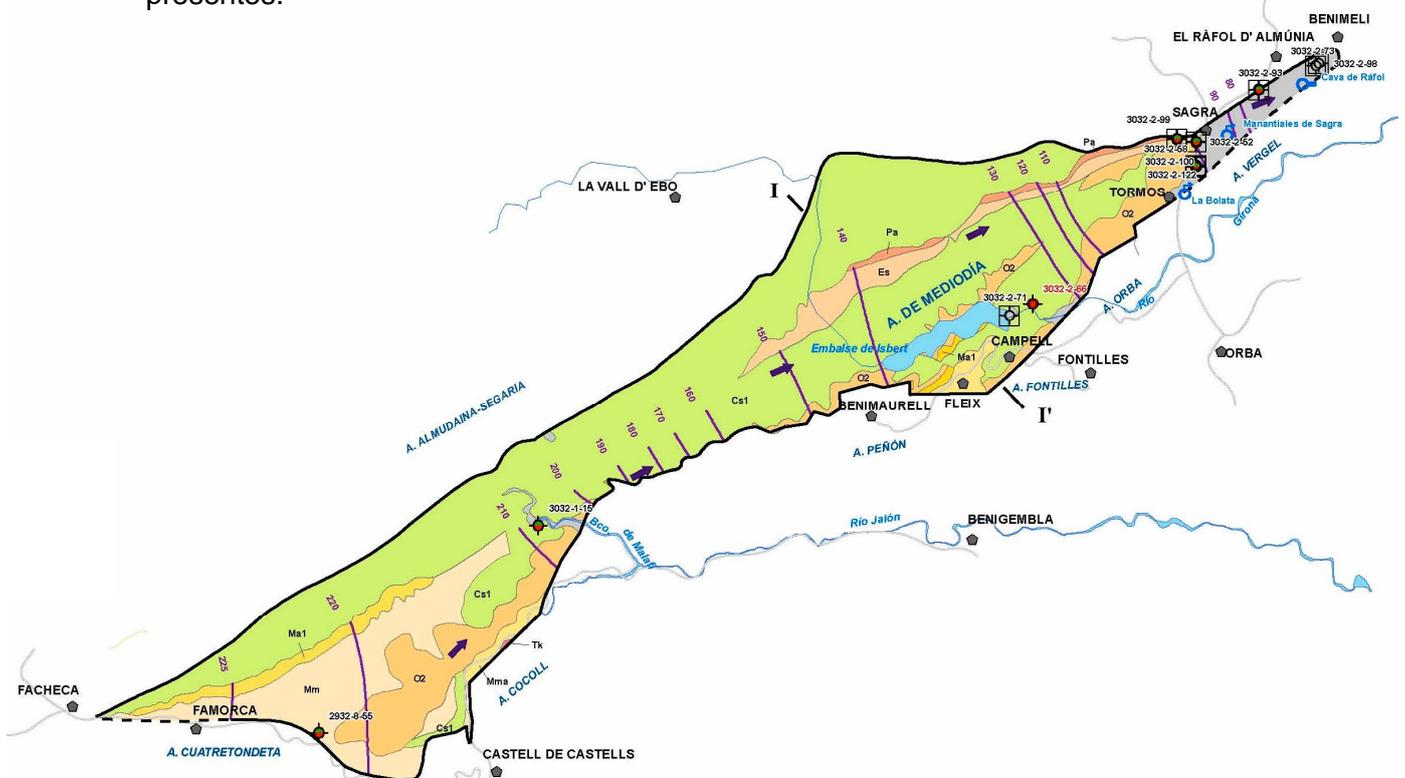


Figura 7. Hidrogeología del acuífero de Mediodía. Se representan los datos hidrogeológicos principales: puntos de agua, flujo subterráneo, niveles piezométricos, etc., además de las unidades geológicas principales. Tomada de Atlas de Hidrogeología de Alicante (DPA-IGME, 2013, in prep.).

La cota de la superficie piezométrica es conocida a partir de varios puntos de control, localizados casi todos ellos en la mitad oriental del acuífero, algunos con medidas desde el comienzo de los años setenta (se dispone de medidas periódicas de 15 sondeos). Del análisis de sus series temporales se deduce una cierta estabilidad en la superficie piezométrica, pero con la existencia de descensos acusados al final de épocas muy secas, como las acaecidas a mediados de los años ochenta y al final de los noventa con recuperación posterior al normalizarse los parámetros climáticos.

En líneas generales se puede decir, respecto a las variaciones piezométricas (figura 8), que se observa un comportamiento similar en la evolución temporal de todos los piezómetros, de forma que existen coincidencias de unos lugares a otros del acuífero en cuanto a los periodos de niveles altos y niveles bajos, acordes con los aportes de infiltración de agua de lluvia. No obstante, se aprecian diferencias considerables en la magnitud de las oscilaciones. Estas diferencias de amplitud se hacen bien patentes comparando las evoluciones de los sondeos situados en el sector de descarga del acuífero (hacia el Cuaternario y a través de los manantiales) con los situados aguas arriba, al oeste y sureste de Tormos.

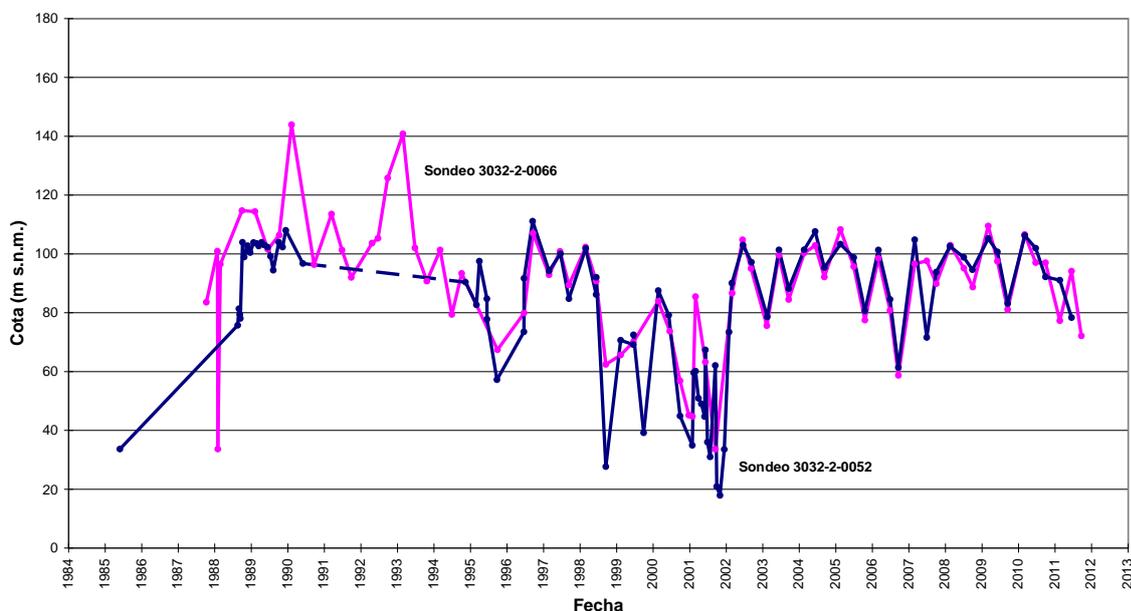


Figura 8. Evolución piezométrica del acuífero de Mediodía.

Las oscilaciones tienden a ser mayores con la lejanía al área de descarga, siendo normales variaciones del orden de 100 m. Las diferencias interanuales extremas observadas han sido importantes y alcanzan en algunos puntos del área de Tormos los 90 m (punto 3032-2-52).

Tal y como pone de manifiesto la morfología de la superficie piezométrica, la circulación del agua subterránea se realiza en sentido SO-NE, desde la zona de recarga de los sectores más occidentales de la sierra del Mediodía hacia la zona de descarga localizada en su extremo nororiental. Varía desde 225 m.s.n.m. en el borde occidental a 80 m.s.n.m. en el oriental.

La recarga del acuífero se produce por infiltración del agua lluvia y por la infiltración de la escorrentía superficial a lo largo del cauce del río Girona, a la que contribuye de forma importante la presa de Isbert, a través de cuyo vaso permeable se produce la recarga del acuífero.

La descarga tiene lugar por los bombeos realizados para distintos usos, por drenaje natural a través de los manantiales de Sagra (3032-2-6) y, especialmente, de la Cava de Ràfol (3032-2-10) a través del detrítico, y La Bolata (3032-2-22), ésta última con un claro comportamiento en *top plein*; así como también por otras salidas laterales subterráneas en su extremo oriental hacia el aluvial del río Girona (Acuífero de Vergel del Dominio Hidrogeológico nº 4).

De esta manera, según los aspectos comentados se presenta el siguiente balance hídrico medio; de acuerdo con el Mapa Hidrogeológico de la Provincia de Alicante (DPA, 2010):

Entradas (hm³/año)

- Infiltración de lluvia	12.20
- Recarga del río Ebo	2.15
Total	14.35

Salidas (hm³/año)

- Extracciones por bombeos	6.30
- Drenaje de los manantiales de Sagra	0.76
- Drenaje de los manantiales de Cava de Ràfol y La Bolata	5.76
- Transferencia lateral al aluvial del río Girona (Acuífero de Vergel)	1.53
Total	14.35

En este acuífero el agua subterránea utilizada es de 11 hm³/año, y se emplea para usos agrícolas y, en menor proporción, para abastecimiento urbano. Su toma se realiza tanto por medio de bombeo en pozos y sondeos como por el aprovechamiento de los manantiales de Sagra y de la Cava de Ràfol, también regulados en parte por sondeos. El balance manifiesta una situación de equilibrio en el acuífero.

4 GEOLOGÍA DE SUBSUELO Y DATOS GEOFÍSICOS

- SONDEOS

Hay cuatro sondeos básicos de referencia (figura 9):

Sondeo Facheca, ubicado en la esquina suroeste del acuífero (coincidiendo con el CDP 180 de la línea sísmica RV-71-V). Tiene una profundidad de 473 m, hasta el Aptiense (Cretácico Inferior). El primer tramo son 80 metros de edad miocena. El resto de materiales son de edad cretácica con el límite Cretácico Superior-Cretácico Inferior a 200 m, considerándose este nivel como el muro del acuífero (ver columna estratigráfica sintética, figura 3). Desde esta cota hasta el final del sondeo se considera acuitardo. Por tanto, no se estima como acuífero el Cretácico Inferior en su totalidad, que presenta un desarrollo importante de margocalizas en este sondeo, y que se ha modelado, pero no se valora a efectos de reservas.

Sondeo El Sogre, se encuentra sobre el CDP 320 de la línea sísmica. La interpretación de este sondeo sitúa el muro del Mioceno a 61 m. El resto del sondeo, hasta su profundidad máxima situada a 502 m, está constituido por calizas y dolomías del Cretácico Superior, cuyo muro está sin delimitar.

Este sondeo está situado justo en el extremo sur del acuífero indicando que en esta zona las calizas del Cretácico Superior adquieren un espesor considerable con respecto a los otros dos sondeos (Facheca y Castell de Castells) situados a este y oeste del acuífero, según la línea sísmica RV-71-V.

Sondeo Castell de Castells, se ubica fuera de los límites del acuífero, a poco menos de un kilómetro, aproximadamente, del extremo sureste. El sondeo no presenta edades para los diferentes materiales aunque pueden ser deducidos por su litología. La base del sondeo, de composición yesífera podría pertenecer a las facies Keuper del Triásico, mientras que los estratos de composición carbonática y margosa pertenecerían al Cretácico Superior y los conglomerados de techo serían de edad terciaria.

El Cretácico presenta unos 180 m de espesor, 100 m pertenecen a un cuerpo calizo superior, separado por 60 m de margas, de un cuerpo inferior de unos 15 m de potencia.

Sondeo Lucifer, situado en la mitad norte del acuífero, tampoco presenta edades para sus materiales. La profundidad del sondeo es de 463 m y su composición es exclusivamente carbonática, lo que sugiere que pueda estar compuesto únicamente por depósitos de edad cretácica superior.

En el extremo norte del acuífero hay una serie de sondeos que por ser muy superficiales solo atraviesan el cuaternario y por tanto carecen de interés para la caracterización del acuífero cretácico superior.

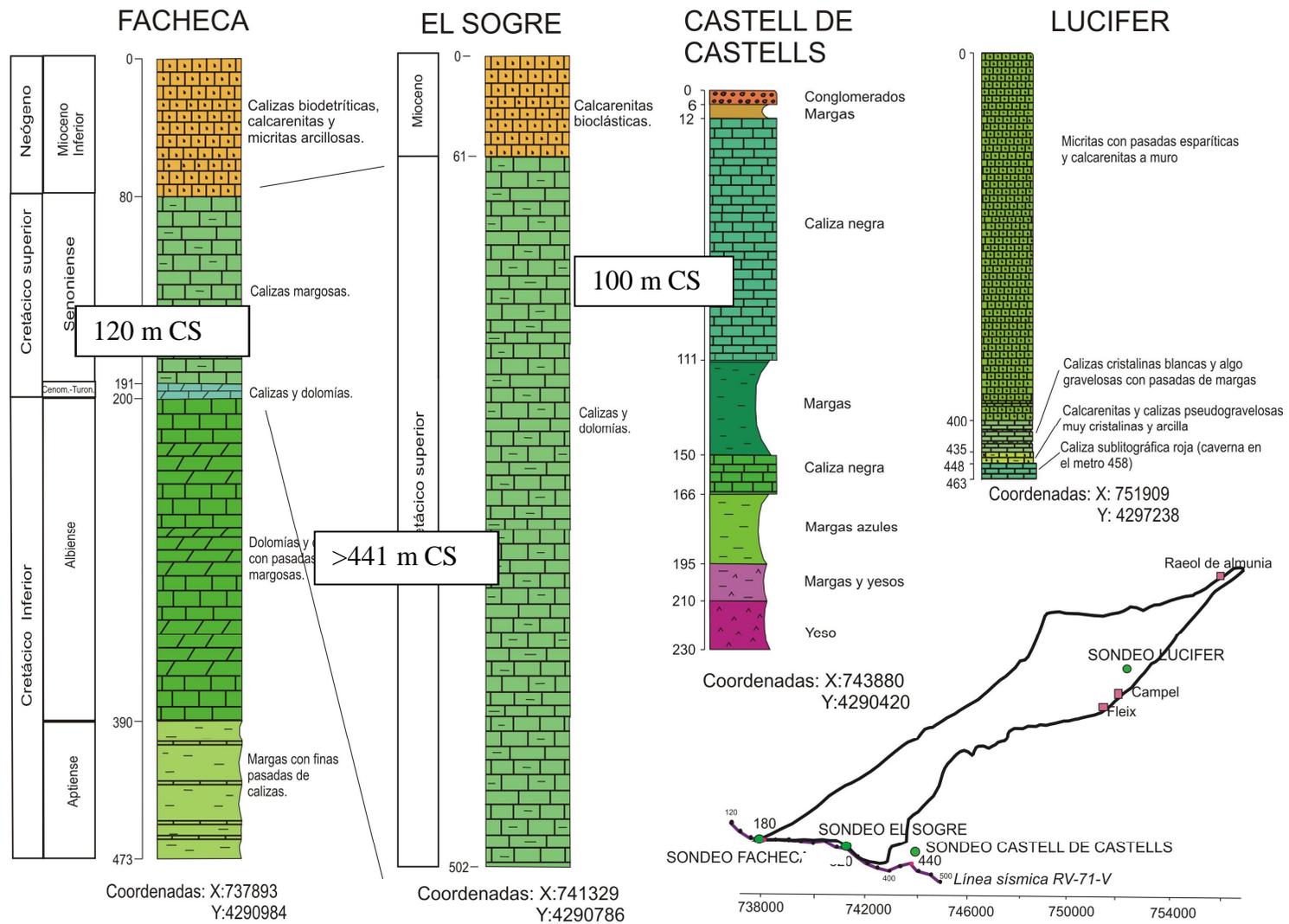


Figura 9. Esquema de los cuatro sondeos del acuífero de Mediodía y su localización geográfica.

- LÍNEA SÍSMICA. Interpretación de la línea sísmica y conversión tiempo-profundidad.

La única línea sísmica RV-71-V no ofrece reflectores fácilmente identificables, observándose 2 estructuras antiformales y 2 fallas principales entre los sondeos (figura 11). Tres de los sondeos, descritos en el apartado anterior, coinciden, aproximadamente, con el trazado de la línea, lo que puede servir de apoyo para la interpretación de la misma. La conversión tiempo-profundidad (ver figura 10) se ha realizado apoyándose en los datos de velocidad RMS (root mean square) de la línea. La figura 10 muestra los datos hasta 0.6 s TWT, lo que proporciona una profundidad máxima de unos 1000 m. En la línea se identifican reflectores más profundos que se ubican a 1.5-2.0 s TWT (4 km), pero no es posible determinar a qué materiales corresponden.

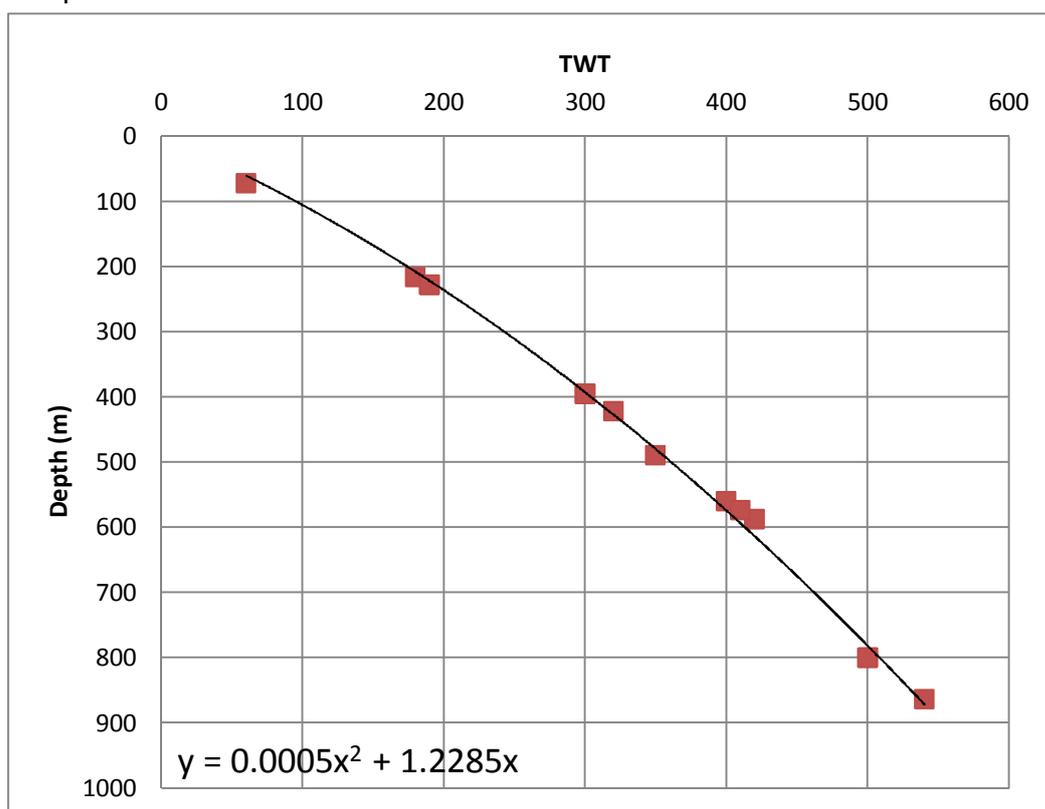


Figura 10. Curva de conversión tiempo-profundidad deducida a partir de los datos de velocidad RMS de la línea sísmica RV-71-V.

Columna	Límites (m)	Tiempo (TWT en ms)	Edad
Facheca	80	63.5	Muro Neógeno
	200	177	Muro Cretácico Superior
	473	338.44	Muro supuesto Cretácico Inferior
El Sogre	61	60	Muro Mioceno
	502	350	Muro supuesto Cretácico Superior
Castell de Castells	12	9.75	Muro Mioceno
	195	175	Muro supuesto Cretácico Superior

Tabla II. Límites en profundidad y en tiempo del muro y techo de las distintas formaciones en los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells.

El sondeo Facheca coincide en posición con el CDP 180 de la línea sísmica, el sondeo el Sogre está situado sobre el CDP 320 y el sondeo Castell de Castells puede proyectarse al CDP 450 de la misma (figuras 9 y 11). Mediante la transformación de profundidades a tiempo doble (TWT) se han ubicado en la línea sísmica los límites del Mioceno y Cretácico Superior e Inferior existentes en dichos sondeos (figura 10 y Tabla II).

Bajo el sondeo Facheca se observa una morfología anticlinal bastante clara. Entre los sondeos Facheca y Castells de Castell se hace muy difícil marcar una continuidad en los reflectores. La existencia del sondeo El Sogre marcado a c. 0.35 s TWT y la construcción del modelo 3D nos informa de la profundidad del muro del Cretácico Superior en esta área. En la figura 11 se muestra la interpretación de la línea sísmica (con los tres sondeos utilizados) donde los colores corresponden a los muros de las superficies utilizadas en la modelización 3D (ver apartado 5).

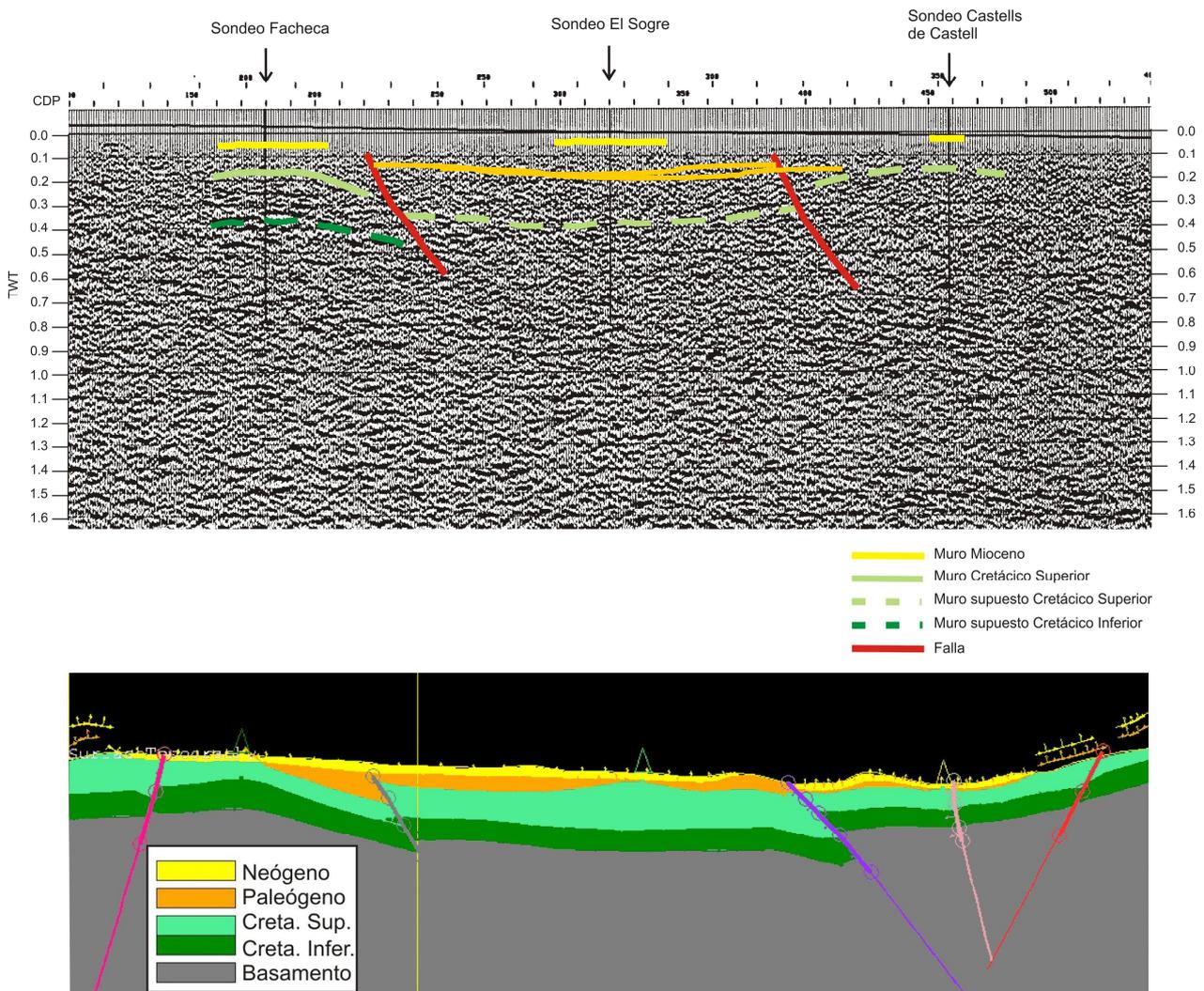


Figura 11. Línea sísmica interpretada a partir de los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells donde se han marcado los reflectores correspondientes al muro del Mioceno, Cretácico Superior y Cretácico Inferior. En aquellos sondeos donde no se especifica el muro de una formación se ha dejado como supuesto muro. Se incluye el corte inferior (corte 8) de la figura 6.

5 CONSTRUCCIÓN Y CALIDAD DEL MODELO 3D

La realización de un modelo geológico 3D de Mediodía tiene como objetivo la caracterización georeferenciada en 3D de su geometría. El software Geomodeller3D integra toda la información disponible de superficie y subsuelo y permite generar un modelo geológico que represente una aproximación lógica y satisfactoria del acuífero. 3D Geomodeller permite la construcción de modelos geológicos complejos en 3D (fallas, pliegues, estratos invertidos, intrusiones, etc.) de carácter matemático (geoestadístico), considerando 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 de campo potencial, los buzamientos son gradientes de ese campo. El algoritmo de interpolación de superficies geológicas 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 modelar (Lajaunie et al., 1997).

El proceso de generación de secciones geológicas en 2D (figura 6) y el posterior cálculo de las superficies equipotenciales que se unirán en profundidad para generar el modelo completo en 3D, requiere la definición coherente tanto del espesor de cada capa (unidad estratigráfica) como la dirección y buzamiento de todas las fallas implicadas. Si no hay coherencia, el modelo de superficies equipotenciales no se podrá calcular correctamente. Este proceso implica la corrección y mejora de datos que individualmente parecían correctos pero que no resultaron coherentes en el modelo final. Por ello se aplicaron las correcciones oportunas (buzamientos de las fallas en profundidad, salto de las fallas, etc.) a los datos de entrada para llegar al modelo final.

En la figura 12 se muestra el modelo 3D proyectado en las secciones utilizadas para el cálculo matemático de superficies en 3D Geomodeller.

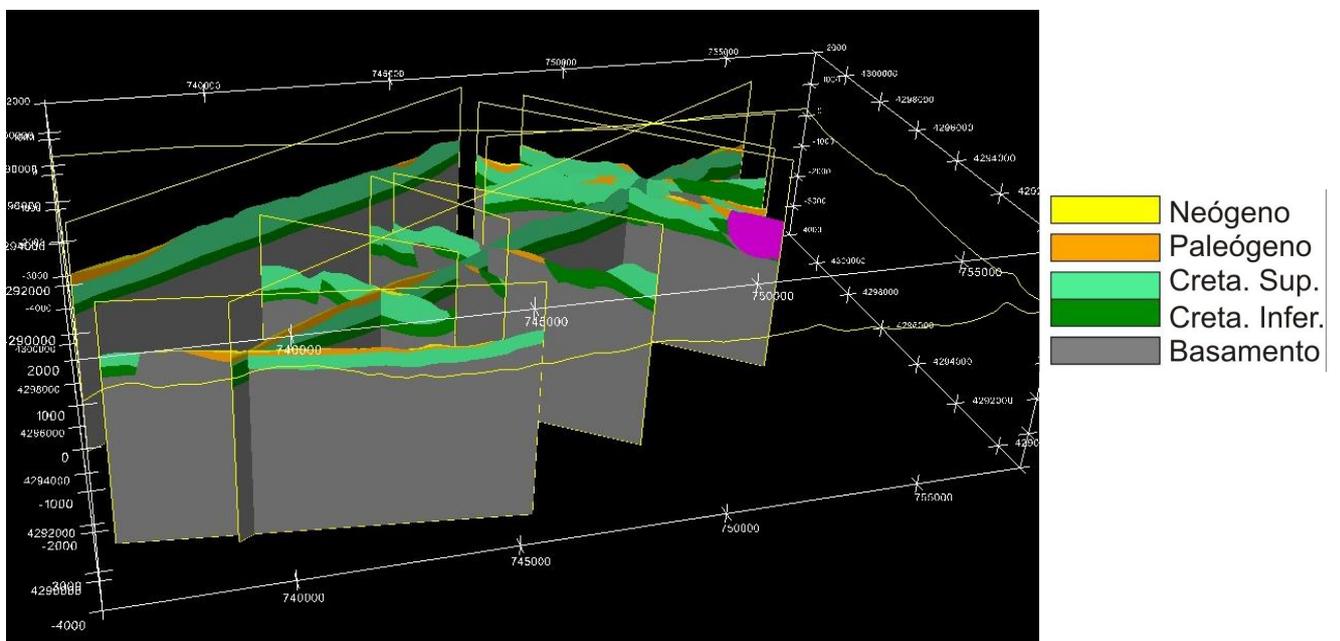


Figura 12. Modelo geológico 3D de Mediodía proyectado sobre las secciones utilizadas para su cálculo. La serie estratigráfica es la misma que se muestra en las figuras 6 y 11: Basamento, Cretácico Inferior, Cretácico Superior, Paleógeno y Neógeno. En rosa el Keuper diapírico intrusivo.

Una imagen del modelo completo (excepto las superficies del Paleógeno y Neógeno, para una mejor visualización) se puede ver en la figura 13, donde se han incorporado todas las fallas utilizadas en la modelización. Las prolongaciones laterales (noroeste y sureste) se consideran las menos fiables de las superficies de referencia del modelo 3D pues suponen una extrapolación al carecer de cortes auxiliares y datos estructurales de superficie.

En la figura 14 se muestra el muro del Cretácico Superior con valores de profundidad en metros y cota cero como nivel de referencia. Se ha superpuesto el contorno del acuífero, proyectado sobre la

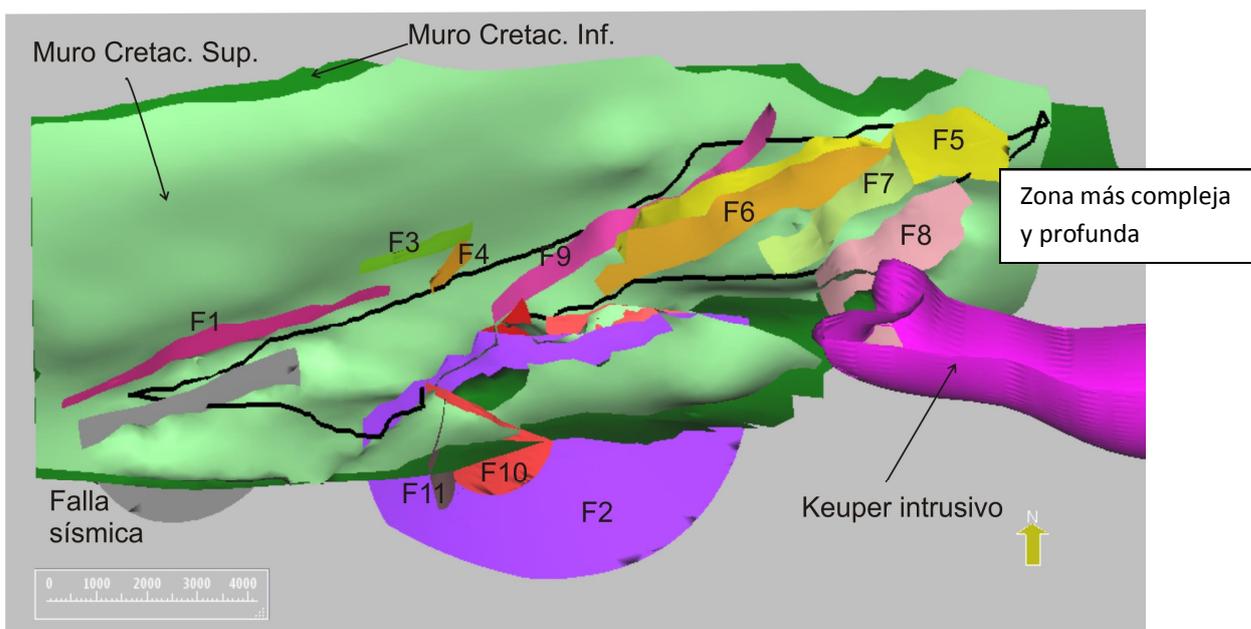


Figura 13. Modelo geológico 3D de las superficies Cretácico Inferior, Cretácico Superior, fallas (F) y Keuper intrusivo (diapiro Parcent). Se trata de un monoclinal sencillo, salvo en su extremo NE.

superficie, para delimitar mejor el área de trabajo. Se observa como la profundidad del muro del Cretácico Superior se incrementa hacia el noreste, por su basculación asociada a un conjunto de cabalgamientos de dirección NE-SO (figura 13: F5, F6, F7 y F8) y el ascenso del diapiro de Parcent. En este extremo, la superficie modelada del muro del Cretácico Superior alcanza los -500 m.s.n.m. En el extremo opuesto, en la esquina suroeste del acuífero, las profundidades mínimas de muro son de unos 500 m, lo que supone un rango de unos 1000 m dentro de los límites del acuífero.

El muro del Cretácico Superior presenta una geometría sencilla de monoclinal-anticlinal SO-NE con flanco sureste de mayor buzamiento, y suave inmersión hacia el NE. El posible límite NO del acuífero viene representado por dicha antiforma que configura un alto estructural con profundidades de muro entre unos 0-500 m.s.n.m.

Según el trazado de las isopiezas de la figura 7, cuyo nivel máximo se sitúa en el suroeste a 225 m.s.n.m., el acuífero se supone no saturado en buena parte de su mitad occidental. En la parte central, más estrecha, del acuífero la profundidad del muro se sitúa entre los 100-200 m y supone el límite entre las dos zonas SO, más elevada, y NE, más baja, que se pueden distinguir en el muro del acuífero según el eje mayor del monoclinal (figuras 14-15). Por las razones expuestas más arriba, la parte noreste del acuífero es la más compleja y profunda llegando a alcanzar los -500 m en el extremo noreste, lugar donde se encuentran los principales manantiales por los que desagua el acuífero (ver figura 7).

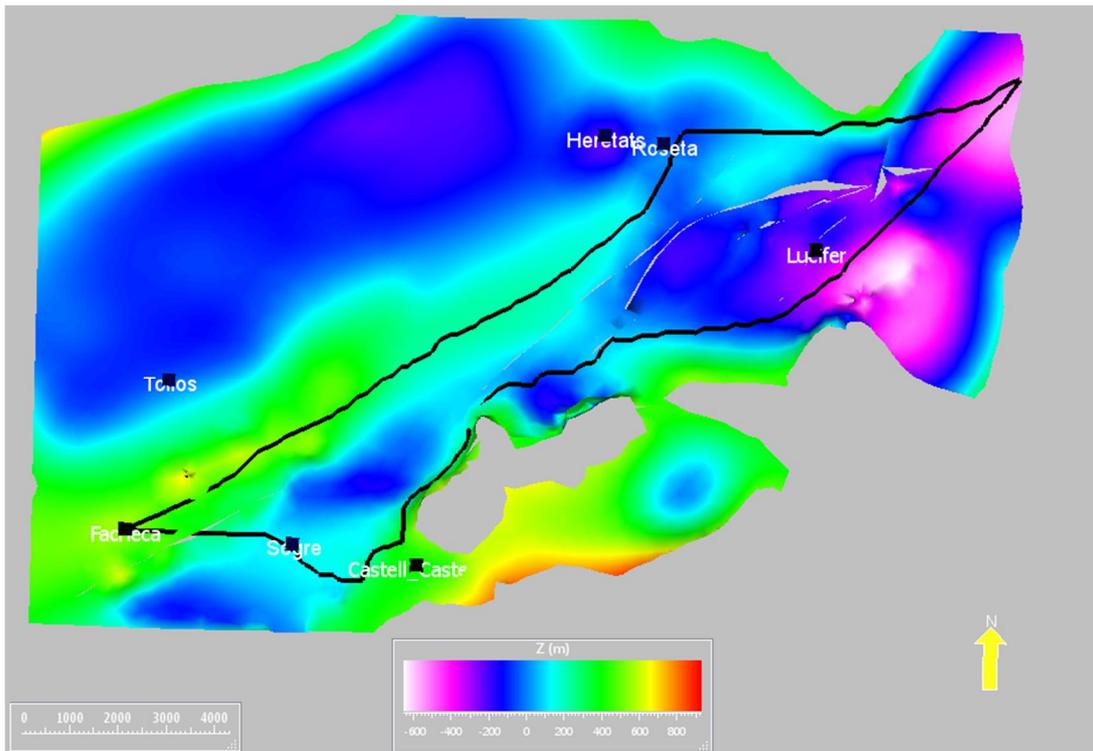


Figura 14. Muro del Cretácico Superior del acuífero de Mediodía (base impermeable del acuífero) con valores de z (cota nivel del mar) sobre la que se ha superpuesto el límite del acuífero proyectado sobre la superficie y los sondeos. Explicación en texto.

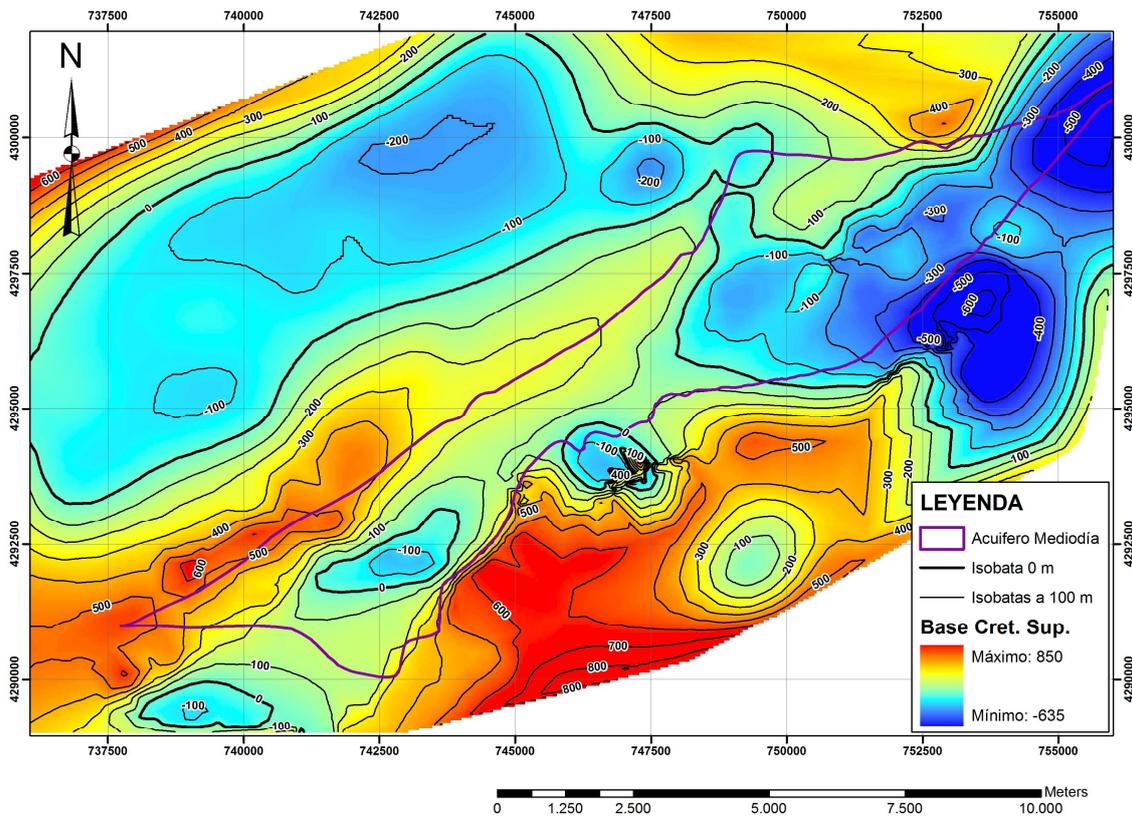


Figura 15. Mapa de isobatas del muro del Cretácico Superior de Mediodía (base impermeable del acuífero). Las máximas profundidades se sitúan en el noreste del acuífero. Referencia: nivel de mar.

En el mapa de isobatas del muro del acuífero (figura 15) se observa la complejidad estructural de su borde oriental y la parte noreste del acuífero. En las zonas externas a los límites, la falta de datos en el modelo hace que la extrapolación ofrezca una imagen menos fidedigna del modelo de las superficies de referencia. Obsérvese que en las figuras 14 y 15 las superficies de referencia representan horizontes de geometría relativamente suave, no abrupta, salvo en el entorno de algunas fallas. Ello es debido, fundamentalmente, a que en la interpretación de los cortes (figura 6) se ha tratado de evitar geometrías en %eclas de piano+ con importantes saltos de falla, dominando las estructuras de plegamiento, de modo que se puede realizar un trazado de isobatas bastante continuo.

La tabla III adjunta proporciona un resumen de los datos utilizados durante el proceso de modelización 3D del acuífero de Mediodía, para cada Superficie de Referencia reconstruida).

Unidades modelizadas	Nuevos buzamientos	Nuevos contactos	Sondeos que perforan la unidad	Horizontes sísmicos
Muro Neógeno	Si	No	5	Si
Muro	Si	No	5	No
Muro Cret.	Si	Si	5	Si
Muro Cret.	Si	No	2	Si
Triásico	No	No	1	No

Tabla III. Datos incorporados al modelo 3D del acuífero Mediodía.

La utilización de datos de sondeos disponibles, dentro y fuera del límite establecido como límite del acuífero (figura 14), nos servirá para verificar la calidad del modelo realizado. Además de los 4 sondeos de la figura 9, se dispone de tres sondeos exteriores al límite del acuífero (figura 16): Tollos (coordenadas UTM, X=738716; Y=4294125; Z=690 m), Heretats (coordenadas UTM, X=747525; Y=4299500; Z=380 m) y Roseta (coordenadas UTM, X=748730; Y=4299360; Z=360 m).

De estos tres sondeos el que nos aporta una información más valiosa es el sondeo Roseta ya que a 500 m de profundidad corta el Albiense (considerado en esta zona el techo del Cretácico Inferior), por lo tanto delimita el muro del acuífero aquí. En la tabla IV se observa que las diferencias entre cotas de sondeo y valor de isobata para el Muro del Cretácico Superior del modelo 3D del acuífero Mediodía son inferiores a los 100 metros. En el mapa de isobatas (figura 15) se insinúa un pequeño alto topográfico de la base del Cretácico Superior en la vecindad oriental de este sondeo; sin embargo, en el sondeo Roseta la base del Cretácico Superior está a -140 m, 100 m por debajo del modelo de dicha superficie de referencia (tabla IV). Hacia el oeste la superficie modelada parece que profundiza más que los sondeos (tabla IV), aunque esta zona el modelo se basa en datos extrapolados y por tanto menos fidedignos. En todo caso, las diferencias parecen admisibles, si se tiene en cuenta que todos los sondeos, salvo 2, son exteriores al acuífero, y tres de ellos (los de la figura 16) no se tuvieron en cuenta a la hora de construir el modelo.

	SONDEOS						
	Facheca	El Sogre	Castells	Lucifer	Tollos	Heretats	Roseta
Muro Cretácico	-38	+10	+96	-37	-50	-28	+100

Tabla IV. Diferencias en metros entre cotas de sondeo y valor de isobata para el Muro del Cretácico Superior del modelo 3D del acuífero Mediodía (posición de sondeos en figura 14). Signo negativo cuando la superficie calculada queda por debajo del marcador del sondeo, positivo al contrario.

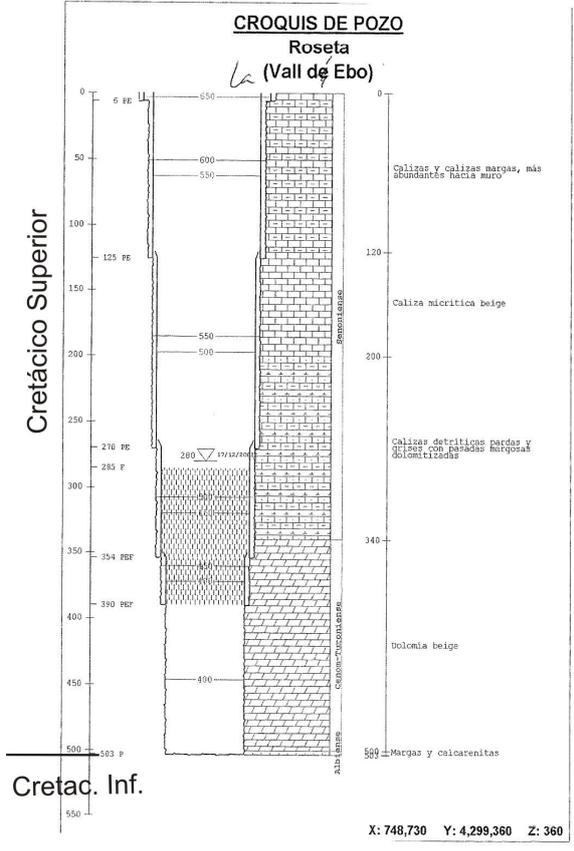
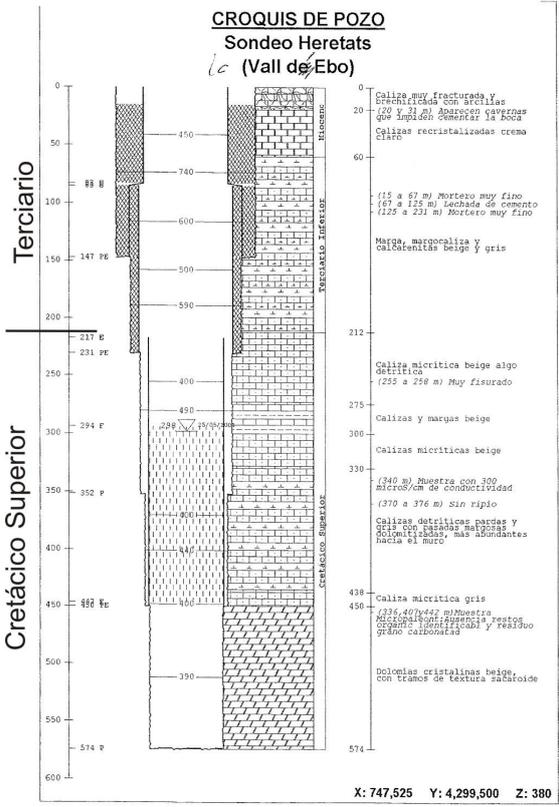
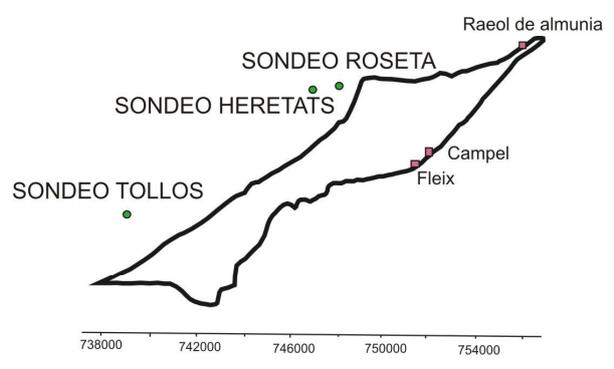
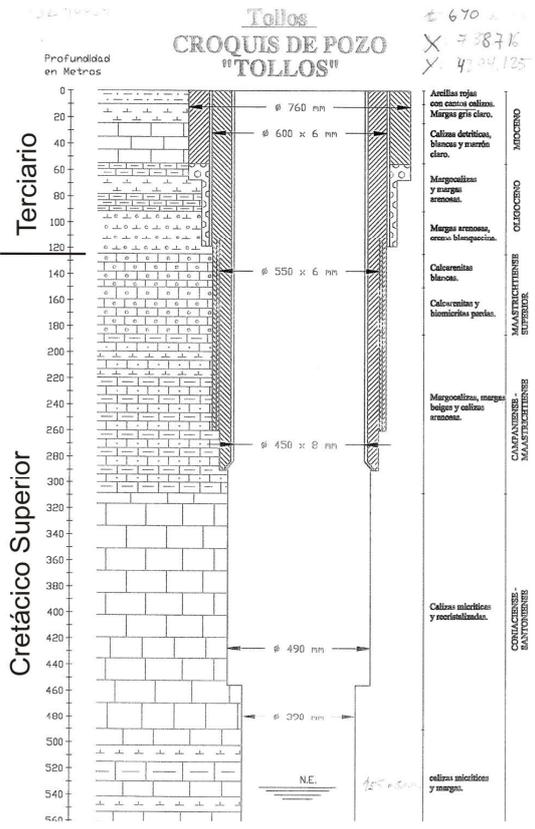


Figura 16. Sondeos próximos al acuífero de Mediodía, situados al Noroeste del límite del acuífero. En todos ellos se ha marcado los límites de las principales superficies de referencia.

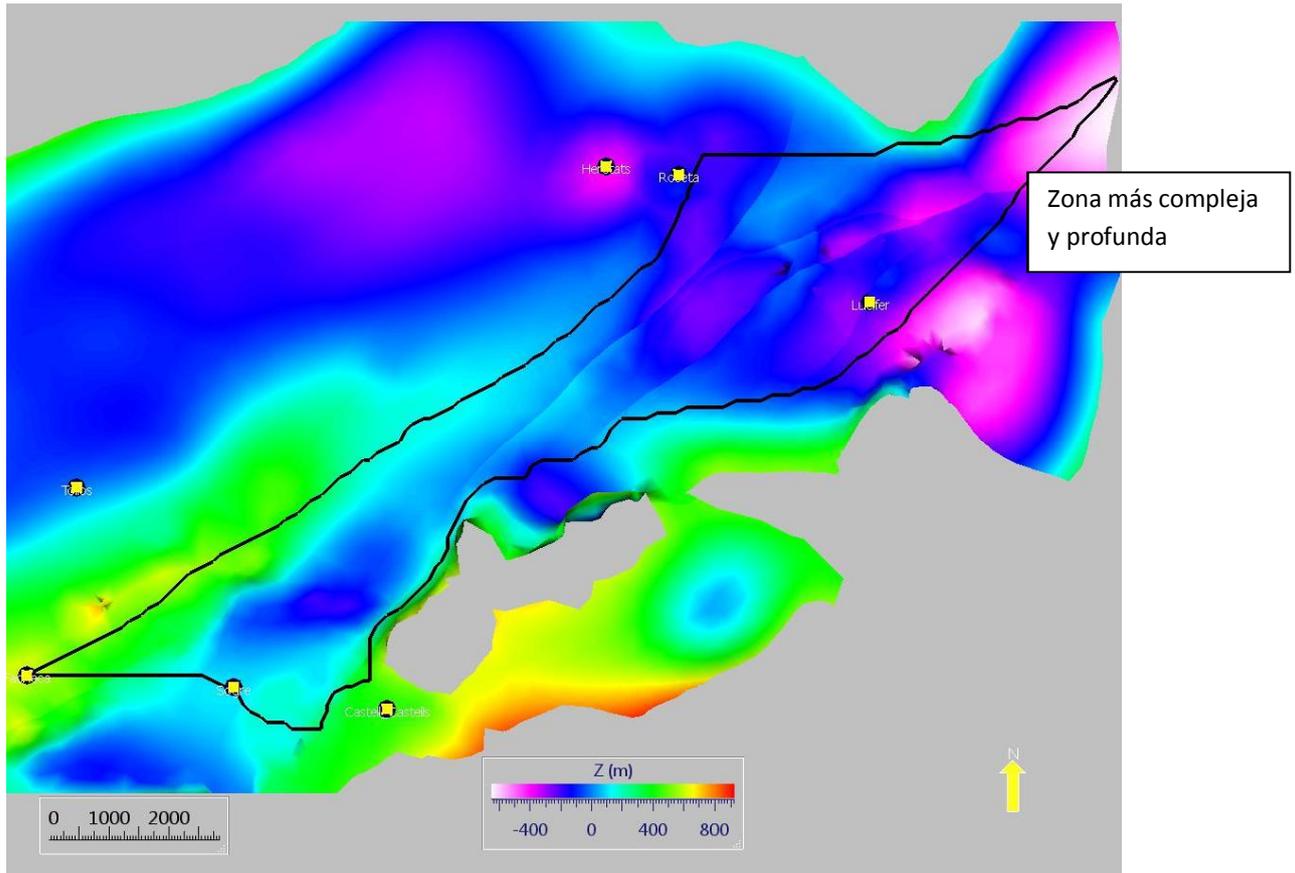


Figura 17. Muro del Cretácico Superior del acuífero de Mediodía (base impermeable del acuífero) forzando el paso de dicho muro por los sondeos (modelo de gOcad).

Existe la posibilidad, en la modelación de Superficies de referencia 3D desde gOcad de forzar el paso de la superficie correspondiente al Muro del Cretácico Superior por los marcadores de los sondeos (figura 17), anulando las discrepancias de la Tabla IV. Con la incorporación forzada de los 6 sondeos, la superficie del muro del Cretácico del acuífero gana en profundidad en su mitad noreste (se puede ver la diferencia en las figuras 14 y 17), donde resultan más apreciables los cabalgamientos de dicha mitad, por el reajuste del salto de los mismos.

6 PETROFÍSICA. ACTUALIZACIÓN DE RESERVAS HIDROGEOLÓGICAS

6.1. Sistema poroso

Para la caracterización del sistema poroso de las formaciones permeables del acuífero Mediodía no se ha realizado ningún estudio petrofísico de determinación de la porosidad abierta, ni petrográfico específico. Usando las muestras disponibles en el acuífero próximo (límite sureste) de Carrascal-Ferrer (Mediodía puede considerarse como continuación del pliegue de vergencia N-NO que configura la Sierra de Carrascal, figuras 4 y 6), donde sí existe un amplio estudio petrográfico (ver informe correspondiente), pueden asignarse los siguientes valores de porosidad:

-Porosidad asignable al Cretácico Superior (porosidad de este tramo en Carrascal-Ferrer): 0.5%

-Porosidad media del acuífero (Carrascal-Ferrer): 1.35%

Según el informe IGME, 1989, a efectos del cálculo de reservas y curva de explotación la porosidad del acuífero Mediodía puede estimarse entre 2-4% considerándose la porosidad eficaz media de 3%.

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, los cálculos que se presentan en el siguiente apartado se han realizado para dos escenarios de porosidad: 0.5% y 3%.

6.2. Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas

Una vez creadas las superficies que nos servirán como muro y techo del acuífero, es necesario realizar cálculos volumétricos para la estimación de las reservas del mismo. Con ayuda del software gOcad, se genera un *stratigraphic grid*. El *stratigraphic grid* es una malla 3D regular que puede ser deformada y cortada por fallas para ajustarla a un modelo estructural de las superficies de referencia. En el caso de Mediodía y ya que prácticamente la totalidad del acuífero puede considerarse como libre, se han tomado como muro la superficie del Cretácico Superior y como techo la Topografía para el cálculo del volumen total de reservas del acuífero. Para el cálculo de la curva de explotación, desde un sondeo determinado, se requiere la determinación de los volúmenes saturados entre la superficie piezométrica y distintas cotas de subsuelo (el volumen del acuífero, representado por el *stratigraphic grid* puede cortarse desde la superficie piezométrica a diferentes cotas y así calcular el volumen de roca saturada). También es necesario conocer la porosidad abierta y el coeficiente de almacenamiento de las formaciones acuíferas.

Los valores de reservas de agua subterránea calculados se resumen en Tabla V y figura 18, en la que se ha representado la curva de reservas del acuífero de Mediodía.

Las reservas dinámicas del acuífero (aquellas que se almacenan en un acuífero por encima de la cota de drenaje de los principales puntos de surgencia) se han calculado superponiendo la piezometría de aguas altas al modelo 3D. El nivel piezométrico más alto se sitúa en el suroeste del acuífero, cerca de la localidad de Famorca (ver figura 7), con una altura de 225 m.s.n.m. El punto de menor potencial está en el

noreste en las proximidades de la localidad de Ràfol de l'Almúnia, con una altura de 80 m.s.n.m. Entre ambos niveles extremos se sitúan el resto de piezometrías intermedias, realizándose los cálculos de reservas cada 50 metros por encima de la cota mínima y cada 100 m por debajo de la cota cero (tabla V y figura 18). Las reservas dinámicas que resultan de la situación más favorable (porosidad del 3%) son de 66 hm³ de agua, reduciéndose a 11 hm³ con una porosidad de 0.5% (modelo 3D Geomodeller). La tabla V proporciona las reservas del acuífero de Mediodía y las compara con los datos procedentes del estudio hidrogeológico del IGME, 1989.

PROYECTO HIDROPROAL 2012-2013							INFORME DPA-IGME 1989	
Cota	Roca saturada (km ³)		V en hm ³ (por. 0.5%)		V en hm ³ (poros. 3%)		Volumen saturado (km ³)	Volumen agua hm ³ (Porosidad 3%)
	Geomod	gOcad	Geomod	gOcad	Geomod	gOcad		
225	6.52	9.10	33	46	196	273	14.3	476
175	5.56	7.90	28	40	167	237	13.7	455
125	4.95	7.10	25	36	149	213	12.9	430
80	4.34	6.20	22	31	130	186	11.9	395
0	2.76	3.90	14	20	83	117	10.0	333
-100	1.35	1.90	7	10	41	57	7.5	251
-200	0.50	0.70	3	4	15	21	5.5	183
-300	0.15	0.26	1	1	5	8	3.8	127
-400	0.04	0.09	0	0	1	3	2.4	81
-500	0.00	0.02	0	0	0	1	1.4	45
-600	0.00	0	0	0	0	0	0.6	20
-700	0.00	0	0	0	0	0	0.2	8
-800	0.00	0	0	0	0	0	0.1	3
-900	0.00	0	0	0	0	0	0.0	0.5

Tabla V. Resumen de reservas del acuífero Mediodía. Reservas dadas por los modelos 3D del acuífero (Geomodeller y gOcad) para porosidades del 0.5% y 3%, respectivamente.

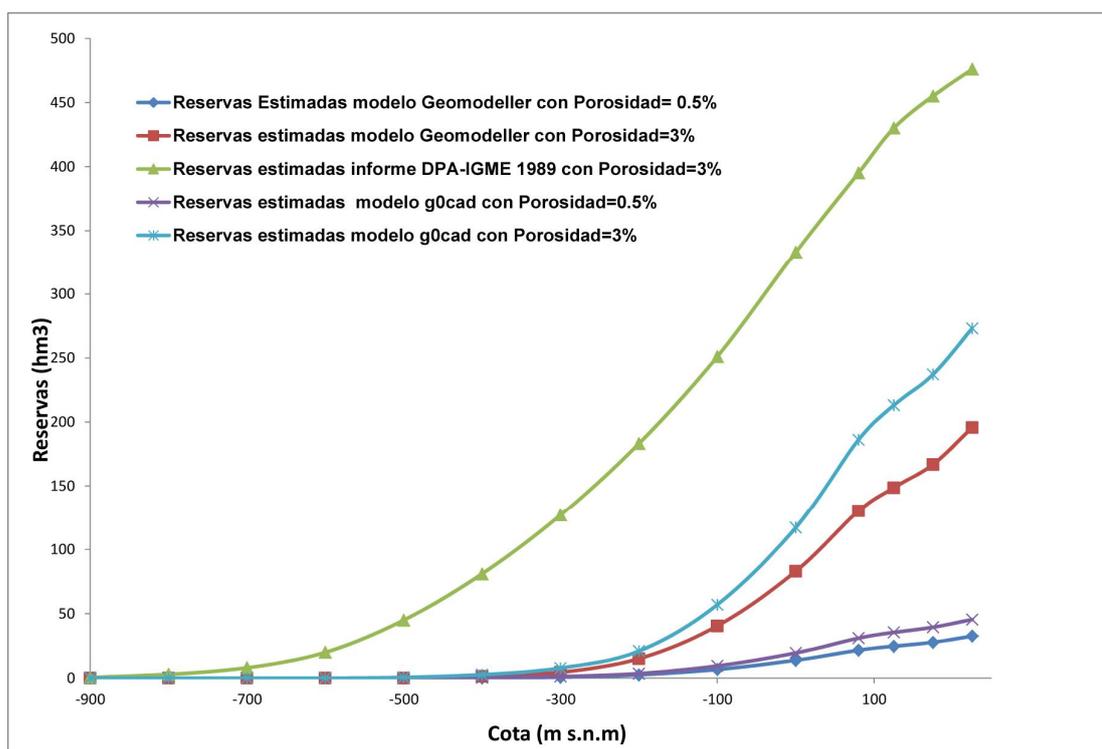


Figura 18. Curvas de reservas del Acuífero Mediodía obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero.

Aunque la serie de datos no es exactamente comparable por ligeras diferencias en los niveles piezométricos que usa cada estudio y la segmentación del acuífero en cuatro zonas geológicas, según el informe IGME 1989, se observa que existen importantes diferencias entre las estimaciones de reservas del estudio de 1989 y el actual, diferencias que van desde unos 170 hm³ a -200 m.s.n.m. hasta 280 hm³ a 225 m.s.n.m. (165 y 200 hm³ en el modelo de gOcad). Estas diferencias pueden deberse a:

-La distinta interpretación estructural de ambos estudios, especialmente por lo que afecta a la mitad oriental del acuífero Mediodía. En efecto, si se comparan los mapas de isobatas del muro del acuífero en ambos estudios se observa que mientras el trabajo de 1989 supone un importante efecto de basculación, y profundización del Cretácico Superior (hasta del orden de -900 m.s.n.m.) a lo largo de casi toda la mitad oriental del acuífero (figura 19), debido al ascenso del diapiro de Parcent sobre el borde SE de Mediodía, en el presente análisis este efecto se considera bastante más local (existen muy pocas zonas bajo -200 m.s.n.m. en el mapa de la figura 15), e inapreciable en la mitad SO de acuífero. Esto provoca una diferencia de reservas del orden de 170 hm³ (cfr, tabla V, diferencia de reservas existentes bajo -200 m.s.n.m. entre ambas estimaciones para porosidad=3%).

-Las diferentes metodologías utilizadas en cuanto a consistencia lateral de cortes geológicos transversales y según la estructura, saltos de fallas y control de espesores en los mismos (los espesores medios son algo superiores en el estudio de 1989), etc. Si los cortes son inconsistentes, los modelos 3D no se pueden computar. A este factor hay que atribuir del orden de otros 100 hm³, en cuanto a discrepancias de ambos resultados (estudios de 1989 y actual), en el modelo de Geomodeller; que se reducirían a unos 30 hm³ en el caso del modelo con gOcad.

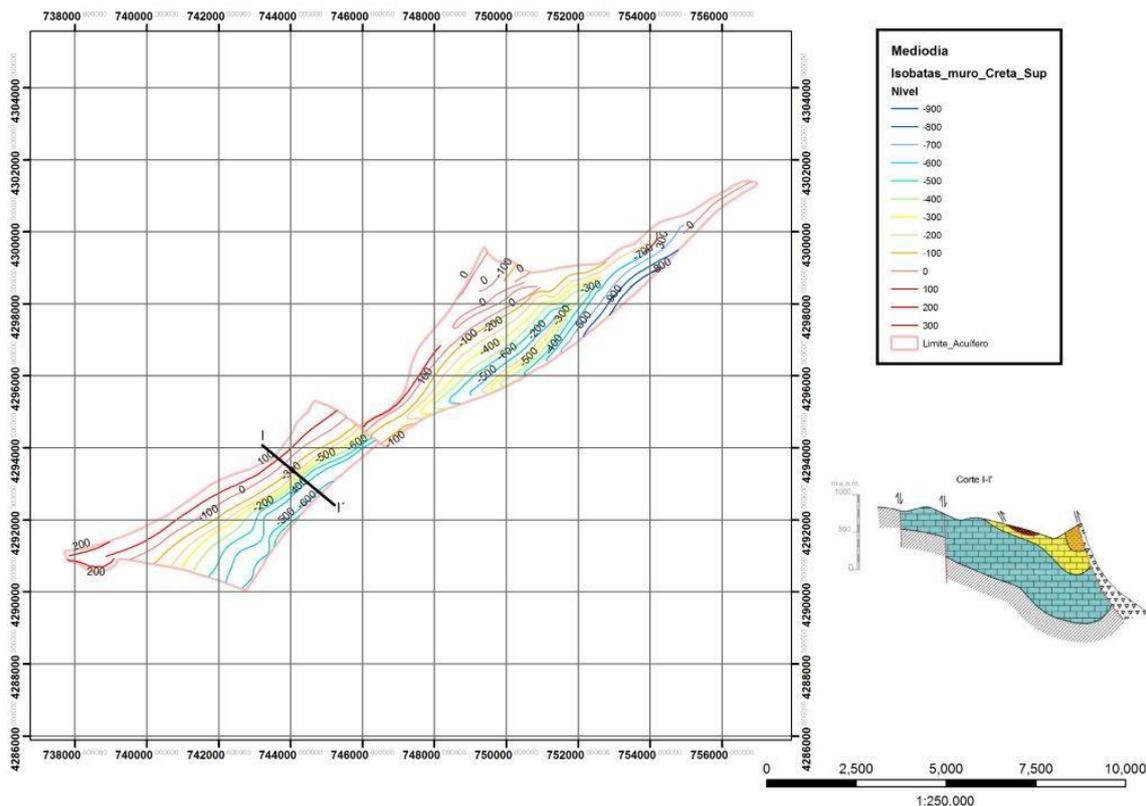


Figura 19. Mapa de isobatas del muro del Cretácico Superior según el informe IGME, 1989, del Acuífero Mediodía, con corte ilustrativo del mismo. El Cretácico Superior profundiza hacia el sureste más que en los modelos de este trabajo, alcanzando los -900 m.s.n.m.

6.3. Curvas de explotación

El estudio DPA-IGME, 2009, de determinación de las reservas útiles de Mediodía, estimó unas reservas máximas para el acuífero de 36.5 hm³. Dichas reservas fueron calculadas mediante la elaboración de modelos matemáticos de flujo, a partir de un nivel piezométrico máximo obtenido al llenar el acuífero con una recarga continua de 1000 mm/a ¹ 44.4 hm³/a. Este nivel se sitúa a 145 m.s.n.m. en el sondeo Lucifer, que alcanza los -221 m.s.n.m., profundidad de explotación inferior del acuífero en la actualidad. Usando los ajustes polinómicos de la tabla VI se obtienen las curvas de explotación del acuífero Mediodía y reservas desde el sondeo Lucifer (figura 20, tabla VII).

Volumen en hm ³ (porosidad 0.5%)	Geomodeller :	$3E-13x^5 - 2E-10x^4 - 2E-07x^3 + 7E-05x^2 + 0.0798x + 14.149$
	Gocad:	$-4E-13x^5 - 8E-10x^4 - 3E-07x^3 + 0.0001x^2 + 0.1129x + 20.077$
Volumen en hm ³ (porosidad 3%)	Geomodeller :	$-1E-12x^5 - 3E-09x^4 - 1E-06x^3 + 0.0005x^2 + 0.4705x + 84.189$
	Gocad:	$-2E-12x^5 - 5E-09x^4 - 2E-06x^3 + 0.0007x^2 + 0.6773x + 120.46$
	IGME, 1989:	$-1E-12x^5 - 3E-09x^4 - 2E-06x^3 - 9E-05x^2 + 0.7967x + 333.21$

Tabla VI. Ajustes polinómicos de las curvas de reservas del acuífero Mediodía (figura 18) con los diferentes modelos geométricos y porosidades usados en este estudio.

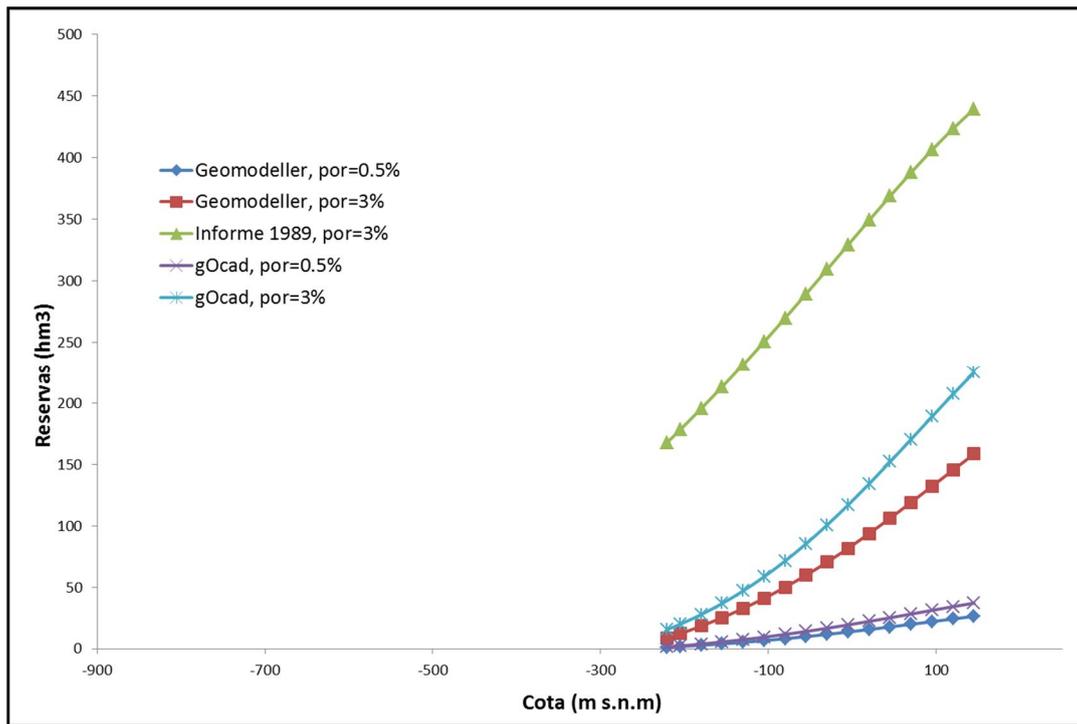


Figura 20. Curvas de explotación del acuífero Mediodía desde el sondeo Lucifer.

PROYECTO HIDROPROAL 2012-2013					INFORME DPA-IGME 1989
Reservas (Cota)	V en hm ³ (porosidad 0.5%)		V en hm ³ (porosidad 3%)		V en hm ³ (porosidad 3%)
	Geomodeller	gOcad	Geomodeller	gOcad	
A. Reservas (145 m)	26.5	37.3	158.5	225.0	439.4
B. Reservas (-221 m)	1.5	2.3	8.5	15.0	167.7
Reservas explotables (A-B)	25.0	35.0	150	210	271.7

Tabla VII. Reservas explotables del acuífero Mediodía desde el sondeo Lucifer.

7 CONCLUSIONES. IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS DEL MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE MEDIODÍA

Enmarcada en el Acuerdo específico DPA-IGME de cooperación 2010-2013 en materia de aguas subterráneas, la actividad %Desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo para la caracterización de recursos hidrogeológicos profundos de Alicante+, dedicada a la evaluación de reservas hídricas mediante modelación geológica 3D, tiene como objetivo principal la mejora del conocimiento hidrogeológico profundo del subsuelo alicantino.

Este informe presenta resultados parciales de dicha actividad en el acuífero de Mediodía, que fue seleccionad porque se consideró viable su modelación 3D dada la información hidrogeológica previa disponible (sondeos, cortes), y por el interés de su sección estratigráfica carbonatada profunda. La metodología utilizada se ha adecuado a los datos disponibles: nivel de exposición de estructuras geológicas y la cantidad y calidad de datos geofísicos y sondeos. En concreto, el acuífero Mediodía presenta buenos afloramientos geológicos y escasez de estos últimos.

7.1 Consideraciones sobre el modelo geológico 3D

El modelo geológico 3D calculado consta de 5 superficies de referencia: Triásico, Cretácico Inferior, Cretácico Superior, Paleógeno y Neógeno.

El modelo 3D de Mediodía presenta una geometría sencilla de monoclinal-anticlinal SO-NE con flanco sureste de mayor buzamiento y ligera inmersión hacia el NE, en el que las superficies de referencia representan horizontes de geometría relativamente suave, no abrupta, salvo en el entorno de algunas fallas y el extremo NE, de mayor complejidad estructural.

Se ha considerado como muro del acuífero el Muro del Cretácico Superior carbonatado y como techo la superficie topográfica.

La profundidad del muro del Cretácico Superior se incrementa hacia el noreste, por su basculación y apilamiento asociados a un conjunto de cabalgamientos de dirección NE-SO y el ascenso del diapiro de Parcent. En este extremo, la superficie modelada del muro del Cretácico Superior alcanza los -500 m.s.n.m. (según modelo estructural obtenido en Geomodeller). En la parte central, más estrecha, la profundidad del muro se sitúa entre los 100-200 m y supone el límite entre las dos zonas SO, más elevada, y NE, más baja, que se pueden distinguir en el muro del acuífero según el eje mayor del monoclinal.

Se observan tres depocentros diferenciados coincidiendo con la Sierra de Alfaro al sur, la Sierra de la Carrasca al norte y la zona de máximo estrechamiento del acuífero en la parte central (la profundidad de todos ellos en torno a -150 m).

Fuera del límite establecido como límite del acuífero la superficie se ve truncada en la parte sureste por los cabalgamientos situados en la zona de contacto con el acuífero Cocoll. Hacia el noroeste el Cretácico Superior se prolonga estructuralmente hacia la unidad Almudaina-Segaría.

7.2 Límites del acuífero

a) Extremo sur del acuífero. La interpretación de los reflectores correspondientes al Cretácico Superior e Inferior en la línea sísmica apoya la existencia de un anticlinal en silla de montar en la parte suroeste que podría actuar como límite del acuífero hacia el oeste y el sur. El fuerte buzamiento del Cretácico Superior al este del sondeo Facheca, que se observa en el modelo geológico obtenido (figura 21, igual a figura 11) actúa como límite oeste del acuífero considerando el nivel piezométrico máximo en esta zona. Al oeste del sondeo Castell de Castells el límite queda claramente definido por la existencia de una falla inversa que eleva los materiales impermeables del Cretácico Inferior (ver figura 21). En este límite existen algunas áreas en las que los materiales aptienses de los acuíferos de Cocoli y del Peñón contactan con la sierra del Mediodía, pero la baja permeabilidad de esta formación y la elevada cota topográfica en el área de contacto impiden cualquier conexión hidráulica, por lo que éste es cerrado (DPA, 2013). Además, en los alrededores de Farnorca debe haber cierta conexión hidráulica con los niveles calcareníticos permeables miocenos y oligocenos del acuífero de Cuatretondeta, que permite la descarga de éstos hacia el acuífero de Mediodía (DPA, 2013).

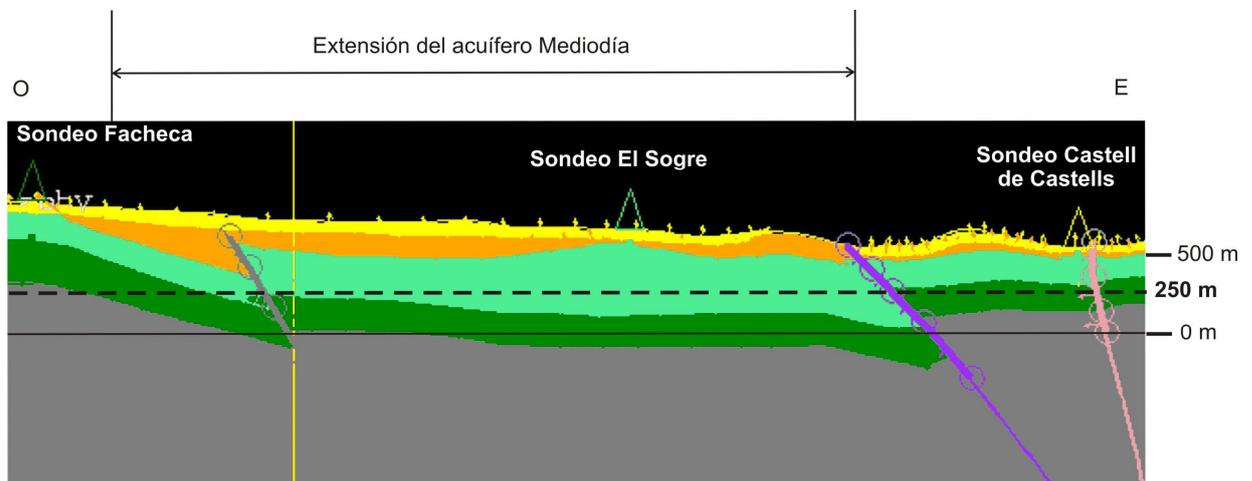


Figura 21. Corte modelado número 8 del acuífero Mediodía. Con línea discontinua se marca la superficie piezométrica media en esta zona.

b) Límite oeste. La continuación hacia el noreste del anticlinal deducido en la línea sísmica, según una estructura NE-SO laxa y con cierta inmersión nor-noreste, delimitaría el límite oeste del acuífero Mediodía. La consideración de fallas normales con menor buzamiento y salto que las inicialmente propuestas por el IGME, 1989, permite que haya una eventual conexión entre los diferentes niveles de Cretácico Superior fracturado (ver figura 22) y por lo tanto un acuífero continuo. Se ve como el límite oeste del acuífero siempre lo marca una estructura anticlinal de Cretácico Superior y Cretácico Inferior.

Según el corte geológico I-lq (figura 22) del Atlas hidrogeológico (DPA-IGME, 2013) la zona saturada del acuífero estaría delimitada por la falla F5 que por su gran salto pondría en contacto los materiales carbonatados del Cretácico Superior (al sureste) con unas facies de margocalizas impermeables (al noroeste). En el modelo obtenido en este trabajo, este límite no estaría tan claramente definido al suponer estructuras más tendidas en todo el conjunto de cabalgamientos situados en la parte norte del acuífero. El menor salto de falla y su menor buzamiento podría permitir una conexión

entre la zona saturada a ambos lados de la misma, y por tanto, la conexión de Mediodía con acuíferos al NO de él.

c) Límite este. Viene marcado por una serie de fallas inversas y cabalgamientos que en algunos sectores implica las facies triásicas del Keuper. Esto permite que la formación impermeable Aptiense-Cenomaniense inferior quede por encima de la cota de la superficie saturada del acuífero, ocasionando su desconexión.

d) Extremo norte del acuífero. Por último, desde el núcleo urbano de Tormos hasta el de Sagra, sector donde se concentran las descargas del acuífero, el límite es parcialmente abierto y permite la conexión hidráulica con el cuaternario del acuífero de Vergel.

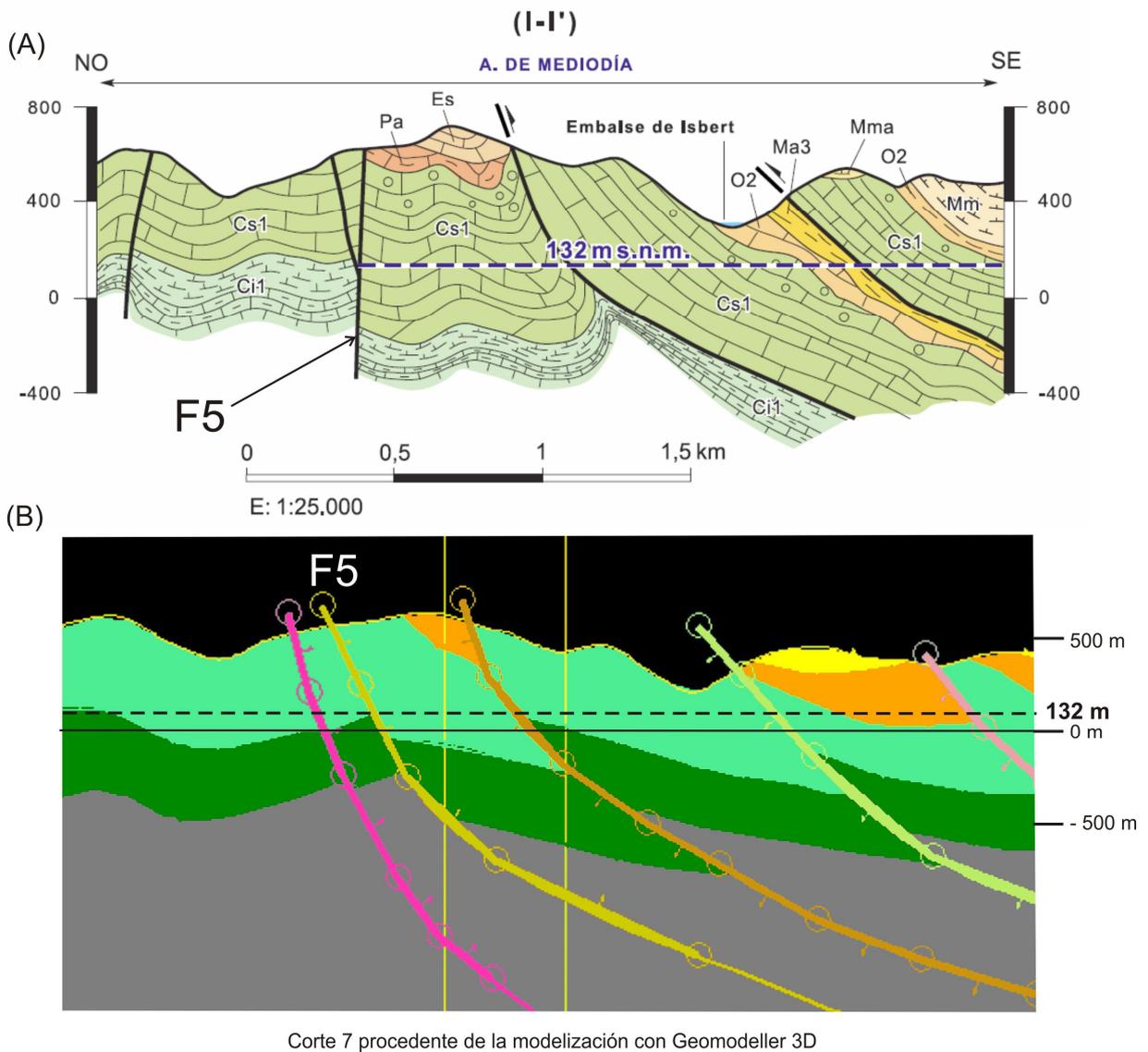


Figura 22. Corte del acuífero Mediodía en su sector central, a) Arriba: según el Atlas hidrogeológico de Alicante (DPA, 2013), b) Según el modelo 3D obtenido en este trabajo.

7.3. Cálculo de reservas

a) Comparación de reservas con estudios previos.

Según el informe IGME, 1989 las reservas que resultan de la situación más favorable (porosidad 4%) son 635.57 hm³ y con la menos favorable (porosidad 2%) se obtiene un volumen de 317.77 hm³. Estimando una porosidad media para todo el acuífero de 3% las reservas son de 476.84 hm³.

En este estudio, las reservas totales de agua en el acuífero quedarían comprendidas entre 33 y 196 hm³ (modelo estructural obtenido en Geomodeller), y 46 y 273 hm³ (modelo estructural obtenido con Gocad), respectivamente, para porosidades del 0.5 y 3% (Tabla VIII). Del mismo modo, las reservas dinámicas, las que quedarían por encima de la cota de drenaje del manantial de menor nivel piezométrico en época de aguas altas, quedarían comprendidas entre 11 y 66 hm³, para las porosidades citadas.

La diferente estimación de reservas, además de las diferentes metodologías utilizadas, se debe a la distinta interpretación estructural de ambos estudios. Mientras el trabajo de 1989 supone un importante efecto de basculación, apilamiento y profundización del Cretácico Superior (hasta casi -950 m.s.n.m.) a lo largo de toda la mitad oriental del acuífero, debido a cabalgamientos y al ascenso del diapiro de Parcent sobre el borde SE de Mediodía, en el presente análisis este efecto se considera bastante más local (existen muy pocas zonas bajo -200 m.s.n.m. en el muro del acuífero), e inapreciable en la mita SO de acuífero. Esto provoca una diferencia de reservas del orden de 170 hm³. En todo caso, es muy probable que estas reservas sean de dudosa explotabilidad dado su posible nivel de salinidad.

La síntesis de Reservas totales, y explotables desde el sondeo Lucifer, del acuífero Mediodía se presenta en la Tabla VIII.

PROYECTO HIDROPROAL 2012-2013					INFORME DPA-IGME 1989	INFORME DPA- IGME 2009
	Porosidad 0.5%		Porosidad 3%		Porosidad 3%	Modelo de flujo
	Geomodeller	gOcad	Geomodeller	gOcad		
Reservas totales (hm ³)	33	46	196	273	476	36.5
Reservas explotables (hm ³)	25.0	35.0	150	210	271.7	25.0

Tabla VIII. Reservas totales y explotables del acuífero Mediodía.

La mejor concordancia de valores de reservas totales y explotables se produce entre el caso del modelo geológico 3D obtenido con Geomodeller y los resultados del informe DPA-IGME, 2009. Como se trata de metodologías independientes, se sugiere una porosidad abierta del Cretácico Superior en Mediodía próxima al 0.5% en promedio, que coincide con la porosidad de este tramo según los resultados de laboratorio de las muestras tomadas en Carrascal-Ferrer. Añadir, por último, que en el

informe DPA-IGME, 2009, para el caso de Mediodía, la porosidad que se ha manejado es sorprendentemente baja, del orden del 0,2%, derivada del modelo de flujo con un coeficiente de almacenamiento de $2E-3$ (relativamente alto, aun considerando que el acuífero se comporta como libre en casi toda su extensión). Estos dos parámetros vienen forzados por el modelo geométrico del estudio DPA-IGME, 2009 (es decir, el de DPA-IGME 1989), con volumen de roca saturado del orden del 100% superior al obtenido en este estudio. En conclusión, reservas entre 30-40 hm³ y porosidades entre 0,2-0.5% parecen las más ajustadas a las características geométricas y petrofísicas del acuífero Mediodía.

7.4. Calidad del modelo y alternativas

La ausencia de datos geofísicos de calidad hace difícil evaluar realmente la calidad del modelo. Con los datos de geología superficial, estimando espesores homogéneos de Cretácico Superior y estructuras con menos buzamiento que la propuesta en trabajos anteriores, se ha construido un modelo geológico que presenta aspectos discrepantes del correspondiente al informe IGME, 1989.

El modelo geológico 3D derivado de este trabajo parte de unas estructuras geológicas laxas y donde predominan los cabalgamientos de bajo salto en el norte que producen una moderada profundización de la estructura hacia el límite sureste de acuífero (siendo las profundidades algo mayores en el modelo estructural obtenido con Gocad que en el obtenido con Geomodeller). Por el contrario, la estructura geológica interpretada en el informe del IGME, 1989 está basada en unos cortes geológicos con fallas muy verticalizadas generando bloques a modo de teclas de piano, lo que produce que la profundización del muro del acuífero sea mayor, en especial en la zona norte debido al ascenso del diapiro de Parcent, alcanzando los -950 m de profundidad. La diferencia entre ambas interpretaciones supone también hasta 400 m de discrepancia en el espesor de materiales acuíferos en áreas extensas del mismo.

Incertidumbres en el modelo:

- Incorrecta interpretación de edades en algunos de los sondeos. Cuando no se disponía de información de edades en el sondeo, se le otorgaron las mismas en función de los afloramientos geológicos e interpretación de estructura geológica en su proximidad: geometría sinforme/antiforme, fallas cercanas, etc. En la interpretación y para algunos ajustes, como el del modelo 3D de gOcad, se ha supuesto de manera implícita que algunos sondeos (El Sogre, Lucifer) terminaban prácticamente en el muro del Cretácico Superior.
- Cálculo de espesores sedimentarios erróneos. En este trabajo se ha considerado un espesor de Cretácico Superior en los cortes para 3D Geomodeller, entre unos 200 y 500 m, con un valor modal en torno a esta última cifra, al no disponer de información adicional que corrobore lo contrario.

7.5. Implicaciones hidrogeológicas del modelo geológico 3D

En este trabajo se presenta una metodología para la modelización geológica 3D y para la evaluación de las reservas hídricas en acuíferos profundos con una serie de

particularidades en lo que a la disponibilidad de información se refiere. El acuífero investigado corresponde a una tipología de acuífero en la que existe una buena exposición y afloramiento de las estructuras y no demasiados datos de subsuelo. El importante esfuerzo realizado en su estudio estructural (dirección y buzamiento de la estratificación, cartografía de contactos, medida de cinemática de fallas, secuencia temporal de las estructuras de plegamiento y las fallas, etc.), en la fotointerpretación y en el procesado e interpretación de las líneas sísmicas existentes han permitido ~~compensar~~ compensar la ausencia de datos procedentes de sondeos mecánicos profundos. En definitiva, se vislumbra que la metodología utilizada para la construcción del modelo 3D del acuífero de Mediodía será de gran interés para su aplicabilidad en numerosos acuíferos carbonatados profundos de la Cordillera Bética.

El resultado de la modelización geológica 3D del acuífero ha sido satisfactorio. Se han modelizado un total de 5 unidades geológicas de la región y 6 fallas principales, lo que ha supuesto un gran avance en el conocimiento previo del acuífero. La geometría 3D obtenida se caracteriza principalmente por un monoclinal sencillo limitado por cabalgamientos al este-norte, y por una culminación anticlinal frente a la unidad tectónica Almudaina-Segaria hacia el oeste.

Las reservas totales de agua subterránea que resultan están comprendidas entre 33 y 273 hm³. Se debe tener en cuenta que estas no son las reservas recuperables, es decir, para determinar el volumen de agua que se puede extraer de un determinado acuífero es necesario recurrir a la modelización y simulación del flujo subterráneo en distintos escenarios. No obstante, un buen modelo de flujo debe estar construido sobre un buen modelo geológico. En este sentido, se debe indicar que el punto débil de la mayoría modelos de flujo subterráneo es el de su geometría. Construido el modelo geológico 3D del acuífero de Mediodía, es posible exportar las superficies de referencia de techo/muro de las unidades geológicas del mismo a modelos de flujo y transporte de agua subterránea. Asimismo, la explotación del modelo geológico 3D del acuífero permitirá que los técnicos de la DPA puedan hacer diseños más eficientes y productivos de sondeos de explotación y/o de investigación de aguas subterráneas.

Por último, se quiere poner de manifiesto que los acuíferos son estructuras tridimensionales que no pueden ser caracterizadas con en necesario detalle con los mapas y cortes hidrogeológicos 2D tradicionales. La integración en los modelos 3D de los datos procedentes de los sondeos, de información geofísica, cartografía geológica e investigación petrofísica es absolutamente esencial para seguir avanzando en el conocimiento hidrogeológico de los acuíferos profundos.

AGRADECIMIENTOS

La becaria en prácticas del IGME Dña. Ángela Jiménez Sanz colaboró en la preparación y edición de este informe durante e 2º trimestre de 2012.

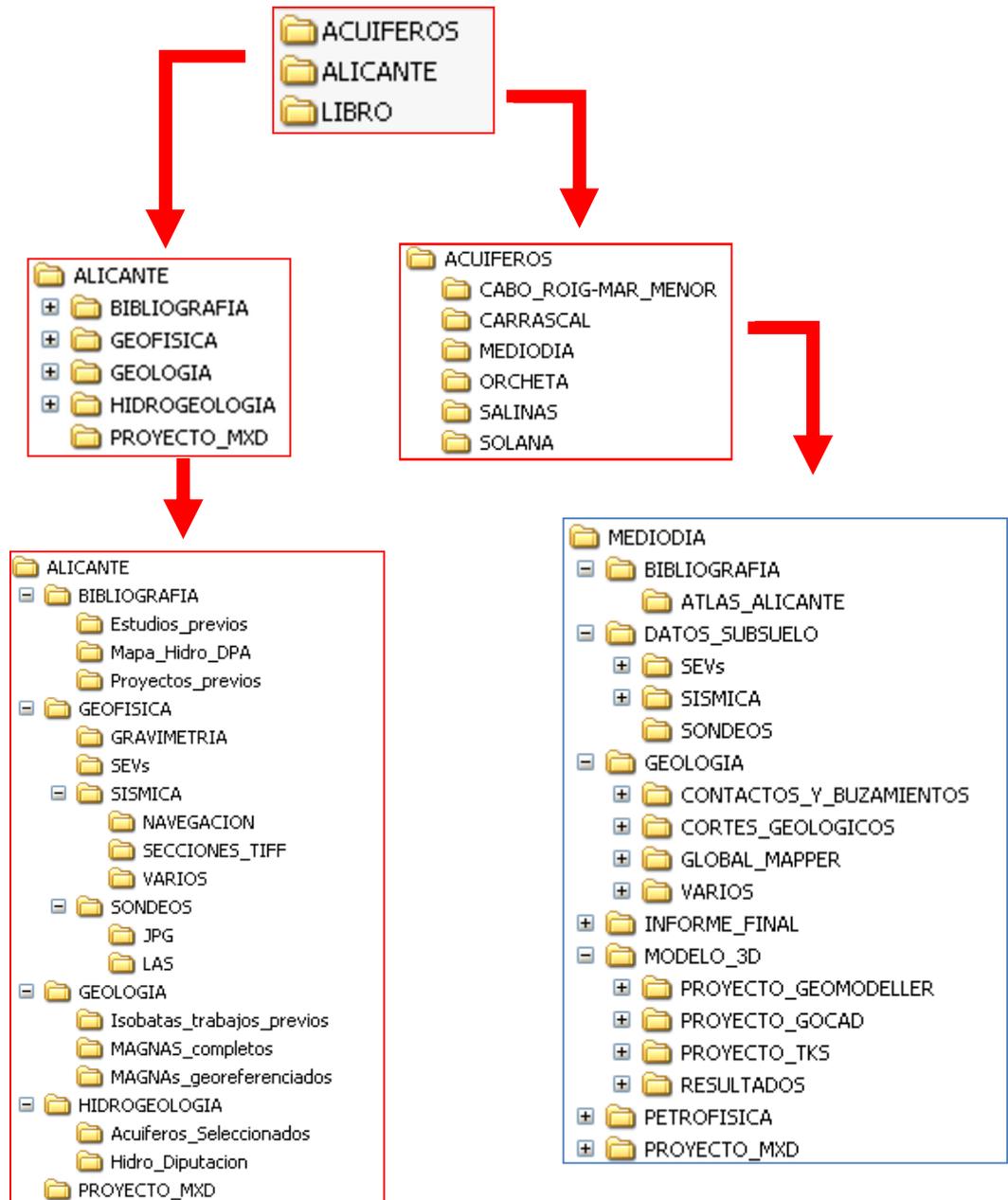
8 REFERENCIAS

- Ahr, W.M. 2008. Geology of carbonate reservoirs: the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks Editorial, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 277 pp.
- DPA. 2010. Mapa hidrogeológico de la Provincia de Alicante. 1ª Edición. Escala 1/150.000. Diputación Provincial de Alicante, Alicante, 40 pp.
- DPA-IGME. 1989. Estudio Hidrogeológico de la subunidad Mediodía (Alicante). Informe nº 31933. 210 pp. http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/Sid.htm
- DPA-IGME. 2009. Ballesteros Navarro, B.J., Rodríguez Hernández, L., Fernández Mejuto, M., Domínguez Sánchez, J.A., Marín Carrillo, I., Padilla Benítez, A., Castillo Pérez, E. Determinación de las reservas útiles de los acuíferos Pinar de Camús, Mediodía, Orba y Beniarbeig. 223 pp.
- DPA-IGME, in prep., 2013. Atlas hidrogeológico de la Provincia de Alicante.
- García Lobón, J.L., Reguera García, M.I., Martín León, J., Rey Moral, C., Berrezueta Alvarado, E.R., Pérez Ortiz, I. 2011. Resumen Ejecutivo del Plan de Selección y Caracterización de áreas y estructuras favorables para el Almacenamiento Geológico de CO₂ en España+ Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64055). Madrid. http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/Sid.htm
- Gill, B., Cherry, D., Adelana, M., Cheng, X., Reid, M. 2011. Using three-dimensional geological mapping methods to inform sustainable groundwater development in a volcanic landscape, Victoria, Australia Hydrogeology Journal, 19: 1349-1365.
- IGME. 2008. Mapa geológico de España 822 (Benisa), escala 1:50.000. http://intranet.igme.es/intranet/infor_geocientifica/Ingeoes/cartografia/magna50.asp?hoja=822&bis=
- Lajaunie Ch., Courrioux G., Manuel L. 1997. Foliation fields and 3d cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. Mathematical Geology, 29, 571-584.
- Lucia, F.J. 1995. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. Am Assoc Petrol Geol Bull 79: 1275. 1300.
- Robins, N.S., Rutter, H.K., Dumpleton, S., Peach, D.W. 2004. The role of 3D visualizations as an analytical tool preparatory to numerical modeling. Journal of Hydrology, 301: 287-295.
- Ross, M., Parent, M., Lefebvre, R. 2005. 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. Hydrogeology Journal, 13: 690-707.
- Wu, Q., Xu, H., Zhon, W. 2008. Development of a 3D GIS and its applications to karst areas Environmental Geology, 54: 1037-1045.

ANEXOS

ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL

1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL



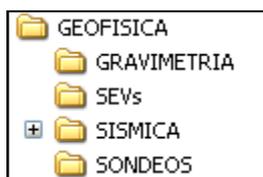
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE

La carpeta **ALICANTE** contiene información general, geológica, geofísica e hidrogeológica, recopilada o generada, así como memorias e informes recopilados y los proyectos MXD generados (mapas).



GEOFISICA

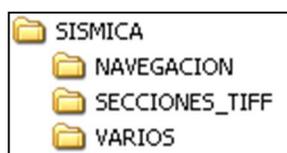
La carpeta GEOFISICA contiene las carpetas: **SEVs, GRAVIMETRIA, SISMICA Y SONDEOS**, con la información geofísica regional recopilada para el proyecto y que se ha utilizado en la modelización.



 **SEVs:** Información de los SEVs (sondeos eléctricos verticales) que se localizan en la provincia de Alicante. Contiene los archivos de texto en bruto, los modelos (según hojas MAGNA) y diversos PDF y Shapes con su posición.

 **GRAVIMETRIA:** Archivos de texto con los puntos de gravimetría de la provincia de Alicante.

 **SISMICA:** Contiene las secciones y la navegación de la sísmica presente en la provincia de Alicante recopilada. La información se agrupa en las siguientes carpetas:



 **NAVEGACION.** Esta carpeta contiene la navegación en Shape y .SIS de las líneas sísmicas, descargadas por campañas desde la aplicación SIGECO.

 **SECCIONES_TIFF.** Esta carpeta contiene las imágenes escaneadas en formato TIFF de las secciones sísmicas disponibles en SIGECO para la provincia de Alicante, así como otras secciones.

 **VARIOS.** Información diversa de archivos relacionados con la prospección sísmica: Un archivo Excel con análisis de reflectores y Tiempos Dobles e información de líneas sísmicas de la aplicación SIGEOF del IGME.

 **SONDEOS:** En esta carpeta se encuentran archivos (.las, .jpg) de sondeos profundos presentes en la provincia de Alicante descargados de la aplicación SIGECO.

GEOLOGIA

Esta carpeta contiene la información geológica recopilada para el proyecto.

 **MAGNAs_georeferenciados:** Archivos JPG georeferenciados de los mapas MAGNA 1:50.000 que engloban la provincia de Alicante (.jpg, .jgw, .aux).

 **MAGNAs_completos:** Archivos JPG de los mapas MAGNAs editados con columnas y cortes que engloban la provincia de Alicante. También incluye las memorias de los mapas MAGNA en PDF.

 **Isobatas_trabajos_previos:** Contiene los archivos de vectorización de isobatas de áreas de Alicante de trabajos previos al proyecto HIDROPROAL.

HIDROGEOLOGIA

Esta carpeta contiene la información hidrogeológica recopilada para el proyecto.

 **Hidro_Diputacion:** Mapa y Shapes proporcionados por la Diputación de Alicante. Incluye un TXT donde se explica qué es cada archivo y qué contiene cada carpeta.

 **Acuíferos_seleccionados:** Contiene la capa de acuíferos preseleccionados para trabajar en formato Shape.

BIBLIOGRAFIA

Esta carpeta contiene memorias e informes recopilados para el proyecto.

 **Mapa_Hidro_DPA:** Memoria por capítulos del mapa hidrogeológico de la diputación de Alicante en formato PDF.

 **Proyectos_previos:** Memoria del Proyecto Murcia 2008, realizada por Gessal y diversos estudios realizados por ENAGAS en la provincia de Alicante y limítrofes. Selección de documentos en formato PDF provenientes del Plan del CO₂ llevado a cabo por el IGME (plan ALGECO2) y diversos documentos PDF de otros proyectos.

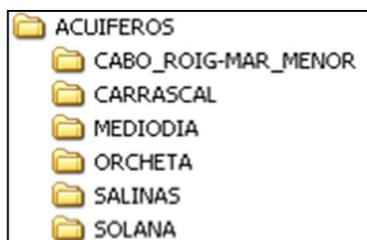
 **Estudios_previos:** En ella se encuentran documentos PDF sobre los diversos acuíferos descritos en la provincia de Alicante. Además hay un archivo .doc que resume las zonas que comprenden dichos estudios y las figuras que hay en cada uno de los informes.

PROYECTO_MXD

Proyecto MXD regional generado durante el proyecto, junto con sus archivos (.shp, .jpg, etc.). El proyecto contiene el mapa hidrogeológico de la provincia de Alicante, las hojas MAGNA, las líneas sísmicas de la provincia, los sondeos, cortes geológicos, columnas, etc.

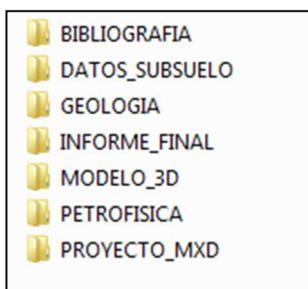
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO MEDIODIA

La información digital del acuífero MEDIODIA se encuentra dentro del directorio ACUIFEROS.



Esta carpeta contiene la información de la zona de trabajo, tanto la previa, como la generada durante el proyecto.

(Nota: Todos los acuíferos tienen la misma estructura de directorios y se repite el nombre de las carpetas que cuelgan de la carpeta del acuífero estudiado. En algunos acuíferos no existe información sobre determinadas materias, por ejemplo la petrofísica, por lo que esa carpeta no existe en ese acuífero en concreto).



BIBLIOGRAFIA

Informes recopilados sobre el acuífero Mediodia en estudio.

GEOLOGIA

En esta carpeta se incluyen los cortes geológicos, los archivos de buzamientos previos o procesados, los contactos geológicos incluidos en el modelo, ortofotos, etc.

 **CORTES_GEOLOGICOS** Cortes empleados en la modelización en diferentes formatos (JPG, PDF y .cdr).

 **CONTACTOS_Y_BUZAMIENTOS** Contactos y buzamientos introducidos en el modelo 3D (.data, .dbf y .xls).

 **GLOBAL_MAPPER** Contiene el proyecto en Global Mapper del acuífero Mediodía También existen archivos como ortofotos, diversos shapes generados durante el estudio de la geología, etc.

 **VARIOS** En esta carpeta aparece información de las Hojas MAGNAs 821 y 822 en diferentes formatos

PROYECTO_MXD

Proyectos MXD generados durante el estudio, junto con sus archivos (MDT, cortes, isobatas, sondeos, geofísica, etc.). Todos los archivos del proyecto MXD cuelgan de esta carpeta para facilitar la copia de la información a otros ordenadores.

DATOS_SUBSUELO

Esta carpeta contiene toda la información geofísica analizada, procesada e interpretada en el acuífero Mediodía. Contiene a su vez las siguientes carpetas:

SISMICA

 **NAVEGACION** Shape y Excel con la navegación de la línea RV-71-V.

 **PERFILES_IMAGENES** Imágenes de las secciones sísmicas de la línea RV-71-V.

 **SEVs** Shape con posición de SEVs.

 **SONDEOS** Información sobre los sondeos de la zona (Shape, hojas Excel, PDF, TIF, etc.).

PETROFISICA

Contiene archivos Excel, JPG y PDF de la curva de reservas.

MODELO_3D

 **PROYECTO_GEOMODELLER** Proyecto del modelo 3D en GeoModeller del acuífero Mediodía.

 **PROYECTO_GOCAD** Proyecto del modelo 3D en Gocad del acuífero Mediodía.

 **PROYECTO_TKS** Proyecto Kingdom Suite del acuífero Mediodía.

 **RESULTADOS** El modelo 3D se puede abrir directamente desde Geomodeller. Sin embargo, el modelo 3D no se puede examinar si no se dispone del software específico. Existen unos productos derivados del modelo como los cortes geológicos del mismo, mapas de isobatas, mallas xyz que se pueden exportar a archivos de formato estándar como DXF, JPG, PDF, ASCII, etc., para poder examinarlos o importarlos a otros programas de mayor difusión.

 **MAPAS_ISOBATAS** Mapa de isobatas de la superficie modelada en formato JPG. Las isobatas en formato digital se encuentran en el archivo ***Profundidad_Base_cretac_superior.txt*** (xyz) de este directorio, y en el directorio ***PROYECTO_MXD*** en ArcGis.

 **CORTES** Cortes geológicos calculados del modelo 3D (3D Geomodeller) en formato JPG y CorelDraw. Los cortes digitales se encuentran en el modelo 3D (3D Geomodeller o/y gOcad). Hay un proyecto MXD con cortes geológicos en el directorio ***PROYECTO_MXD*** dentro de la carpeta ***Mediodia3***.

 **INFORME_FINAL**

Informe final del modelo 3D del acuífero Mediodía.

4. LISTADO DE FICHEROS

El listado de los archivos entregados se encuentra en el Excel *Listado_archivos_MEDIODIA.xlsx* dentro del directorio INFORME_FINAL.