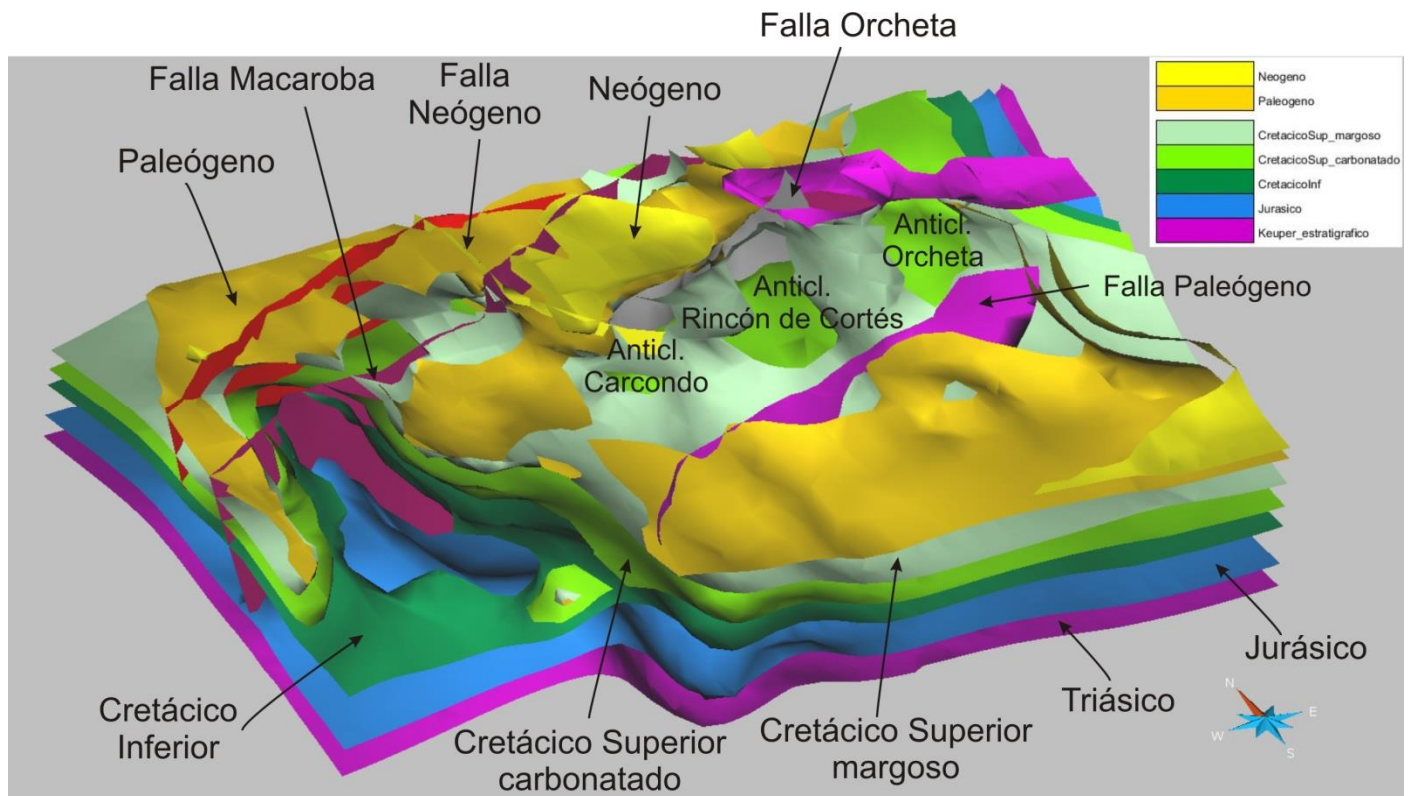


DESARROLLOS METODOLÓGICOS EN GEOLOGÍA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS PROFUNDOS DE LA PROVINCIA DE ALICANTE (HIDROPROAL)

MODELO GEOLÓGICO 3D DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LOS ANTICLINALES DE ORCHETA (Hoja 847, Villajoyosa; Alicante)



Diciembre, 2013

José Luis García Lobón
María Isabel Reguera García
Carmen Rey Moral
Israel Pérez Ortiz
Juliana Martín León

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	Justificación del estudio y antecedentes	7
1.2	Localización	8
1.3	Objetivos	9
2	METODOLOGIA DE LA MODELIZACION EN 3D. SOFTWARE UTILIZADO	11
3	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.....	15
3.1	Estratigrafía	15
3.2	Estructura Geológica.....	18
3.3	Cortes Geológicos	19
3.4	Hidrogeología	22
4	SONDEOS MECÁNICOS Y DATOS GEOFÍSICOS	29
5	CONSTRUCCIÓN Y CALIDAD DEL MODELO 3D.....	35
6	PETROFÍSICA. ACTUALIZACIÓN DE RESERVAS HIDROGEOLÓGICAS.....	41
6.1	Sistema Poroso	41
6.2	Capacidad Total de Almacenamiento. Curvas de Reservas	41
7	CONCLUSIONES	47
8	REFERENCIAS.....	49
	ANEXO I. INTERPRETACIÓN SÍSMICA	53
	ANEXO II. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL	61
1.	ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL.....	61
2.	ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE	62
3.	ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO ORCHETA	64
4.	LISTADO DE FICHEROS	65

Figura 19A. Esquema geológico según corte VIII (ver figura 7) donde se ha marcado el nivel carbonatado (Cenomaniense-Turonense) que se considera acuífero (modelo geológico considerando el Paleógeno y Cretácico Inferior más delgado). También se diferencian los sectores y sus direcciones de flujo. 42

Figura 19B. Esquema geológico según corte VIII (ver figura 7) donde se ha marcado el nivel carbonatado (Cenomaniense-Turonense) que se considera acuífero (modelo geológico considerando el Paleógeno y Cretácico Inferior más grueso). También se diferencian los sectores y sus direcciones de flujo. 42

Figura 20. Curvas de reservas totales del Acuífero Orcheta obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero. Se distinguen los sectores Pequerina, Amadorio y Benienzo. 44

ÍNDICE TABLAS

Tabla I. Resumen de datos utilizados durante el proceso de modelización 3D del acuífero de Orcheta. Cortes, líneas sísmicas y sondeos se posicionan en las figuras 4 y 5. 13

Tabla IIA. Espesores obtenidos en el modelo geológico 3D del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orxeta. 20

Tabla IIB. Espesores obtenidos en el modelo geológico 3D del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orxeta con Cretácico Inferior y Paleógeno más gruesos. Nótese como el espesor medio de Cretácico Inferior es solo 100 m superior al modelo anterior (Tabla IIA), debido que es un valor medio de todo el modelo (con un total de 280 km²). Localmente, en la zona de los anticlinales, el espesor medio del Cretácico Inferior puede alcanzar los 800 m. 21

Tabla III. Líneas sísmicas detalladas. Información descargable de SIGECO (Sistema de información geofísico del IGME, en línea). 31

Tabla IV. Tiempo-Profundidad Horizontes Sísmicos en Sondeo Macaroba 1ª interpretación (Izq.) y 2ª interpretación (Abajo). 33

Tabla V. Comparación en Lámina de Macaroba entre profundidades perfiles sísmicos. 33

Tabla VI. Resumen de reservas del acuífero Orcheta. Reservas dadas por el modelo 3D del acuífero para porosidades del 0.5% en los sectores Pequerina, Amadorio y Benienzo. 44

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 en 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 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 la metodología para la evaluación de reservas y los resultados de su aplicación en el

Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orcheta. Desde el punto de vista metodológico, el acuífero investigado en este caso representa a diferentes acuíferos alicantinos en los que existe poca información geofísica y una buena información geológica, con buena exposición desde superficie.

1.2 Localización

El Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orcheta se encuentra situado la zona meridional de la comarca de La Marina Baja de la provincia de Alicante, en el extremo nororiental del Prebético Interno, estando constituido de oeste a este por los anticlinales de Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta (figura 1). De forma alargada, en sentido oeste-este, el acuífero se extiende principalmente por los municipios de Relleu, Orxeta Villajoyosa, Finestrat y Benidorm, ocupando 39 km², de los que 16 corresponden a afloramientos permeables formados por calizas del Turoniense y los niveles calcáreos menos arcillosos de la base del Senoniense. Se trata de una estructura de dirección principal E-O cuya cota topográfica varía entre 600 m de altura en los ejes de los anticlinales (de dirección N-S) y unos 250 m en los valles intermedios, entre los que destaca el ocupado por el embalse de Amadoiro.

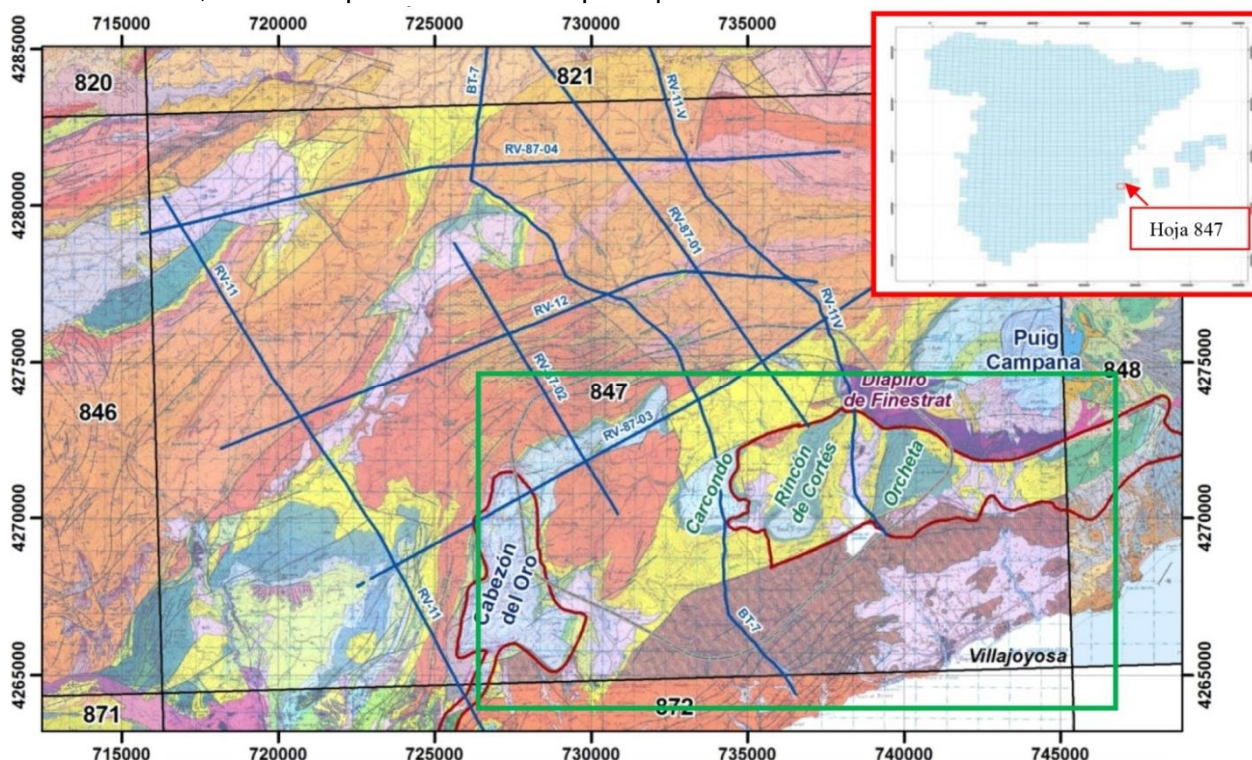


Figura 1. Situación del acuífero de los Anticlinales de Orcheta (Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta), sobre cartografía MAGNA del área (hojas 821, Alcoy; 822, Benisa; 847, Villajoyosa; 848, Benidorm; 872, Alicante). En los núcleos aflora Cretácico Superior. El acuífero se ubica entre los afloramientos jurásicos de Cabezón de Oro, y Puig Campana. Se indican las líneas sísmicas (campana RV) disponibles para la caracterización del subsuelo. En rojo, límite de los acuíferos de Orcheta y Cabezón de Oro (DPA, 2010). La extensión modelada en 3D (rectángulo verde) es de casi 200 km².

Las poblaciones principales son Villajoyosa en la costa y Orcheta y Relleu en la zona central y norte del acuífero. El río Sella que atraviesa el acuífero en dirección N-S (al que se asocia el embalse de Amadoiro) y su afluente el arroyo Salado representan los principales cursos de escorrentía superficial. El nivel de recursos medios renovables

es más bien modesto (de unos 0,9 hm³/año, según DPA 2010), y no se dispone de datos de reservas, aunque su volumen se estima moderado.

Se ha incluido la modelación 3D del Sistema Acuífero de Orxeta en el Proyecto de Desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo para la caracterización de recursos hidrogeológicos profundos de Alicante porque:

- 1) Existe buena exposición de la geología superficial, lo que permite el ensayo de modelaciones geológicas con técnicas y software modernos disponibles en el IGME; y,
- 2) Se trata de un acuífero profundo con datos de subsuelo petroleros (ver capítulo 4, más abajo). Se dispone de cinco líneas sísmicas (RV-87-01, RV-87-02, RV-87-03, RV-11V y BT-7; ver figura 1) de calidad media-baja. No existen datos de gravimetría ni electromagnéticos.

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 de modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas hídricas de acuíferos profundos, y el segundo, en aplicar esta metodología en el Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orxeta.

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 georreferenciadas 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 METODOLOGIA DE LA MODELIZACION EN 3D. SOFTWARE UTILIZADO

Para alcanzar los objetivos de modelación geológica 3D 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-Cretácico Inferior y Cretácico Inferior-Jurásico).
3. 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 litoestratigráficas 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 (9 sondeos hidrogeológicos y cinco líneas sísmicas: RV-87-01, RV-87-02, RV-87-03, RV-11V y BT-7) disponibles en la región, ha permitido seleccionar y reconstruir 7 superficies en un modelo geológico 3D del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orqueta:

- Muro Neógeno
- Muro Paleógeno
- Muro Cretácico Superior margoso
- Muro Cretácico Superior
- Muro Cretácico Inferior
- Muro Jurásico
- Muro Triásico

Dentro del área estudiada, que corresponde al acuífero y su entorno existen 3 fallas/cabalgamientos principales a modelar con dirección NE-SO, nombrados de sur a norte como Paleógeno, Orqueta y Macaroba. Estos tres cabalgamientos estructuran el relieve principal de la zona, situándose el acuífero estudiado entre los cabalgamientos de Paleógeno al sur y Orqueta al norte (ver apartado 3.2, figura 5). Además se han tenido en cuenta varias fallas de dirección aproximada N-S que delimitan los afloramientos triásicos, paleógenos y neógenos del área.

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), más los datos de geofísica disponibles (sondeos, sísmica, etc.). La conversión tiempo-profundidad (figura 2B) de las líneas sísmicas aporta información 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 de medida de dirección y buzamiento de capas (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 unos cortes seriados 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.

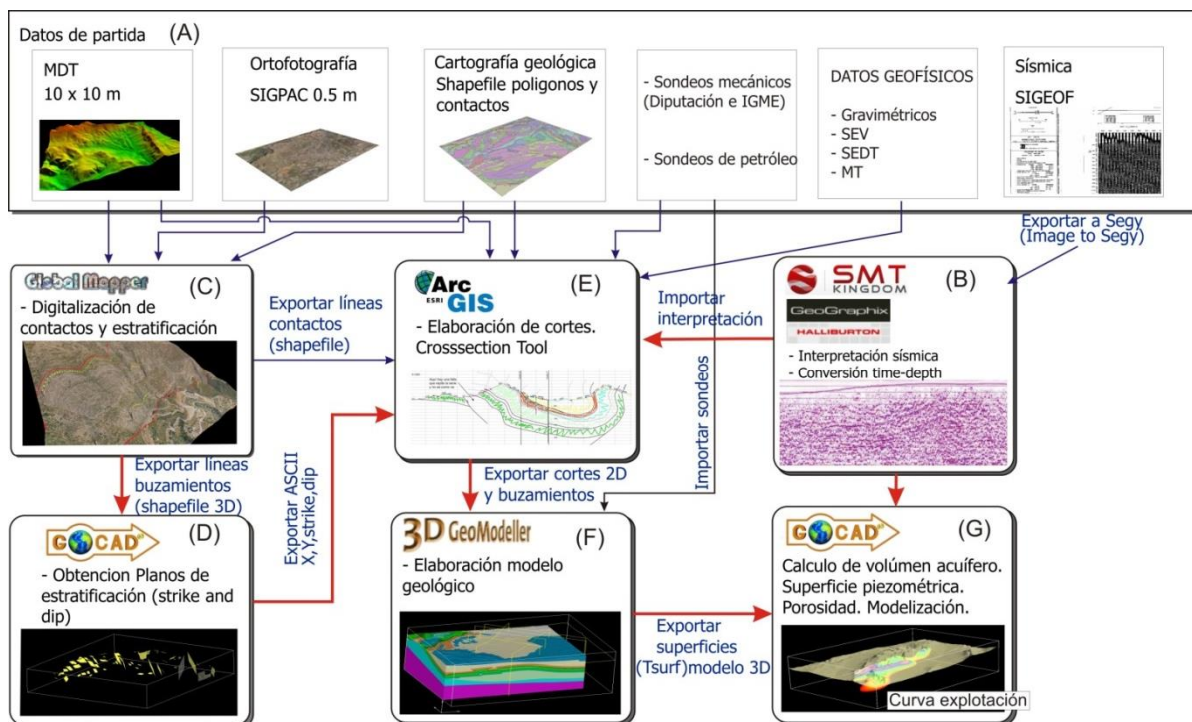


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada para la construcción del modelo geológico 3D del sistema acuífero de los Anticlinales de Orqueta. En cada uno de los pasos se detalla el software utilizado. Explicación en texto.

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.

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

Tipo de Datos		Descripción	Fuente
Superficie	Cartografía geológica	hoja 847 (Villajoyosa)	Cartografía MAGNA/Geode
	Datos estructurales	Medidas de dirección y buzamiento estratificación	Fotointerpretación y datos estructurales del MAGNA
Subsuelo	Cortes geológicos	10 cortes	9 elaboración propia. 1 procedente del MAGNA
	Sondeos	9 sondeos para modelo 3D	DPA
	Líneas sísmicas	RV-87-01, RV-87-02, RV-87-03, RV-11V y BT-7. 120 km de líneas a interpretar	Campaña RV (1984-85) y BT (1978)

Tabla I. Resumen de datos utilizados durante el proceso de modelización 3D del acuífero de Orcheta. Cortes, líneas sísmicas y sondeos se posicionan en las figuras 4 y 5.

3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLOGÍA

3.1 Estratigrafía

Geológicamente, el Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orcheta se ubica en el Prebético Interno o Prebético de Alicante. El Prebético Interno se caracteriza por un potente Cretácico (y Terciario) en facies de plataforma externa-talud y cuenca, donde regionalmente el Cretácico Superior es calcáreo-arcilloso, con permeabilidad intermedia (o baja), mientras que el Inferior es margoso-arcilloso. El Cretácico suele tener más de 1000 m de espesor en su conjunto (pe, columna sintética en figura 3). El Jurásico es mal conocido por la escasez de sus afloramientos. A pesar de esta falta de datos relativos al Jurásico, los afloramientos de su techo (Kimmeridgiense-Portlandiense en el Cabezón de Oro y en el probable olistolito del Puig Campana) advierten que este Jurásico superior contiene más de 200 m de espesor de carbonatos, que constituyen un acuífero intensamente explotado en los afloramientos citados.

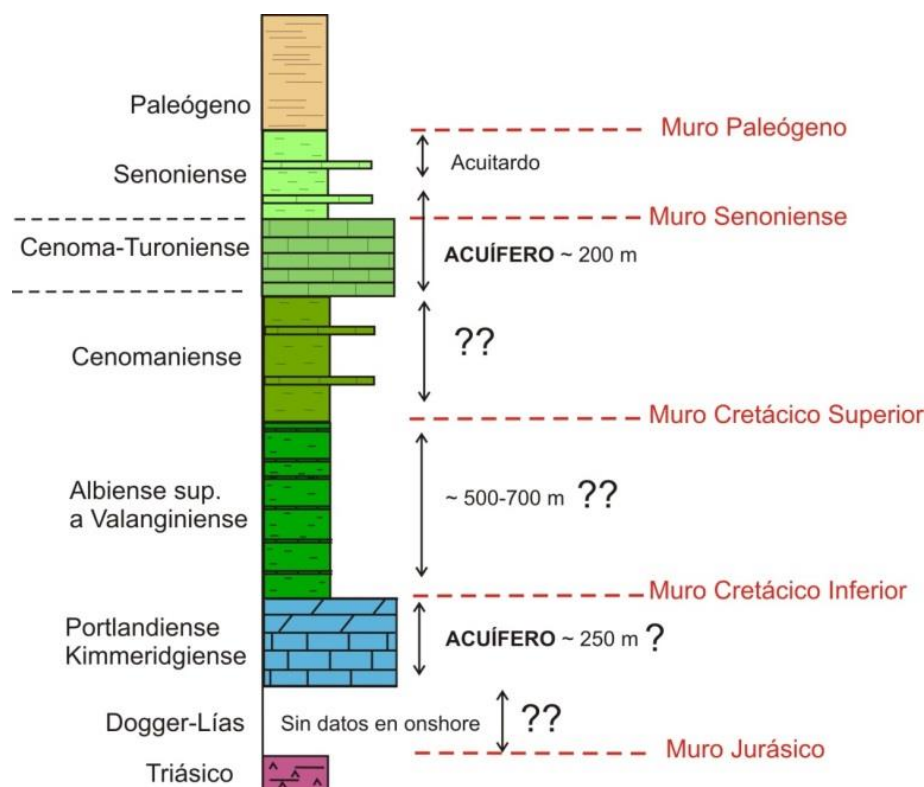


Figura 3. Columna estratigráfica sintética del área del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orcheta. Con línea roja discontinua se marcan los límites principales usados como superficies de referencia en la construcción del modelo 3D. Sin sondeos de control del Cretácico inferior y del techo del Jurásico, los espesores sedimentarios presentan gran incertidumbre.

La estratigrafía del área de trabajo es muy variada. Presenta grandes problemas, por diferentes factores geológicos que inciden de forma notable en su reconstrucción cronoestratigráfica, que se pueden resumir en:

- La gran similitud litológica y de facies entre materiales de diferente edad geológica.
- Las variaciones de facies y espesores en cortos espacios.

- La frecuente resedimentación de materiales y unidades más antiguas en cuencas más modernas.
- Una fuerte y compleja tectónica que da lugar a una estructura bastante caótica.
- A todo esto se añade la plasticidad que presenta los materiales del Triásico, que contribuyen de forma directa a acrecentar los procesos anteriormente expuestos. La edad de los materiales se sitúa entre el Triásico, en Facies Keuper, y el Mioceno Superior (figura 4). Los relieves son de edad mesozoica (Cretácico, principalmente), separados por depresiones más o menos estrechas y alargadas con dirección bética (NNE-SSO y E-O), donde afloran Paleógeno y Neógeno.

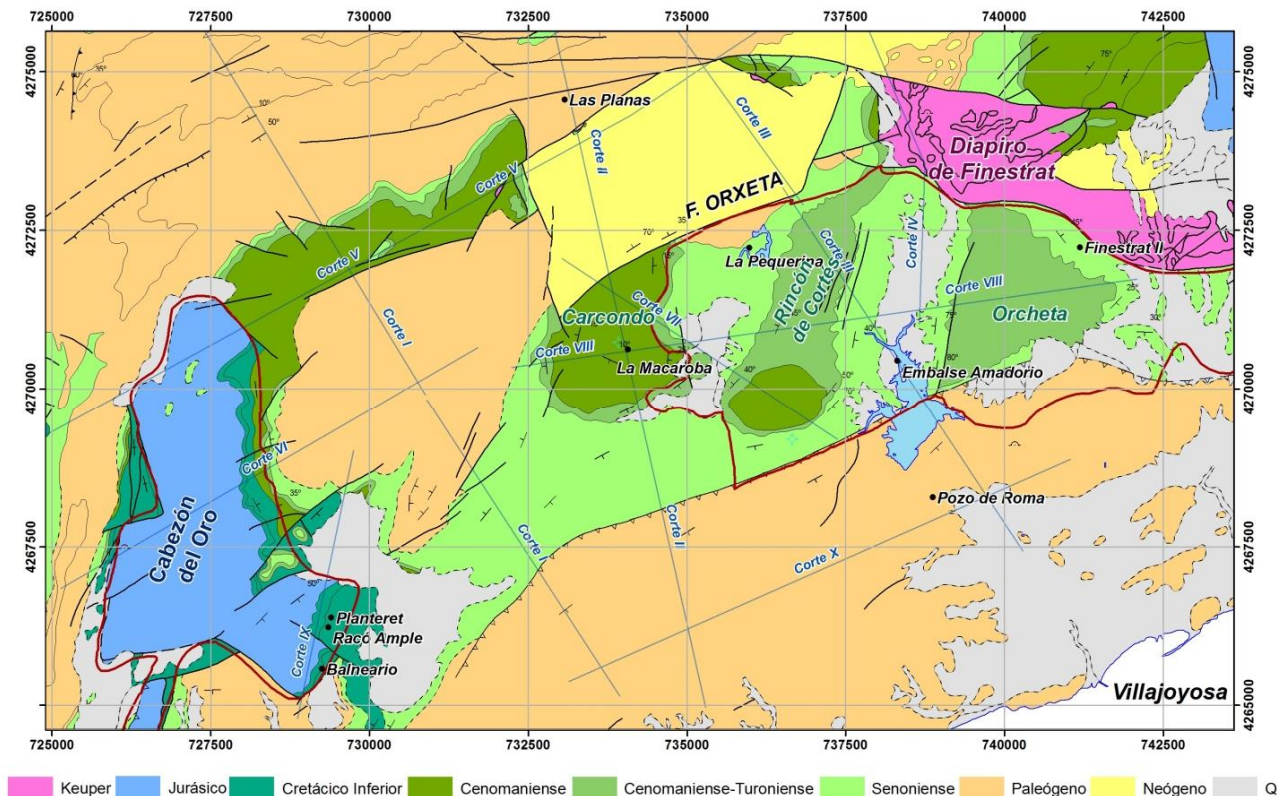


Figura 4. Síntesis geológica (GEODE) del Sistema Acuífero de los Anticlinales Cretácicos de Orcheta (Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta), entre los jurásicos de Cabezón de Oro y Puig Campana). En Carcondo y Rincón de Cortés aflora Cenomaniense, sobre el que descansan los niveles acuíferos del Turoniense. Se indican los 10 cortes modelados para obtener la estructura geológica 3D, así como los sondeos hidrogeológicos de apoyo (Macaroba, Pequerina, Amadorio, etc.).

En el aspecto estructural, la región se configura esencialmente como un apilamiento de pliegues y cabalgamientos con directriz bética y fuerte vergencia al NO. Además es importante tener en cuenta 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.

La serie estratigráfica, según la memoria de la hoja 847, se puede resumir en (figuras 3, 4):

Triásico (Keuper). Formado por 4 niveles identificables más varios de escasa potencia, inidentificables; sin fauna fósil, por lo que se describen según su cronología

relativa: Arcillas y yesos con niveles limoníticos; Arcillas y arcillitas rojas y pasadas verduzcas con morfología de erosión; Arcillas yesíferas versicolores con jacintos y cristales de cuarzo; acabando con bancos de yesos blanco-grisáceos-rosáceos de texturas variadas.

Jurásico. Aflora en los extremos oeste y este de la zona de estudio en los cerros del Cabezón de Oro y Puig Campana. Se trata de materiales del Jurásico Superior (no existiendo en la hoja afloramientos del Lías o Dogger) que ocupan núcleos de estructuras anticlinales muy fracturadas, constituidos por términos carbonatados (calizas y dolomías) y en algunas zonas por términos detríticos (arenas y areniscas).

Cretácico Inferior (Neocomiense-Barremiense). Se trata de materiales netamente marinos con múltiples variaciones de facies. Únicamente aflorantes en el Cabezón de Oro, con potencia de 35m en el flanco Oeste y escasos 3m en el Este.

Cretácico Inferior (Albiense-Aptiense). Alternancia de margas arenosas y calizas margosas, en disposición rítmica con presencia de glauconita casi constante en la textura del estrato. La potencia va desde 200 m en el flanco Oeste de la sierra de Cabezón del Oro (serie margosa) a 100 m en margas con calcarenitas y facies urgonianas en el este de la sierra.

Cretácico Superior (Cenomaniense-Turonense). Las posiciones bajas del Cenomaniense (acuitardo en figura 3) corresponden a margas con alternancia de dolomías margosas amarillentas y margas dolomíticas del mismo color. Los estratos más altos son calizas con radiolarios de 200 m de potencia en la zona norte y noreste. Muy diaclasadas y en ocasiones karstificadas, apareciendo estilolitos con frecuencia. En la zona sur de los anticlinales de *Carcondo* y *Rincón de Cortés* el espesor es de 30 m asociándose a ambiente sedimentario de plataforma externa de talud.

Cretácico Superior (Senoniense). Materiales margosos con pasadas de calizas (biomicritas).

Paleógeno- Mioceno- Cuaternario. El Paleoceno se encuentra generalmente en continuidad sedimentaria con el Cretácico Superior. El resto de la serie paleógena (Eoceno superior-Oligoceno), se dispone discordante sobre diferentes formaciones del Mesozoico y del Paleoceno. Las facies más representativas suelen ser de calizas y margas de plataforma, así como calizas arrecifales y pararrecifales, que cambian a facies de talud hacia latitudes más meridionales.

La serie Neógena plantea problemas estratigráficos y de distribución de facies debido a las discordancias internas y de la inestabilidad del fondo marino. La serie está constituida por calizas detríticas y microconglomerados. Lateralmente cambian a facies de calizas margosas y margas calcáreas, arenosas y a veces fétidas. La serie de techo está constituida por margas con pasadas detríticas como lentejones progresivos y discordantes.

El Cuaternario ocupa las zonas deprimidas y está constituido en su mayoría, por depósitos de origen continental (glacis, abanicos aluviales, conos de deyección, depósitos de ladera, costras y caliches, arcillas de decalcificación).

3.2 Estructura Geológica

La estructura presenta una dirección típicamente bética, SO-NE, que corresponde a la dirección de los principales cabalgamientos (Paleógeno, Orxeta y Macaroba, figura 5). A nivel local de la zona de estudio, la estructuración de Jurásico Superior y Cretácico puede ser aproximadamente interpretada a partir de la cartografía geológica Magna y de las líneas sísmicas disponibles en los siguientes términos (Figs. 5, 6):

-Presencia de un sistema de láminas SO-NE cabalgantes hacia el norte que correspondería a la inversión tectónica de viejas fallas de tipo lístrico y de origen diapírico; estas láminas comprenden anticlinales como los del Sistema Acuífero de Orxeta (Carcondo, Rincón de Cortés y Orxeta, figuras 5 y 6).

-El sistema previo de fallas extensivas se entiende aquí, como tantos otros casos del Prebético, relacionado con la actividad del diapiro de Finestrat. Existe muestra una relación geométrica casi directa entre su alargado y deformado afloramiento y las fallas que de él nacen y los actuales cabalgamientos hacia el norte.

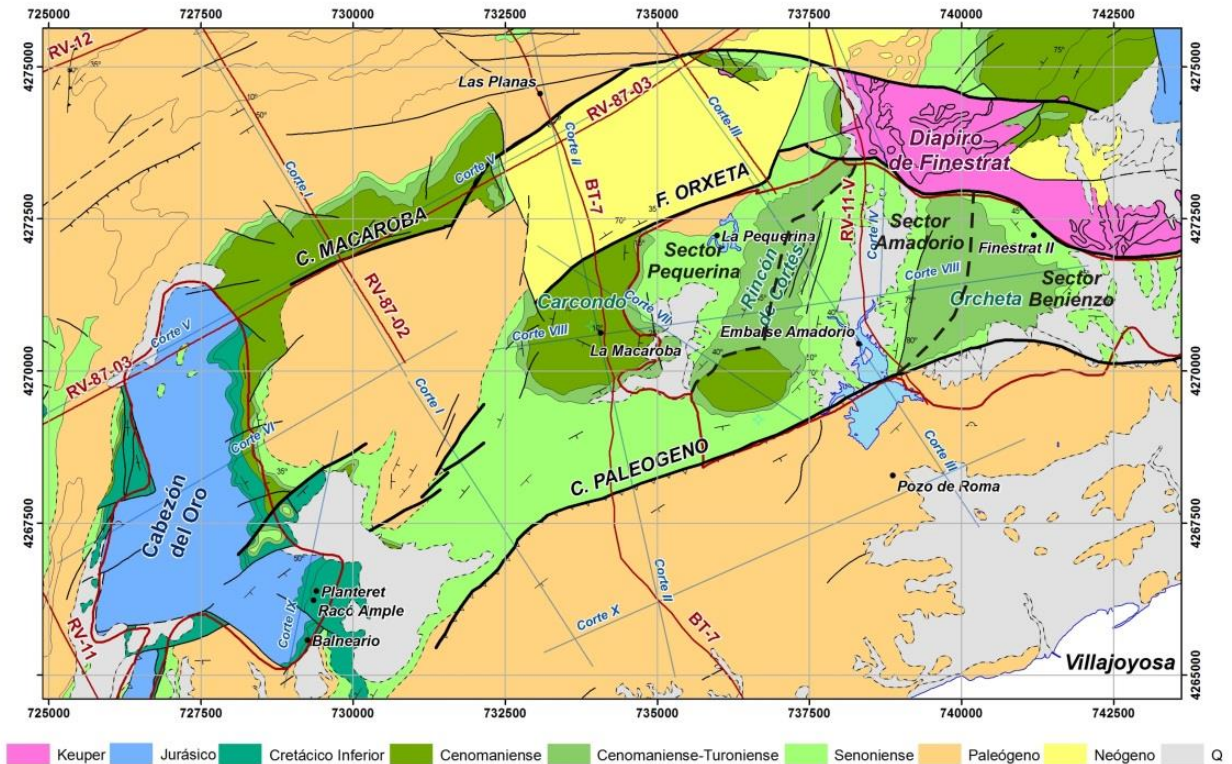


Figura 5. Esquema tectónico del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orxeta entre cabalgamientos Paleógeno y Orxeta. Se indican líneas sísmicas, cortes y sondeos hidrogeológicos.

-Probable desarmonía entre el Cretácico superior-Paleógeno aflorante y el Jurásico profundo, desarmonía provocada por la arcillosidad del Cretácico y los depocentros sedimentarios generados en los hanging wall sinclines de la fase extensiva.

Un sondeo con objetivo hidrogeológico al Jurásico Carbonatado, realizado por Rodes y Finagua en el núcleo anticlinal de Carcondo (La Macaroba, 840 m) y en la proximidad de la línea sísmica BT-7 (del que no se dispone columna), viene a demostrar que la interpretación del área sin el concurso de las líneas sísmicas no es nada evidente (figura 6). Sin sondeos de control del Cretácico Inferior y del techo del Jurásico, la interpretación está sometida a interrogantes que derivan de las velocidades sísmicas

que registran los análisis NMO, la ausencia de marcados contrastes de amplitud que proporcionen una información litológica fiable, y sobre todo, la falta de datos de los espesores sedimentarios, tanto del Cretácico Inferior como del Jurásico.

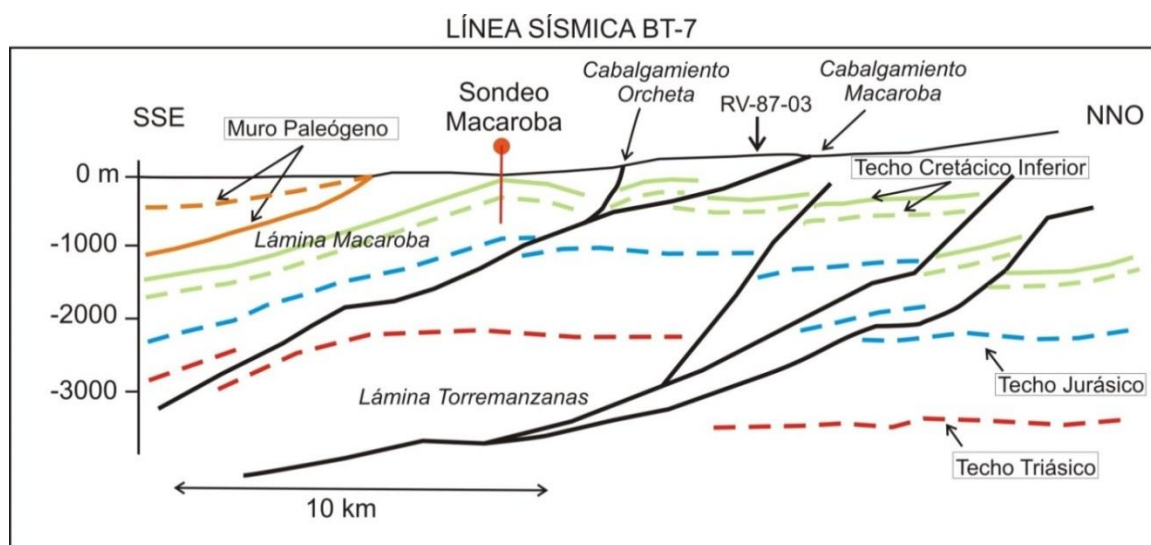


Figura 6. Corte tectónico esquemático según la línea sísmica BT-7, con dos interpretaciones posibles de los muros de Paleógeno y Cretácico Superior: a trazos, interpretación de Cretácico Inferior y Paleógeno más delgados, en la que el sondeo Macaroba cortaría el mismo espesor de C. Superior y C. inferior (unos 420 m); en línea continua, interpretación de Cretácico Inferior y Paleógeno más gruesos, donde Macaroba cortaría sólo unos 150 m de C. Superior. En la línea BT-7 (apartado 4, figura 15A) se observan cabalgamientos, pero la interpretación litoestratigráfica es controvertida (pe, figura 15B). La profundidad de Macaroba es de unos 840 m y se sabe que no alcanza las calizas del techo del Jurásico.

3.3 Cortes Geológicos

Se han interpretado nueve cortes geológicos para tratar de caracterizar en profundidad el Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orcheta, además de utilizar un corte de la hoja geológica MAGNA 847, Villajoyosa. En las figuras 4 y 5 se observa la localización de los cortes, para los que se ha utilizado toda la información de subsuelo disponible (9 sondeos y cinco líneas sísmicas). Estos cortes son el input básico al software de modelización 3D (3D Geomodeller), incorporando la información procedente del análisis cartográfico y estructural descritos en el apartado metodológico 2. Los espesores de capa se obtienen del trabajo de revisión cartográfica citado en 2, de datos de sondeos y de la interpretación de la sísmica (apartado 4), con las incertidumbres mencionadas en el apartado anterior (figura 3).

En los cortes se ha diferenciado (figura 7): Basamento, Triásico, Jurásico, Cretácico Inferior, Cretácico Superior (que incluye desde la base del Cenomaniense, margoso, acuitado, y Cenomaniense-Turonense, carbonatado, acuífero; se ha denominado así para separarlo del Senoniense), Cretácico Superior margoso (Senoniense), Paleógeno y Neógeno. Al carecer de datos de subsuelo fiables y continuos que certifiquen cambios importantes de espesor, se ha tratado de mantener espesores uniformes en los cortes iniciales (input del modelo; estos cortes son alterados durante el proceso de modelización matemática, hasta el output final de las figuras 7A y 7B). En el caso de

las formaciones acuíferas cretácicas sí se dispone de datos puntuales de subsuelo con algunos sondeos (ver figura 13) que han sido usados durante la modelización.

El espesor medio de Cretácico Inferior en el modelo 3D resultante es de 500 m, los mismos que en el Cretácico Superior carbonatado (Cenomaniense, Turoniense) y 400 m de Cretácico Superior margoso (tabla IIA).

	Espesor máximo (m)	Espesor mínimo (m)	Espesor medio (m)
Paleógeno	600	0	200
Cretácico Superior margoso (Senoniense)	1000	100	400
Cretácico Superior (Cenomaniense, Turoniense)	900	200	500
Cretácico Inferior	700	150	500
Jurásico	1200	600	850
Triásico	650	250	450

Tabla IIA. Espesores obtenidos en el modelo geológico 3D del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orxeta. Solución de Cretácico Inferior y Paleógeno más delgados.

Para el Triásico y Jurásico se ha obtenido un espesor medio de 450 m y 850 m respectivamente (conviene destacar que estos resultados son bastante especulativos). Además hay que tener en cuenta, en el caso del Cretácico Superior carbonatado (Cenomaniense, Turoniense) el espesor en el modelo resultante es bastante variable, como en el entorno de los anticlinales de Carcondo, Rincón de Cortés y Orxeta (es decir, en el área acuífera, ver figura 7A) donde se sitúa entre unos 200 m y 900 m. Estas variaciones, así como el importante espesor de Cretácico Superior medio obtenido, del orden de 900 m, provienen de la interpretación estratigráfica del sondeo Macaroba usada en este informe. En efecto, obsérvese que el modelo no diferencia en el Cretácico Superior %carbonatado+ la base margosa Cenomaniense dónde precisamente se implanta dicho sondeo (figura 5). En la interpretación/solución estratigráfica de la Tabla IIA, el sondeo Macaroba (840 m) corta el mismo espesor de Cretácico Superior (base margosa del Cenomaniense, figura 5), que de Cretácico Inferior. Esta interpretación se apoya en la:

- Compatibilidad con cartografía de superficie (sondeo ubicado en el centro del anticlinal de Carcondo, sobre los materiales más antiguos del mismo, de la base del Cenomaniense, según la síntesis Geode).
- Compatibilidad, asimismo, con una interpretación posible de la línea sísmica BT-7 que sitúa el límite Cretácico Superior-Cretácico Inferior a unos 400 m de profundidad (figura 7A) en la vertical del sondeo Macaroba (figura 6 y 15A).
- Compatibilidad de cortes en 3D y posibilidad de cálculo matemático del modelo en 3D Geomodeller.

Naturalmente, son posibles interpretaciones alternativas del sondeo Macaroba y de la línea sísmica BT-7, (figura 7B), donde se supone un Cretácico Inferior y Paleógeno %gruesos+. En efecto, en el apartado 4 más abajo se comparan dos escenarios, que afectan tanto al límite Cretácico Superior-Cretácico Inferior, como a los espesores de Paleógeno y Cretácico Inferior en el entorno del citado sondeo Macaroba, y que suponen variaciones de hasta unos 300-400 m para los límites Cretácico Superior-Paleógeno y Cretácico Superior-Cretácico Inferior. Si se tomara como correcta la interpretación de la figura 15B, que constituye una solución también compatible, el límite Cretácico Superior-Cretácico Inferior se situaría a unos 150 m de la superficie

(figura 7B, corte II y VIII), y se obtendría un espesor medio de Cretácico Inferior ligeramente superior al de Cretácico Superior (ver tabla IIB).

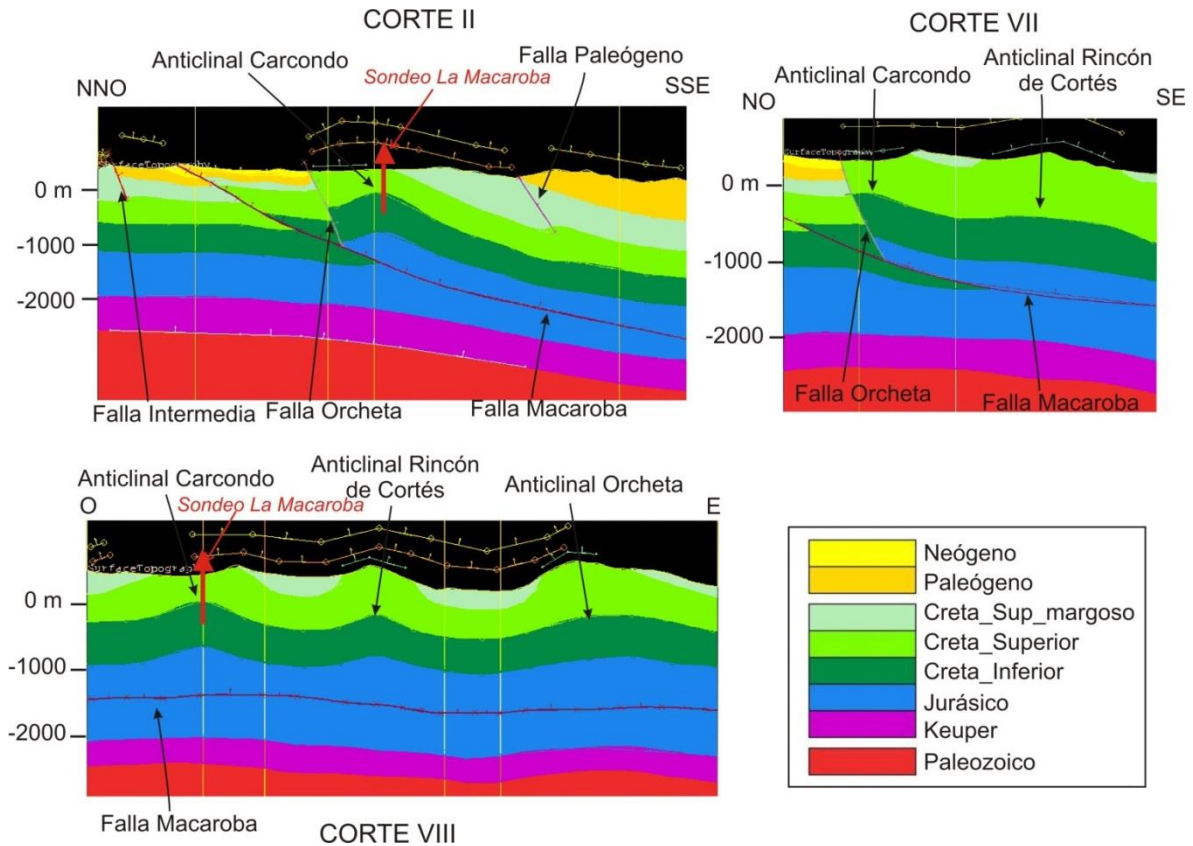


Figura 7A. Visualización de tres de los 10 cortes geológicos (ver situación en figuras 4 y 5) utilizados como secciones para la construcción del modelo en 3D Geomodeler. Se trata de cortes del modelo 3D ya calculado: el proceso de modelización contribuyó a la mejora de la propuesta inicial de los mismos a la hora de interpretar toda la estructura en profundidad. En rojo: sondeo Macaroba. Solución de Cretácico Inferior y Paleógeno más delgados.

	Espesor máximo (m)	Espesor mínimo (m)	Espesor medio (m)
Paleógeno	1000	0	400
Cre. Sup. Margoso (Senoniense)	1000	100	300
Cre. Sup. (Cenomaniense, Turoniense)	800	200	400
Cretácico Inferior	1000	100	600
Jurásico	1200	600	850
Triásico	650	250	450

Tabla IIB. Espesores obtenidos en el modelo geológico 3D del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orxeta con Cretácico Inferior y Paleógeno más gruesos. Nótese como el espesor medio de Cretácico Inferior es solo 100 m superior al modelo anterior (Tabla IIA), debido que es un valor medio de todo el modelo (con un total de 280 km²). Localmente, en la zona de los anticlinales, el espesor medio del Cretácico Inferior puede alcanzar los 800 m.

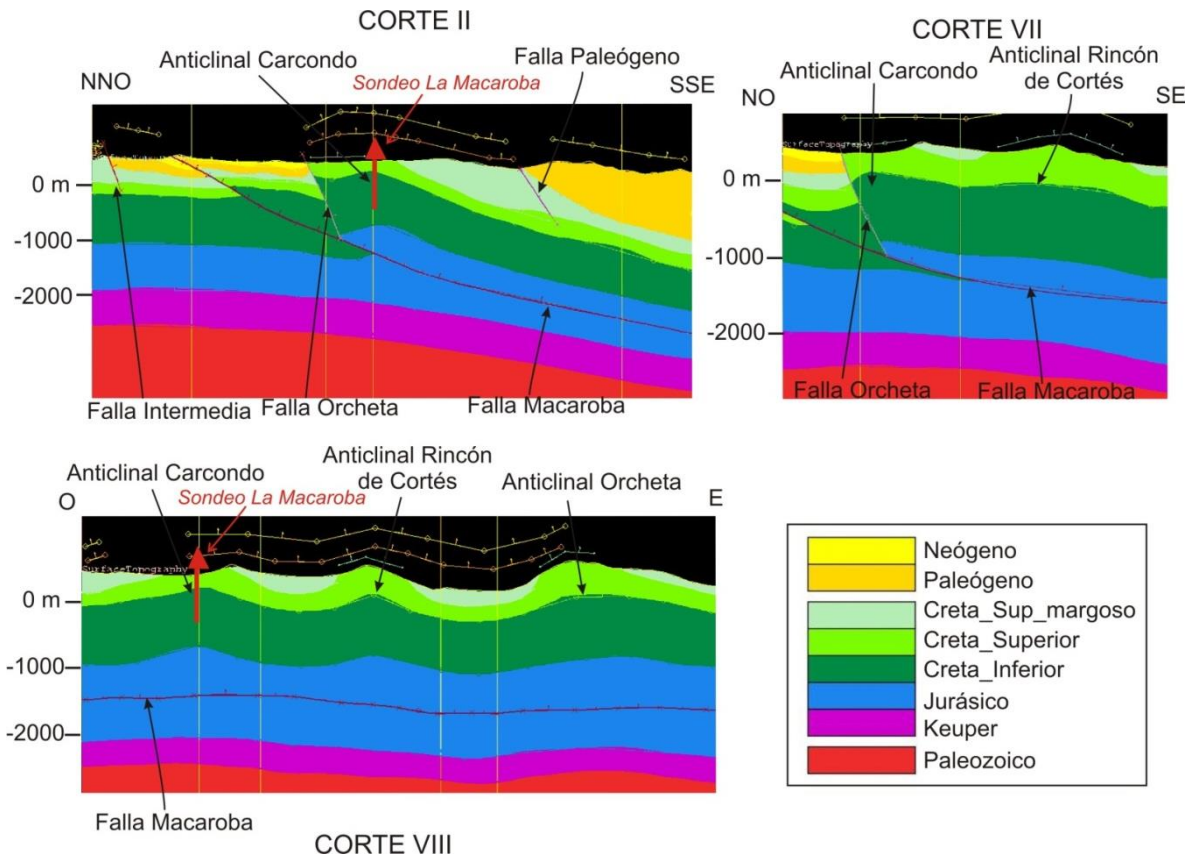


Figura 7B. Visualización de tres de los 10 cortes geológicos (ver situación en figuras 4 y 5) utilizados como secciones para la construcción del modelo en 3D Geomodeler. Se trata de cortes del modelo 3D ya calculado: el proceso de modelización contribuyó a la mejora de la propuesta inicial de los mismos a la hora de interpretar toda la estructura en profundidad. En rojo: sondeo Macaroba. Solución de Cretácico Inferior y Paleógeno más gruesos.

3.4 Hidrogeología

La siguiente descripción proviene de DPA-IGME, in prep., 2013. Atlas hidrogeológico de la Provincia de Alicante.

DOMINIO HIDROGEOLÓGICO Nº 16: ORXETA

Este dominio hidrogeológico se localiza al este de la provincia de Alicante. Limita por el norte con las estribaciones meridionales de sierra Aitana, Puig Campana, Serra Carbonera y sierras de La Real, de La Grana y La Aguilar, por el sureste con el mar Mediterráneo y por el oeste con el río Monnegre y las localidades de Tibi y Campello. Abarca la zona meridional de la comarca de La Marina Baja y la oriental de La Comarca de Alicante, donde se asientan poblaciones importantes como Benidorm, Altea, Villajoyosa, Jijona o Rellou.

En su conformación topográfica destacan los relieves de sierra Cortina (522 m.s.n.m.), sierra Helada (435 m.s.n.m.), sierra de Orxeta (680 m.s.n.m.) y, sobre todo el macizo de Cabezo de Or (1209 m.s.n.m.), que constituye la máxima elevación. La altitud desciende moderadamente desde el noroeste, donde se registran cotas de más de 1000 m.s.n.m., al sureste, donde se encuentra la zona litoral. En lo que a aguas superficiales se refiere destacan el embalse de Amadorio, ubicado en el sector central

del dominio, y los ríos Sella y Amadorio, además de numerosos barrancos de carácter estacional.

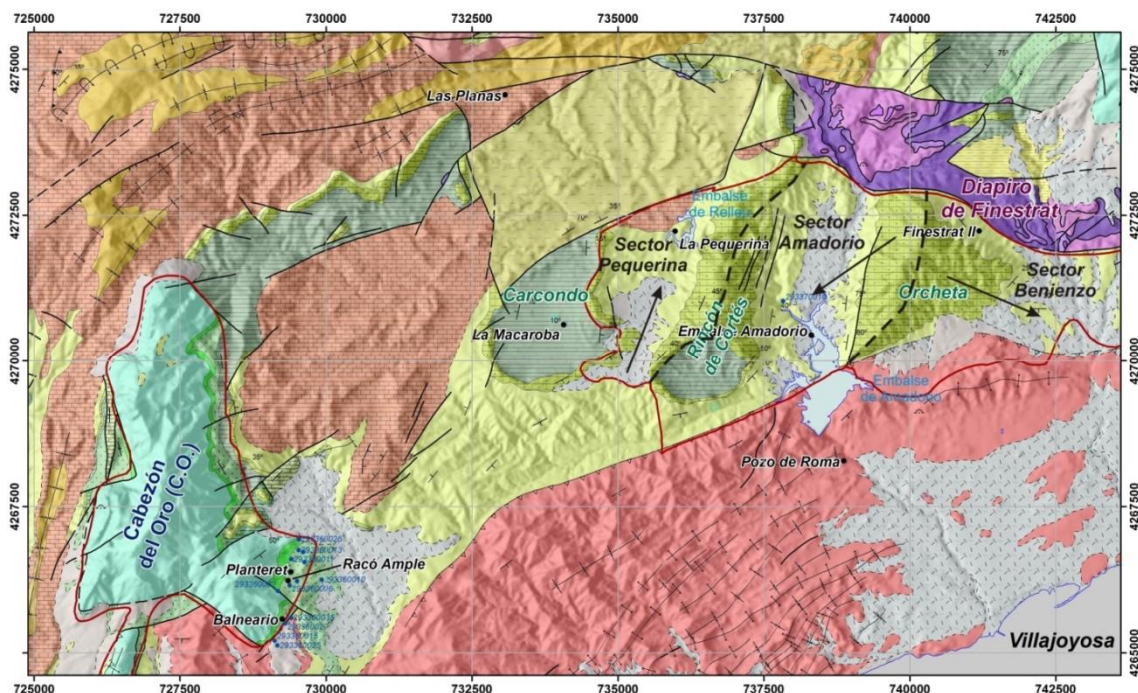


Figura 8. Acuífero de Orcheta (contorno rojo oriental; DPA, 2010). Se indican sondeos hidrogeológicos y sectores del acuífero de Orcheta: Pequerina, Amadorio y Benienzo (las flechas señalan dirección de flujo).

La clasificación de Rivas-Martínez asigna un clima Termomediterráneo semiárido en la zona costera que pasa a Mesomediterráneo hacia el interior. La precipitación oscila entre 500 a 350 mm/año, decreciente de oeste a este, con una evapotranspiración potencial mayor en la costa (850 mm/año) que en el interior (750 mm/año). En lo que a temperaturas se refiere, la media se sitúa en torno a 18°C, llegando a 12°C en las zonas altas de la sierra de Cabezón del Oro. La media de las mínimas del mes más frío oscila entre 2 a 6°C, mientras que la media de las máximas del mes más cálido se establece en 30°C.

Los acuíferos integrados dentro de este Dominio son: Cabezón del Oro, Orxeta, Carcondo y Sierra Helada, además de los Cuaternarios de Benidorm, de Villajoyosa, de San Juan Campello y de Altea (figura 8)

Acuífero Cabezón del Oro

Tiene forma alargada, con unos 9,2 km de longitud y una anchura media próxima 1,5 km (máximo de 3,5 km y mínimo de 0,3 km) y ocupa una extensión de 13,57 km² de los municipios Aigües, Alicante, Busot, Jijona y Relleu, de los que 10,27 km² corresponden a afloramientos permeables.

Está formado por más de 250 m de calizas grises jurásicas del Malm (8,86 km²) y por unos 55-80 m de calcarenitas del Neocomiense (1,41 km²). La base impermeable del acuífero corresponde a las arcillas y limolitas con bloques de dolomías y yesos del Triásico, mientras que el techo del mismo lo constituyen las margas y margocalizas grises con ammonites del Neocomiense-Aptiense. Su estructura es la de un pliegue anticlinal vergente al E, de dirección N20E, en cuyo núcleo se encuentran los afloramientos jurásicos. Los límites son cerrados y están definidos por formaciones impermeables del Cretácico y Terciario. El límite occidental coincide con el flanco verticalizado del pliegue que define la estructura del acuífero. El límite oriental se

encuentra afectado por una escama jurásica con la misma vergencia general. Hacia el norte ambos límites alcanzan una de las fallas del accidente de Finestrat, mientras que hacia el sur el pliegue está afectado por varias fallas transversales de importante salto vertical que ponen en contacto a las formaciones jurásicas con materiales margosos cretácicos. Hasta 1963 la descarga se producía por manantiales y pozos de pequeña profundidad. A partir de esa fecha se perforaron numerosos pozos para riego que llegaron a extraer hasta 10 hm³/año (1974-1977), provocando fuertes descensos de nivel, que se han estimado de forma global desde que se inició la explotación en 200-250 m.

La cota piezométrica es conocida a partir de varios puntos de control localizados en la mitad sur del acuífero, algunos con medidas desde el comienzo de los años setenta. Del análisis de sus series temporales se deduce una tendencia de descenso desde 1974 hasta 1986 (de unos 200 m.s.n.m. hasta 145 m.s.n.m., aunque algo amortiguada el último lustro) debido a la intensa explotación del acuífero. Al periodo anterior le sigue otro (1986-1993) durante el que se produce un ascenso de niveles (hasta los 160-165 m.s.n.m., algo más según la medición en otros pozos del acuífero) coincidente con el aumento de las precipitaciones. Por último, desde 1995 y hasta la fecha, se observa una tendencia de descensos, muy amortiguada en los últimos años como consecuencia del último periodo húmedo y del ajuste de las explotaciones a los recursos del acuífero.

La recarga del sistema se produce exclusivamente por la infiltración del agua y se evalúa en 1,0 hm³/año. La descarga tiene lugar por los bombeos realizados para cubrir las necesidades de abastecimiento de Busot, urbanizaciones y riego en La Alacantí (sondeos Salmitre: 2934-2-12 y 18) y de abastecimiento a Aigües (sondeos Planteret y Racó Amplé), cuya suma asciende a 1,0 hm³/año.

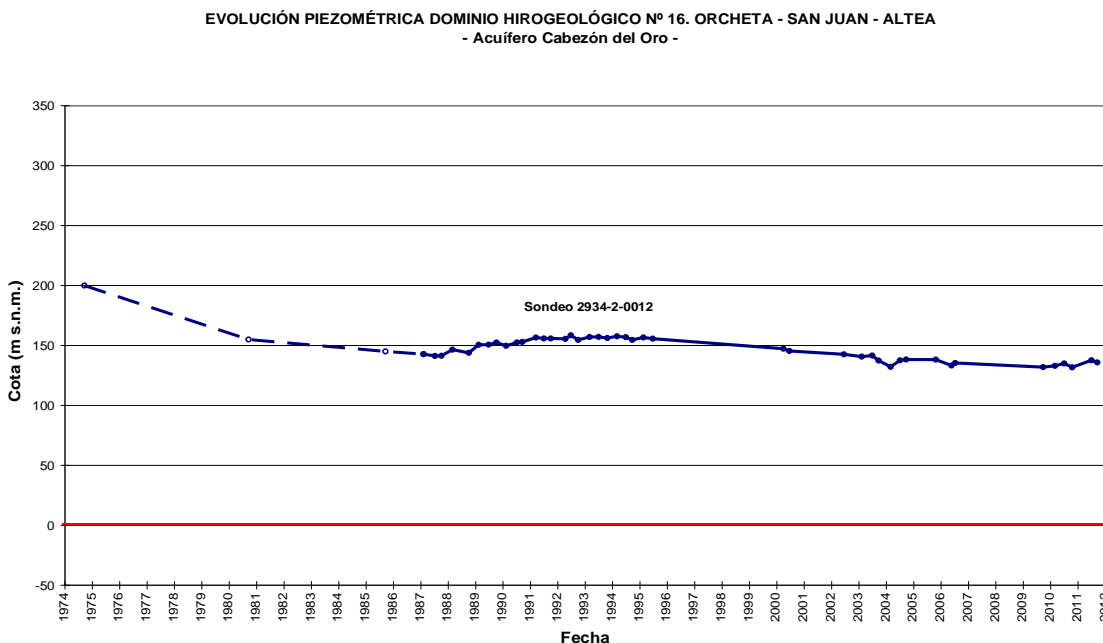


Figura 9. Evolución piezométrica. Dominio hidrogeológico Orxeta-San Juan-Altea. Acuífero C. de Oro.

Tal y como pone de manifiesto la temperatura del agua bombeada por las captaciones, así como los resultados isotópicos, debe existir una circulación profunda desde las áreas de recarga hasta los puntos de captación que da lugar a un cambio de las facies

hidroquímicas bicarbonatadas cálcicas a sulfatadas cálcicas por una posible disolución de yesos del Keuper localizados en profundidad.

Las aguas analizadas presentan facies sulfatadas cálcicas, manteniéndose su composición estable a lo largo del tiempo. Adquieren concentraciones elevadas de sulfatos, por encima de los 250 mg/L que establece el RD140/2003 como límite máximo para su uso como agua potable y una conductividad eléctrica entre los 1.500 y 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que el agua es tratada en una potabilizadora antes de su utilización en Aigües. La vulnerabilidad del acuífero según el Método Drastic es media alta.

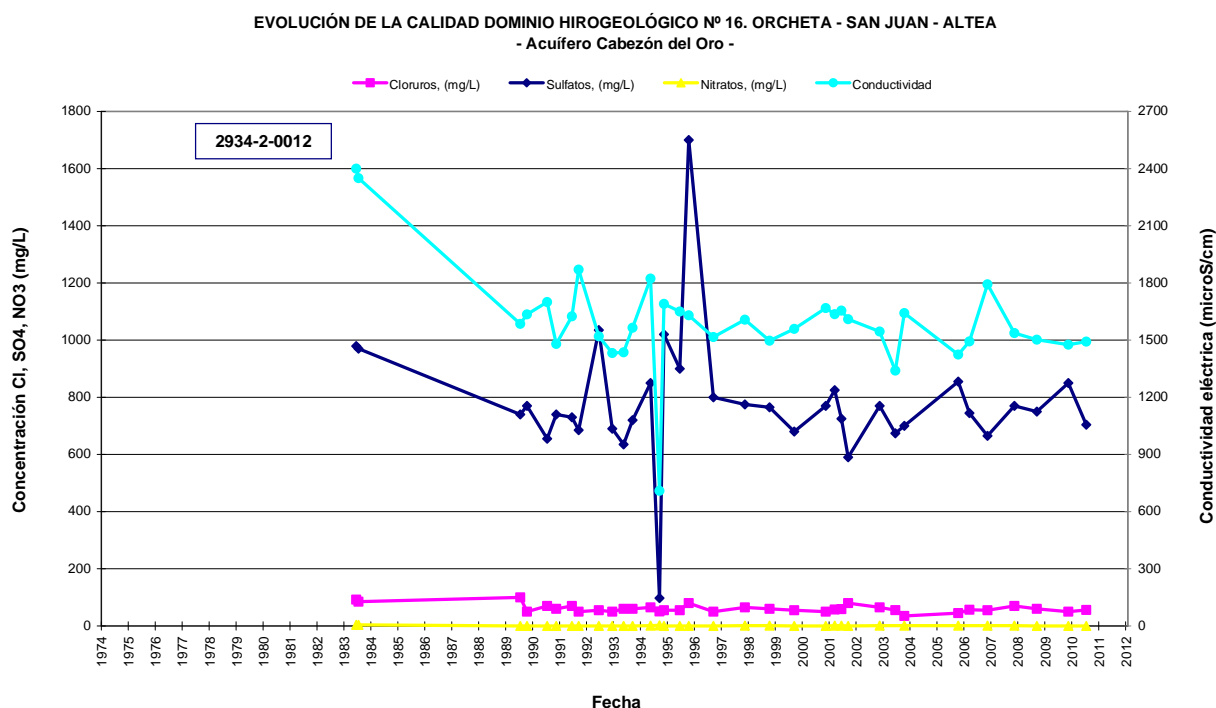


Figura 10. Evolución de la calidad. Dominio hidrogeológico Orxeta-San Juan-Altea. Acuífero Cabezón de Oro.

Acuífero de Orxeta

De forma alargada, en sentido oeste-este, se extiende principalmente por los municipios de Relleu, Orxeta Villajoyosa, Finestrat y Benidorm, ocupando 39 km², de los que 16 corresponden a afloramientos permeables formados por calizas turonienses y los niveles calcáreos menos arcillosos de la base del Senoniense, que constituyen la formación acuífera, con una potencia superior al centenar de metros pero claramente decreciente hacia el sureste, en donde puede llegar a superar escasamente la decena de metros. El impermeable de base está formado por la serie margosa del Cenomaniense.

Estructuralmente está compuesto por una sucesión de anticlinales y sinclinales, de dirección predominante NNE-SSO, que dan lugar a una serie de sectores acuíferos, delimitados principalmente por los umbrales hidrogeológicos generados por la localización a mayor cota del impermeable de base en los núcleos de los anticlinales. Estos sectores acuíferos, de oeste a este, son: sector Pequerina, sector Amadorio, sector Benienzo y sector Murtal. En aguas altas estarían conectados hidráulicamente mientras que con cotas piezométricas bajas los umbrales actuarían de barrera produciéndose la desconexión hidráulica.

Los límites impermeables del acuífero están formados por los afloramientos de Trías en facies Keuper en la zona norte y este, seguida hacia el oeste por la serie margosa del mioceno inferior. El límite sur está formado las margas y calcarenitas del Oligoceno-Mioceno inferior. El borde más occidental queda delimitado por el afloramiento del impermeable de base en el núcleo del anticlinal que continúa al sinclinal de Pequerina.

Las salidas naturales del acuífero (manantiales) se sitúan en su límite meridional, actualmente disminuidas o desaparecidas algunas de ellas por los bombeos, especialmente para abastecimiento a Relleu y Villajoyosa. La cota piezométrica varía según el sector acuífero considerado. Así se sitúa entre las cotas 110 y 150 m.s.n.m. para los sectores más orientales.

El sector Amadorio presenta las cotas más bajas, especialmente en periodos secos en donde el agua llega a bajar hasta la cota 40 m.s.n.m., si bien con conexión hidráulica con el pantano de Amadorio, como parece evidenciarse por las fuertes recuperaciones asociadas a la infiltración de agua desde el mismo, manteniéndose estable con el embalse lleno. El sector Pequerina es el que presenta la mayor cota piezométrica, con fluctuaciones entre los 230 y 300 m.s.n.m. Todos los sectores presentan una evolución interanual tendente hacia el equilibrio. El sector Pequerina es el que presenta variaciones piezométricas más acusadas, con una tendencia decreciente desde mitad de 2010, si bien los últimos datos de octubre y noviembre de 2012 indican una clara recuperación de los niveles piezométricos.

EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA DOMINIO HIROGEOLOGÍCO Nº 16. ORXETA - SAN JUAN - ALTEA
- Acuífero Orxeta -

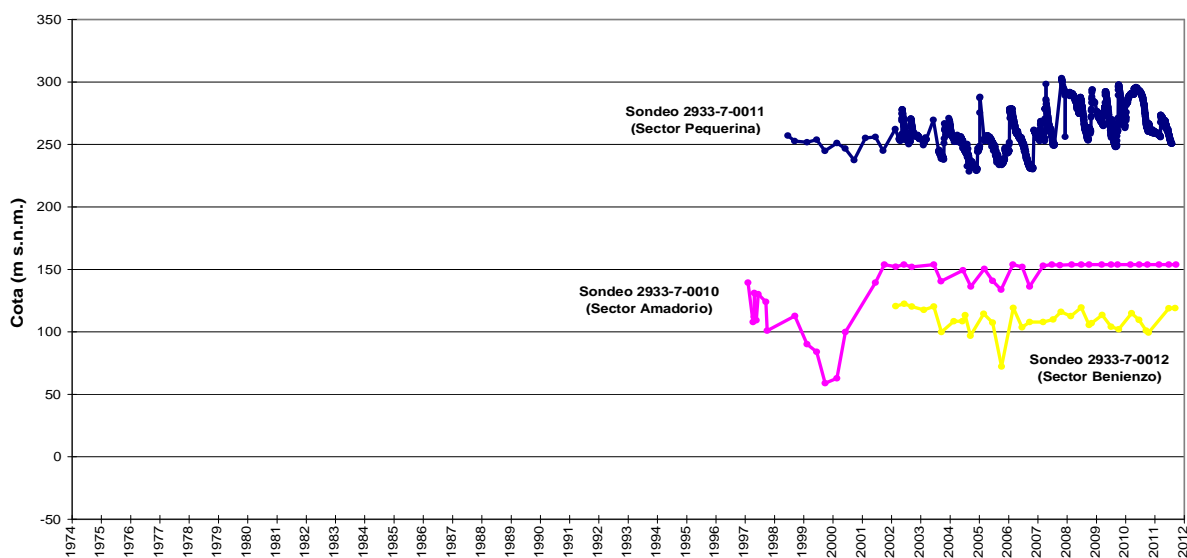


Figura 11. Evolución piezométrica del acuífero de Orxeta: sectores Pequerina, Amadorio y Benienzo.

El agua presenta una facies química que oscila entre sulfatada-bicarbonatada y sulfatada-clorurada para la parte aniónica, y sódico-magnésica y cálcico-sódica para la catiónica, evidenciándose el efecto del Trías yesífero cercano. En ocasiones se supera la concentración máxima admisible de algunos iones (sobre todo sulfatos) para las aguas de abastecimiento público, especialmente en el sector de La Pequerina, en donde se pueden alcanzar salinidades de 1,8 y 2 g/L (conductividad eléctrica a 25° C 2.838 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en muestreo del año 2010), claramente por encima de las salinidades

comprobadas en otros sectores (0,7-1,1 g/L en el sector Amadorio). Por ello, está en proyecto una planta potabilizadora para el abastecimiento a Relleu.

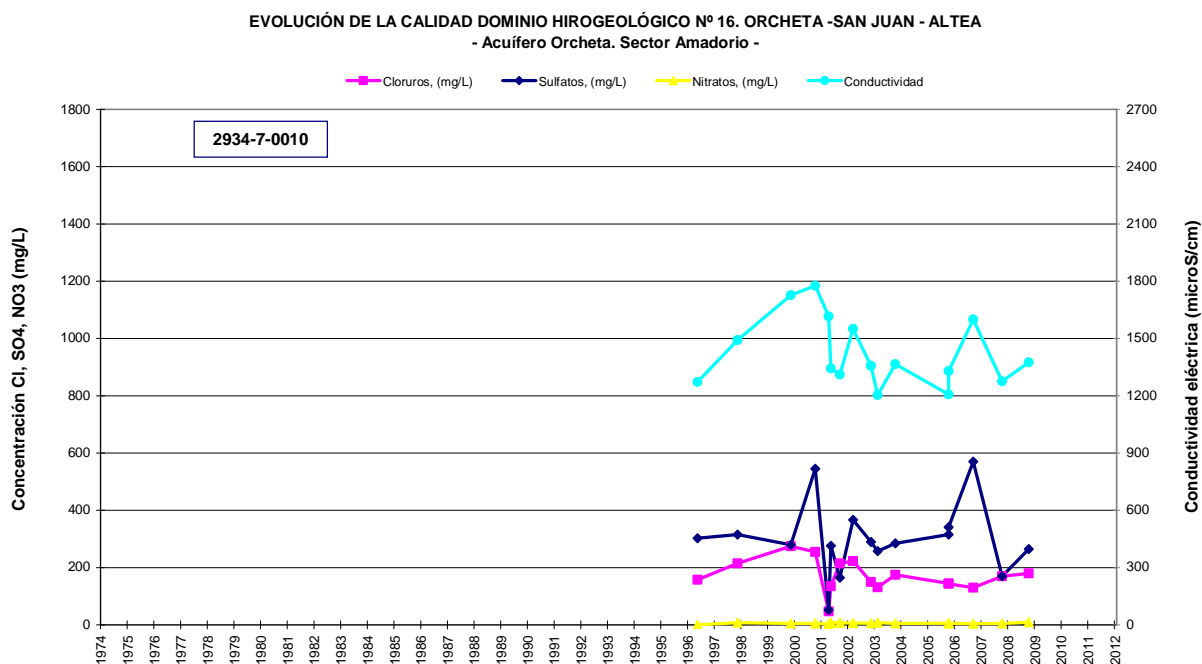


Figura 12. Evolución de la Calidad del Dominio hidrogeológico Orxeta-San Juan-Altea-Acuífero Orxeta_Sector Amadorio.

En cuanto al balance general del acuífero se considera una recarga conjunta por lluvia para todos los sectores de 0,5 hm³/año, y una infiltración en cauces y embalses (Amadorio y Relleu) de 0,4 hm³/año, mientras que las salidas ascienden igualmente a 0,9 hm³/año, para abastecimiento a Villajoyosa, Relleu, urbanizaciones de Finestrat y riego desde los manantiales, diferenciándose 0,6 hm³/año de extracciones por bombeo y 0,3 hm³/año en salidas por manantiales.

Acuífero de CARCONDO

Se trata de un acuífero de recursos muy reducidos, al adelgazarse en gran medida (escasos 10-15 m) las calizas turonienses que constituyen la formación permeable, y están localizadas en el flanco occidental del anticlinal de Carcondo, así como en el flanco sur del cierre periclinal del Rincón de Cortés, al oeste del embalse de Amadorio. Así pues, su afloramiento permeable es muy reducido (algo más de 1,2 km²), estando mayoritariamente confinado por el senoniense margocalizos y las margas con calcarenitas paleógenas. Está limitado mayoritariamente por el afloramiento del impermeable de base, formado por las margas cenomanienses. Al sur, el cabalgamiento de la serie margosa paleógena sobre el cretácico limita igualmente el acuífero. No se conoce ningún punto de agua, con lo que se suponen salidas subterráneas hacia acuíferos colindantes. Se estima una recarga por infiltración de agua de lluvia en los afloramientos permeables de unos 0,3 hm³/año.

4 SONDEOS MECÁNICOS Y DATOS GEOFÍSICOS

SONDEOS

Dejando aparte dos sondeos en Paleógeno, hay siete sondeos básicos de referencia (columnas suministradas por DPA, representadas en la figura 13):

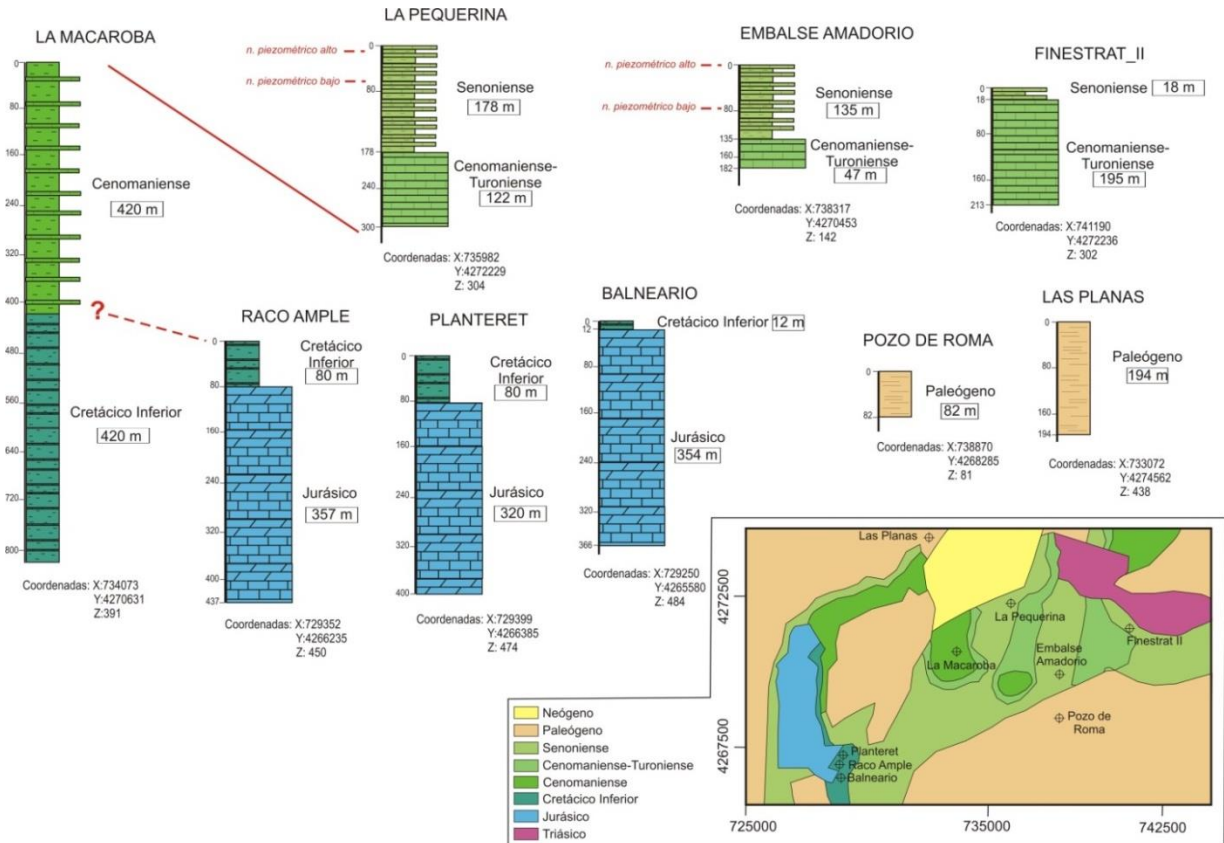


Figura 13. Columnas de sondeos hidrogeológicos del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orxeta y su localización geográfica. Se indican piezometrías altas y bajas en Pequerina y Amadorio (figura 11). En otra interpretación alternativa del sondeo Macaroba sólo los primeros 150 m serían Cenomaniense Inferior (figura 6).

La Macaroba. Según la información petrolera (figuras 13, 14 y Anexo I), este sondeo tiene una profundidad de unos 840 m y se sabe que no alcanza las calizas del techo del Jurásico. Por su ubicación en el centro del anticlinal de Carcondo, sobre los materiales más antiguos del mismo, teniendo en cuenta una interpretación posible de la línea sísmica BT-7 (ver más abajo, figura 15A), los primeros 420 m se han asignado a las posiciones más bajas del Cretácico Superior (Cenomaniense margoso por debajo del Cenomaniense-Turonense, considerado como acuífero), que se corresponden con una alternancia de margas con algunas dolomías margosas; mientras que los últimos 420 m están interpretados como margas del Cretácico Inferior. En una interpretación alternativa la línea sísmica BT-7 (figura 15B), en el sondeo Macaroba sólo los primeros 150 m serían Cenomaniense Inferior (figura 6).

Planteret. En este sondeo los primeros 78 m están interpretados como Cretácico Inferior y el resto como Jurásico, hasta los 400 m de profundidad total del sondeo. Se encuentra dentro del acuífero Cabezón de Oro.

Raco Ample, donde los primeros 77 m corresponden al Cretácico Inferior y el resto al Jurásico. Profundidad total del sondeo 437 m.

Balneario. 12 m de Cretácico Inferior y el resto Jurásico. Junto con los dos anteriores se encuentra en el acuífero de Cabezón de Oro. Profundidad total del sondeo 366 m.

La Pequerina. Profundidad total del sondeo 300 m. Los primeros 178 m corresponden a las margas del Cretácico Superior (Senoniense) y el resto a las calizas del Cretácico Superior (Cenomaniense-Turonense).

Finestrat II. Los primeros 18 m están interpretados como margas del Cretácico Superior (Senoniense) y el resto hasta los 213 m de profundidad se interpreta como carbonatos del Cretácico Superior (Cenomaniense-Turonense).

Embalse Amadorio. 182 m de profundidad total del sondeo. De 0 a 135 serían margas del Senoniense y el resto el nivel acuífero del Cenomaniense-Turonense

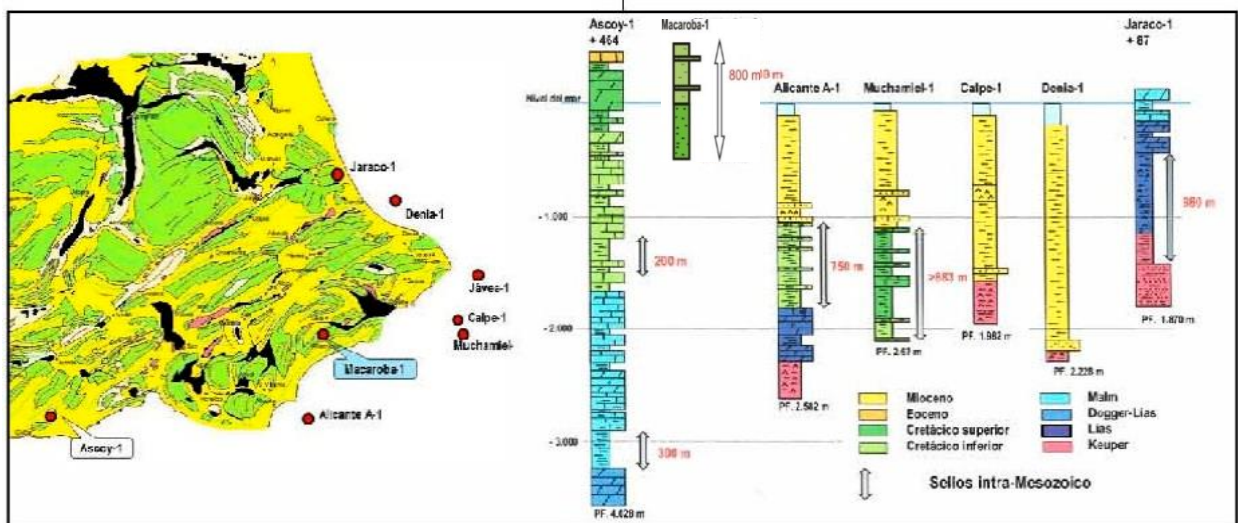


Figura 14. Posición estratigráfica interpretada del sondeo Macaroba 1 entre los sondeos de petróleo del área (IGME, 2010). En el sondeo Macaroba 1 los primeros 420 m se han asignado a las posiciones más bajas del Cretácico Superior mientras que los últimos 420 m están interpretados como margas del Cretácico Inferior. En otra interpretación alternativa del sondeo Macaroba los primeros 150 m serían Cenomaniense Inferior.

DATOS GEOFÍSICOS. LÍNEAS SÍSMICAS.

Las líneas sísmicas disponibles para la caracterización del subsuelo de la hoja 847 (figura 1) se indican en la siguiente tabla:

LÍNEAS SÍSMICAS	IDENTIFICADOR	Km Línea	CDPs	ID CAMPAÑA ATH
BT-7	15567	50	1-1340	1014-BT
RV-11	15565	23	100-500	1014-RV
RV-11-V	15567	19	13-810	1011-RV
RV-87-01	15551	17	111-432	1011-RV
RV-87-02	6648	14	120-830	0529A87G
RV-87-03	6650	20	100-1090	0529A87G

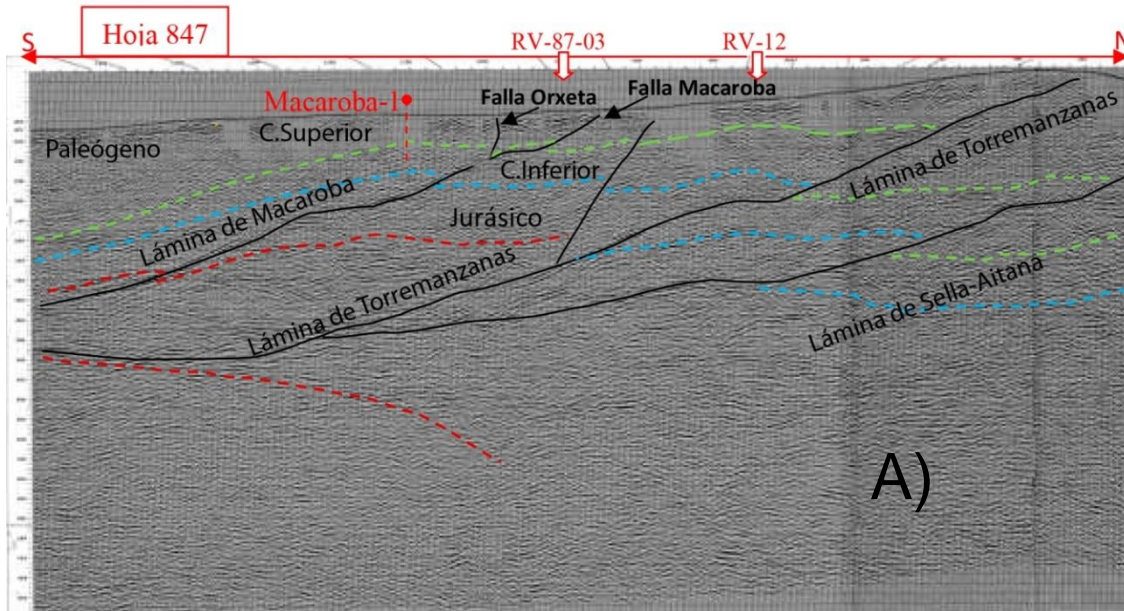
Tabla III. Líneas sísmicas detalladas. Información descargable de SIGECO (Sistema de información geofísico del IGME, en línea).

Las líneas sísmicas son de calidad pobre y no ofrecen reflectores fácilmente identificables, salvo algunas estructuras mayores, como grandes cabalgamientos. La interpretación descrita aquí se ha basado en trabajos previos disponibles (IGME, 2010 Plan de Almacenamiento geológico de CO₂ del IGME+ e IGME . ENAGAS, 1995), interpretaciones que a su vez parten de los resultados petroleros de los años 80 (Anexo I).

Las secciones interpretadas muestran una tectónica compleja, con presencia de numerosas fallas inversas. La sección guía para la creación del modelo es la BT-7 (figura 15), donde se puede observar las diferentes estructuras cabalgantes principales de la hoja 847 (denominadas láminas de Macaroba y Torremanzanas). A partir de esta interpretación de BT7, se ha intentado continuar los reflectores de interés en el resto de secciones sísmicas, localizando las fallas principales primero (cabalgamientos), y siguiendo con los posibles reflectores correspondientes a los límites de techos estratigráficos en sus intersecciones con la Línea BT7. La interpretación en las 5 secciones usadas se presenta en el Anexo I, y se ha realizado integrando todas las secciones sísmicas en Kingdom Suite®, tratando de obtener un modelo en tiempos coherente en los cruces de las líneas sísmicas, donde los horizontes en las diferentes secciones tengan continuidad geológica, a partir los cartografiados en la línea BT7 (figura 27). Con ayuda del análisis de velocidad de las propias secciones se puede construir una ley tiempo-velocidad (TWT-V), que permite migrar las secciones sísmicas y obtener valores de profundidad para los cortes de entrada a Geomodeler derivados de la sísmica (apartado 3.3).

LÍNEA SÍSMICA BT-7. Es la sección sísmica de referencia (figura 15). La interpretación de cabalgamientos se ajustó a la cartografía GEODE del entorno de Orqueta (figura 5). Más allá de la cartografía de las grandes estructuras, sin sondeos de control del Cretácico Inferior y del techo del Jurásico, la interpretación sísmica está sometida a grandes interrogantes, por lo que en la figura 15 se ofrecen dos interpretaciones alternativas, con diferentes ajustes de horizontes estratigráficos con los reflectores sísmicos. Las diferencias principales afectan al techo del Paleógeno, y sobre todo, al límite C. Superior-C. Inferior (a unos 430 m de profundidad en la vertical del sondeo Macaroba en la figura 15 A y a unos 150 m en la 15B). En efecto, en la sección 15A puede observarse una serie de reflectores de posible edad Jurásica (marcado en azul) a 550 ms de tiempo doble, próximos al final del sondeo Macaroba-1 (840 m, que no corta Jurásico); con una velocidad de homogeneidad de unos 4000 m/s, la profundidad resultante del techo del Jurásico es de unos 1100 m (tabla IV, aprox. 260 m por debajo del final del sondeo, el cual termina en 420 ms equivalente a

840 m de profundidad). Aplicando una velocidad del orden de 3900 m/s a eventos provenientes de reflectores superiores, identificables con el límite Cretácico Inferior-Cretácico Superior en un tiempo doble de 220 ms, este límite se situaría a unos 430 m de profundidad, y Macaroba cortaría aproximadamente el mismo espesor de C. Superior y C. Inferior. Otra interpretación posible, más próxima a la petrolera de BT7 en Anexo I, es la de la figura 15B, con el C. Inferior próximo a superficie en la vertical del sondeo Macaroba (a unos 150 m): dada las diferencias de espesor de C. Inferior podría denominarse a una y otra de Cretácico Inferior delgado (figura 15A) y grueso (15B), respectivamente.



LIMITE	BT-7 (1ª)		BT-7 (2ª)	
	TWT (ms)	PROF. (m)	TWT (ms)	PROF. (m)
C. Sup-C.Inf	220	430	75	150
C.Inf-Jurásic.	550	1100	750	1550
Jurásic.-Triás.	1110	2390	1600	3560

Tabla IV. Tiempo-Profundidad Horizonte Sísmicos en Sondeo Macaroba 1ª interpretación (Izq.) y 2ª interpretación (Abajo).

Superficie Límite	1ª Interpre. BT-7: TWT	2ª Interpre. BT-7: TWT	RV-87-02: TWT
Paleógeno- Cre.Sup.	0-500 ms	0-800 ms	0-350 ms
Cre. Inf.-Cre.Sup.	250-1110 ms	50-1300 ms	160-600 ms
Cre. Inf.-Jurásico	550-1400 ms	750-1500 ms	450-950 ms
Jurásico-Triás	1400-1800 ms	1600-1700 ms	1250-1450 ms

Tabla V. Comparación en Lámina de Macaroba entre profundidades en tiempos dobles (TWT) de los horizontes en las 2 interpretaciones del perfil sísmico BT-7 y una 3ª sección, la RV-87-02 (ver Anexo I), situada a unos 5 km al W de BT-7.

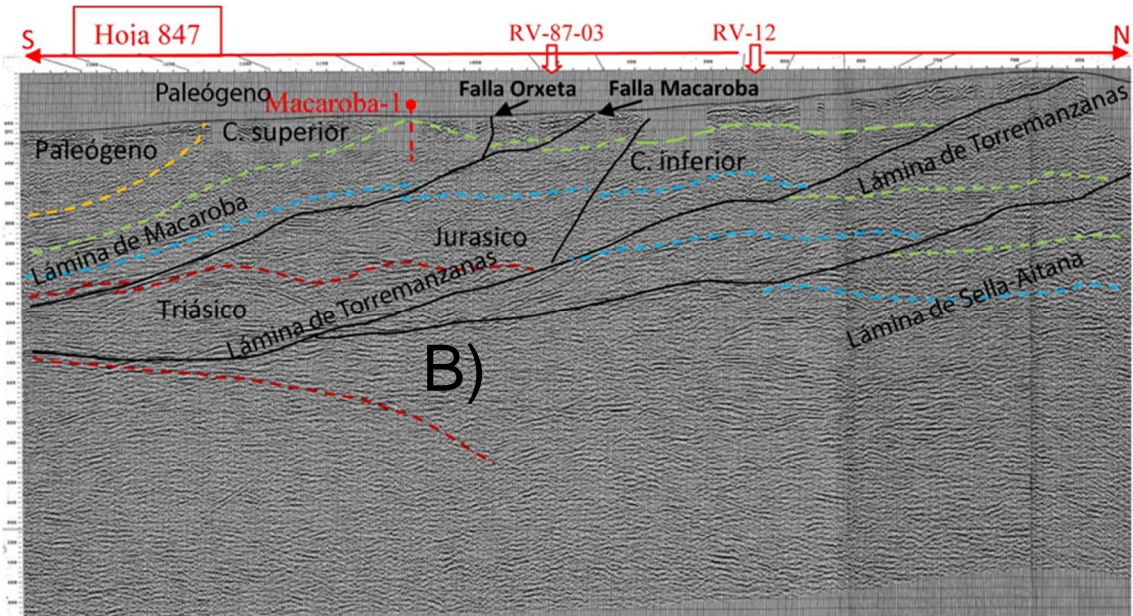


Figura 15. Sección sísmica BT-7- A) Primera interpretación. Modelo de Cretácico Superior grueso (420 m en sondeo Macaroba). B) Segunda interpretación de la sección sísmica BT7. Modelo de Cretácico Inferior y Paleógeno gruesos (150 m de Cretácico Superior en sondeo Macaroba).

5 CONSTRUCCIÓN Y CALIDAD DEL MODELO 3D

Para la realización de un modelo geológico 3D del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orcheta el software 3D Geomodeller integra toda la información disponible de superficie y subsuelo (figura 2), generando un modelo geológico que representa 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 cortes geológicos en 2D, input básico del programa, y el posterior cálculo de las superficies equipotenciales que en profundidad generan el modelo completo en 3D, requiere la definición coherente tanto del espesor de cada capa (unidad estratigráfica) como de su dirección y buzamiento, y el 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 en cortes que individualmente parecen correctos pero que no resultan coherentes, y que no permiten el cálculo del modelo final.

En la figura 16 (arriba) se muestra el modelo 3D proyectado en las secciones usadas para el cálculo matemático de superficies en 3D Geomodeller. Una imagen del modelo completo se puede ver en la misma figura 16 (abajo), con todas las superficies modeladas y las fallas principales. El área considerada como acuífero corresponde a los tres anticlinales del Cretácico Superior carbonatado (Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta) cuyos límites serían: las fallas de Orcheta y Paleógeno a norte y sur, respectivamente, el límite este, el diapiro de Finestrat, mientras que hacia el oeste la estructura queda abierta hacia el área de Cabezón de Oro. Es decir, los límites impermeables del acuífero están formados por los afloramientos de Trías en facies Keuper en la zona N y E, seguida hacia el oeste por la serie margosa del Mioceno Inferior, al N de la fallas de Orcheta. El límite sur está formado las margas y calcarenitas del Oligoceno-Mioceno inferior, al S de la falla Paleógeno. El borde más occidental queda delimitado por el afloramiento del impermeable de base (Cenomaniense basal margoso) en el núcleo del anticlinal de Carcondo, al oeste del sinclinal de Pequerina.

Los mapas de isobatas correspondientes a las cuatro superficies de referencia de mayor interés se representan en la figura 17. La estructura puede describirse como un gran monoclinas que asciende desde la línea de costa en el extremo SE del área de estudio, hasta el eje de los anticlinales de Orcheta: el Jurásico (techo) asciende desde . 2000 m.s.n.m. a unos -700 m.s.n.m.; el Cretácico Inferior lo hace desde . 1500 m.s.n.m. a unos 0 m.s.n.m., y el Cretácico Superior (Cenomaniense, Turoniense) desde unos -1000 m.s.n.m. a unos 300-400 m.s.n.m.

Entre los anticlinales de Rincón de Cortés y Orcheta la zona deprimida de dirección N-S corresponde en superficie con la localización del Embalse de Amadorio y el río Sella. La proyección de las fallas Macaroba y Orcheta sobre esta superficie marca una zona deprimida entre ambas generando un depocentro de -200 m al norte de la falla de

Orcheta. En el caso del techo del Cretácico Inferior los tres anticlinales aparecen más laxos situándose sus cúpulas alrededor de los 0 m.s.n.m. La proyección de las fallas Macaroba y Orcheta en esta superficie delimita dos depocentros al norte con saltos de hasta 200 m. Por lo que respecta a isobatas de techo del Jurásico, se siguen observando los anticlinales de Orcheta a una profundidad de unos -700 m (-300 msnm). Los mapas de isobatas, lógicamente, concuerdan con los cortes presentados en la figura 7 donde el Cretácico Superior aparece modelado con cambios importantes de espesor mientras que los niveles inferiores (del Cretácico Inferior hasta el Triásico) son más homogéneos, hecho directamente relacionado con la ausencia de datos en profundidad y las extrapolaciones realizadas en la interpretación de la sísmica, sobre todo en cuanto a espesores de las formaciones.

La estructura de monoclinas culminante en los anticlinales de Orcheta presenta continuidad hacia el oeste, hasta el anticlinal de Cabezón de Oro, acuífero jurásico de dirección N-S. El afloramiento de estos materiales jurásicos y su continuidad hacia el este bajo toda la serie sedimentaria provoca que las capas generen elevadas pendientes. Esta continuidad de capas en profundidad es discutible: pe, es posible que las fallas de Macaroba y Orcheta, giren y converjan al SO (línea de trazos a nivel de Jurásico en figura 17C), de forma que queden aislados el sistema de anticlinales de Orcheta al este, del anticlinal de Cabezón de Oro al oeste.

Un escenario alternativo surge de la doble interpretación que se da a la línea sísmica BT-7 (figuras 6 y 15) donde los reflectores correspondientes al muro del Paleógeno y muro de Cretácico Inferior pueden ser interpretados para delimitar por una parte un Paleógeno y Cretácico Inferior %delgado+ y por otra un Paleógeno y Cretácico Inferior %grueso+.

Con el escenario de Paleógeno y Cretácico Inferior %grueso+ se realizó el nuevo modelo (figura 18). En la figura 18 se han representado cuatro superficies; en las figuras 18A y 18B se puede ver la diferencia entre un Paleógeno %delgado+ y un Paleógeno %grueso+, respectivamente. Las figuras 18C y 18D representan el muro del Cretácico Superior margoso y muro de Cretácico Superior del nuevo modelo, respectivamente.

Con un Paleógeno %delgado+ en la zona litoral, el muro del Paleógeno alcanzaría los -500 m.s.n.m. mientras que en el caso de Paleógeno %grueso+ el muro llegaría a -1000 m.s.n.m. Las diferencias entre estos dos modelos no sólo radican en el aumento de espesor (300-500 m), sino también en la geometría de la cuenca, con un promontorio relativo muy desarrollado en el modelo grueso centrado en las coordenadas $x=739.000$, e $y=4.266.000$. Estas diferencias son difíciles de contrastar debido a la falta de datos de subsuelo, pero tendrían implicaciones importantes en el caso de que los materiales paleógenos fueran explotados ya como acuífero, o sobre todo como reservorio de almacenamiento de sustancias de rechazo de diversos procesos industriales (salmueras u otras).

Además de la variación en el espesor de Paleógeno, considerando también el mismo escenario, el Cretácico Inferior %grueso+, donde el sondeo Macaroba sólo cortaría sólo unos 150 m de C. Superior (figuras 6 y 7b), la base del Cretácico Superior en el anticlinal de Carcondo se sitúa en este caso a unos +200 msnm en lugar de a unos -50 msnm según el modelo previo (figura 17B). Es decir, se produciría un aumento de espesor de C. Inferior de unos 250 m en el entorno de los anticlinales de Orxeta. Dado que el muro del C. Superior margoso (Senoniense) desciende en este modelo unos 50-100 m respecto al primero, todo ello redundaría en una importante reducción de espesores del Cenomaniense-Turonense, así como un incremento de los saltos de falla en todo este sector citado de los anticlinales de Orxeta. Los cambios de

espesores medios en todo el modelo son menos importantes (tablas IIA, IIB), de forma que aún con la variación de los espesores en Paleógeno y Cretácico Superior, la estructura general de la zona se mantiene.

En conclusión el modelo 3D obtenido delinea una ESTRUCTURA EN SILLA DE MONTAR, constituida por un monoclinal vergente al NO, culminante en los anticlinales de Orcheta (eje NE-SO de la silla), con depocentros al N de las fallas de Macaroba y Orcheta, y elevaciones laterales al SO (Cabezón de Oro) y NE (diapiro de Finestrat).

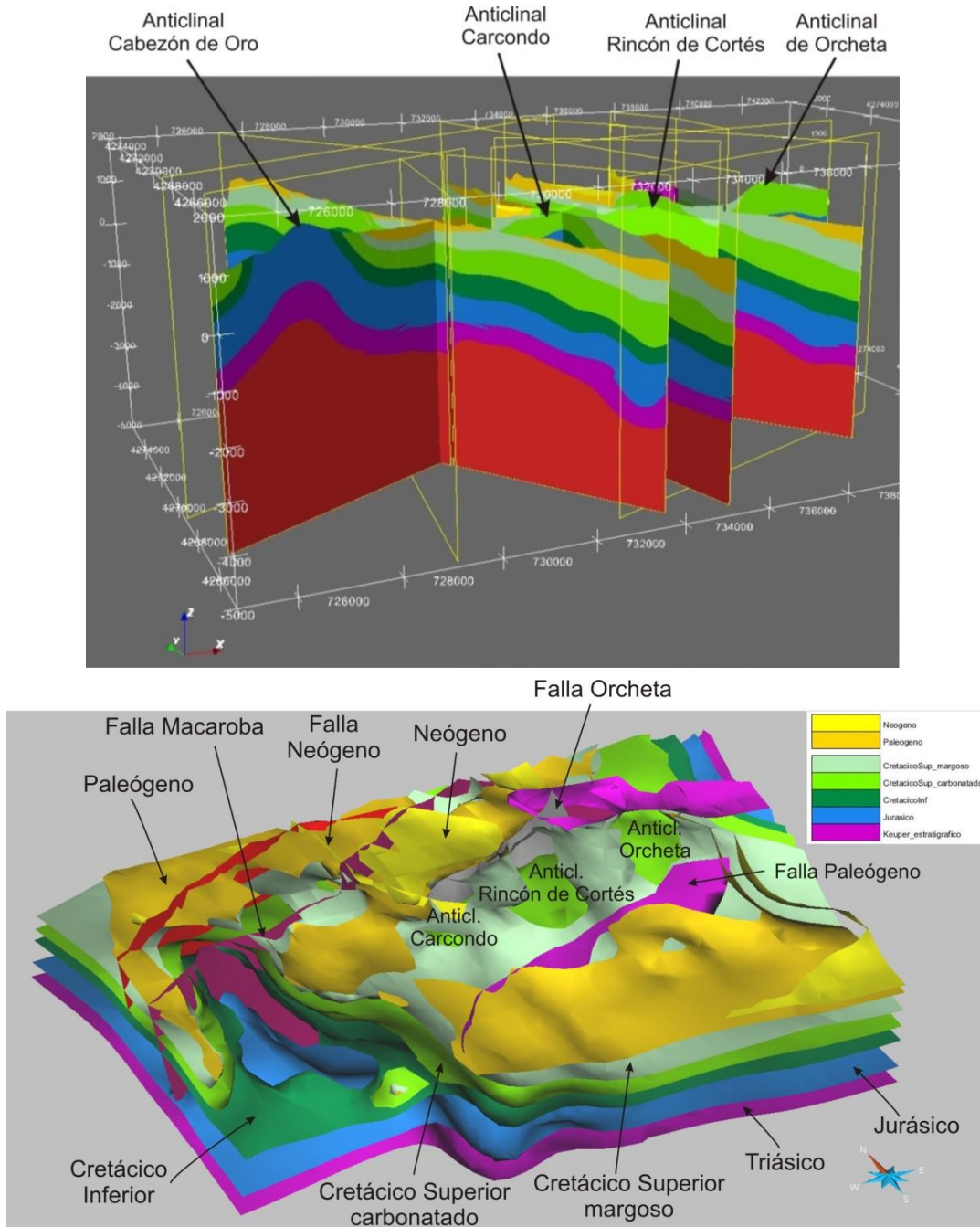


Figura 16. Modelo geológico 3D calculado. Arriba: proyectado sobre las secciones utilizadas para su cálculo. La serie estratigráfica es la misma que se muestra en la figura 7. Abajo: en visión cenital se observa los tres anticlinales de Cretácico Superior carbonatado que conforman el acuífero.

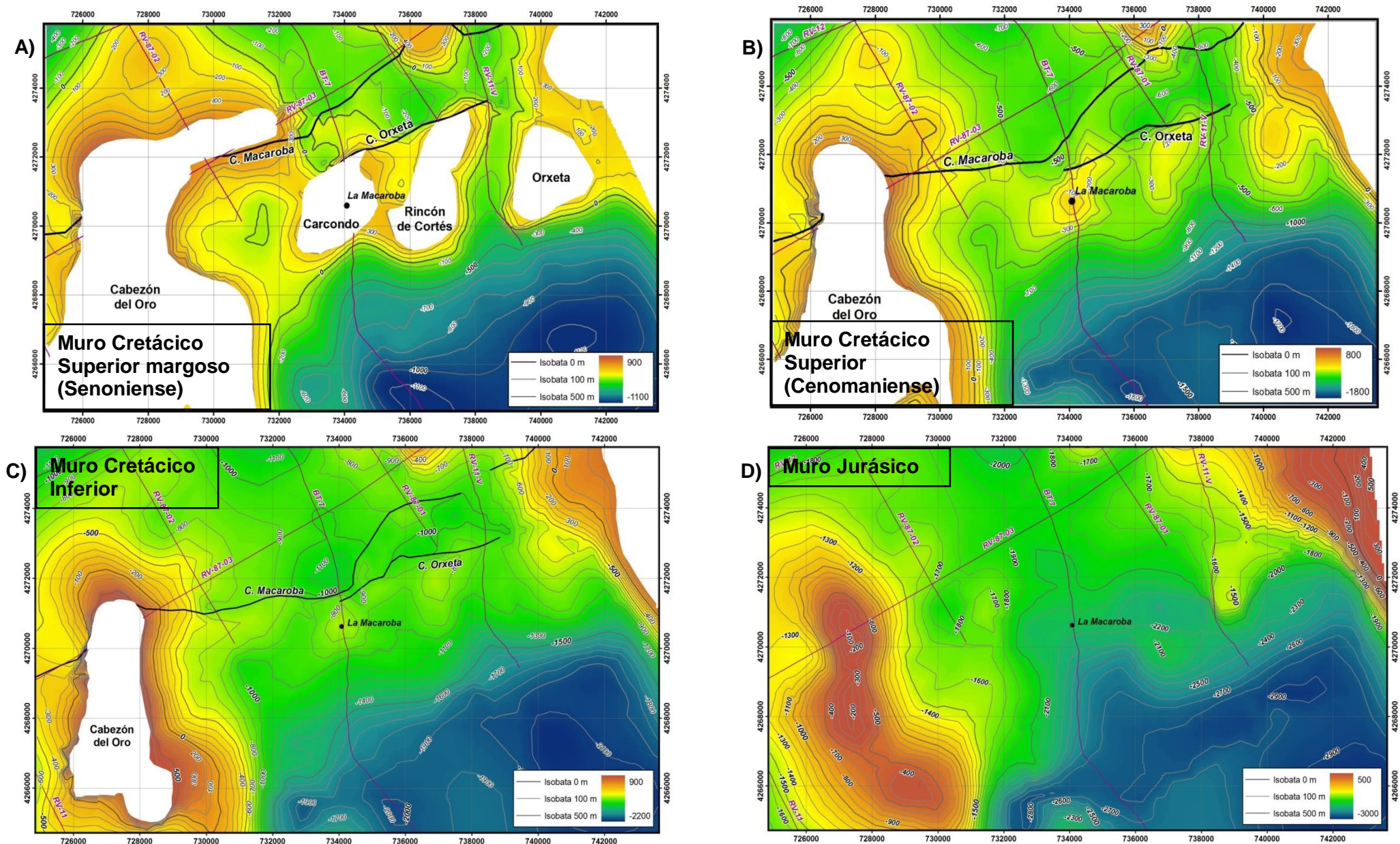


Figura 17. Isobatas de superficies de referencia (m.s.n.m.) del sistema acuífero de los anticlinales de Orcheta. Modelo de Paleógeno y Cretácico Inferior %Belgados+ A) Muro Cretácico Superior margoso; B) Muro Cretácico Superior; C) Muro Cretácico Inferior. A trazos, alternativa donde los cabalgamientos de Macaroba y Orcheta giran al SO, a nivel de techo del Jurásico, aislando Cabezón del Oro de los anticlinales de Orcheta; D) Muro Jurásico.

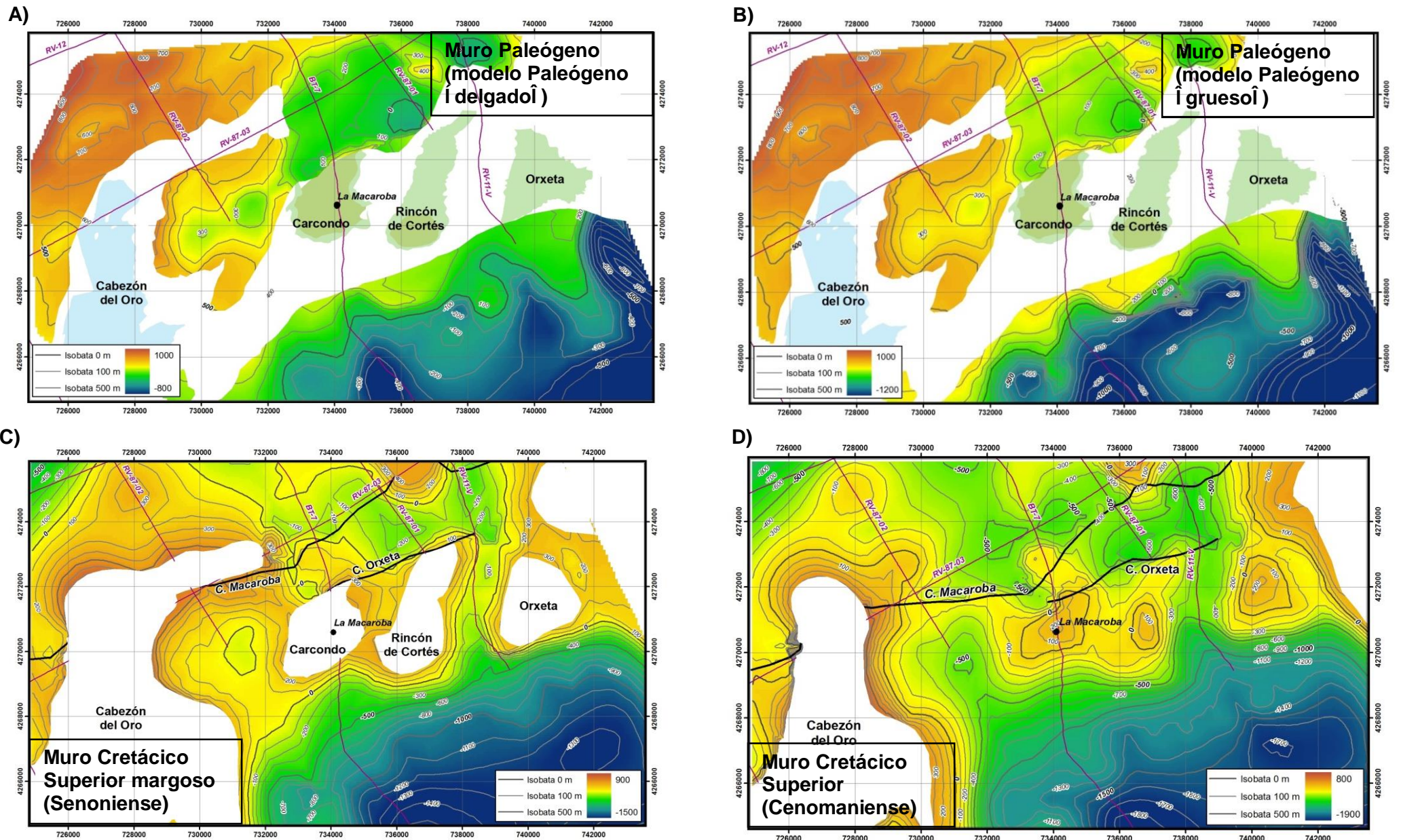


Figura 18. Isobatas de superficies de referencia (m.s.n.m.) del sistema acuífero de los anticlinales de Orxeta. A) Muro Paleógeno í delgadoí; B) Muro Paleógeno í gruesoí; C) Muro Cretácico Superior margoso; D) Muro Cretácico Superior. Las imágenes C) y D) corresponden a un escenario de Paleógeno y Cretácico Inferior í gruesosí.

6 PETROFÍSICA. ACTUALIZACIÓN DE RESERVAS HIDROGEOLÓGICAS

6.1 Sistema Poroso

Para la caracterización del sistema poroso de las formaciones permeables del acuífero Orcheta no se ha realizado ningún estudio petrofísico de determinación de la porosidad abierta, ni petrográfico específico. Usando los resultados de los informes del proyecto Hidroproal en acuíferos próximos de edades equivalentes, %Modelo geológico 3d del acuífero de Carrascal-Ferrer y evaluación de sus reservas totales de agua subterránea+(Marín Lechado, et al., 2014), y, %Modelo geológico 3d del acuífero de mediodía y evaluación de sus reservas totales de agua subterránea+(Carmen Rey, et al., 2013), la porosidad asignable al Cretácico Superior carbonatado (Cenomaniense-Turonense) es del 0.5%. Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, los cálculos que se presentan en el siguiente apartado se han realizado para una porosidad del 0.5%.

6.2 Capacidad Total de Almacenamiento. Curvas 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. A partir del modelo 3D Geomodeller, y de las isobatas correspondientes, figuras 17 y 18, 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. A efectos del cálculo de reservas, para la construcción del stratigraphic grid, en el caso de Orcheta se ha tomado como muro una superficie intra Cretácico Superior carbonatado (límite estimado, deducido del modelo 3D, entre el Cenomaniense Inferior margoso, acuitardo, y Cenomaniense-Turonense acuífero, figura 19A) y como techo los niveles piezométricos medios estimados a partir de los suministrados en DPA-IGME, 2013 (figura 11). Con estas superficies como límites se pueden calcular los volúmenes de roca 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). Para el cálculo de los volúmenes de reservas totales, y de la curva de explotación desde un sondeo determinado, se requiere la determinación de la porosidad abierta y del coeficiente de almacenamiento.

Como se observa en la figura 19 (A y B), estructuralmente, el acuífero está compuesto por una sucesión de anticlinales y sinclinales, de dirección predominante NNE-SSO, que dan lugar a una serie de sectores acuíferos, delimitados principalmente por los umbrales hidrogeológicos generados por la localización a mayor cota del impermeable de base en los núcleos de los anticlinales. Estos sectores acuíferos, de oeste a este, son (mapa provincial de agua de la Diputación de Alicante, DPA, 2010): sector Pequerina, sector Amadorio, sector Benienzo y sector Murtal. En aguas muy altas estarían conectados hidráulicamente mientras que con cotas piezométricas bajas los umbrales actuarían de barrera produciéndose la desconexión hidráulica (figura 19A).

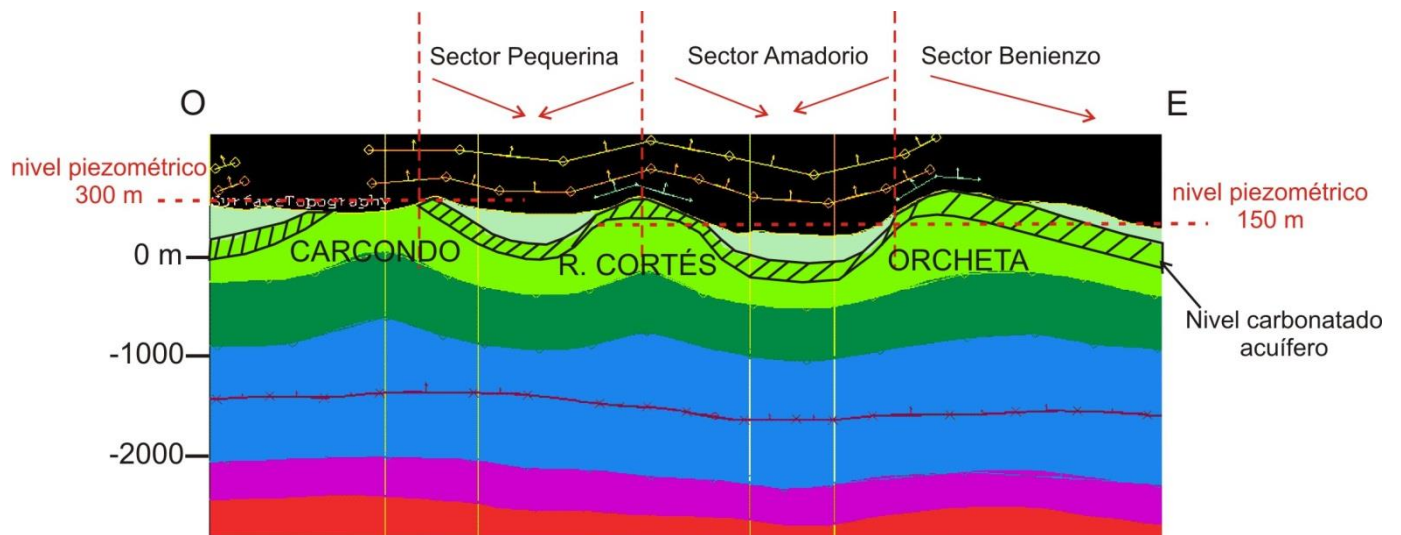


Figura 19A. Esquema geológico según corte VIII (ver figura 7A) donde se ha marcado el nivel carbonatado (Cenomaniense-Turonense) que se considera acuífero (modelo geológico considerando el Paleógeno y Cretácico Inferior %delgado-). También se diferencian los sectores y sus direcciones de flujo.

El mismo escenario se produciría en el caso de considerar el modelo geológico obtenido con un Cretácico Inferior %grueso+según se observa en la figura 19B. En esta situación gran parte del espesor correspondiente al Cretácico Superior se podría considerar acuífero.

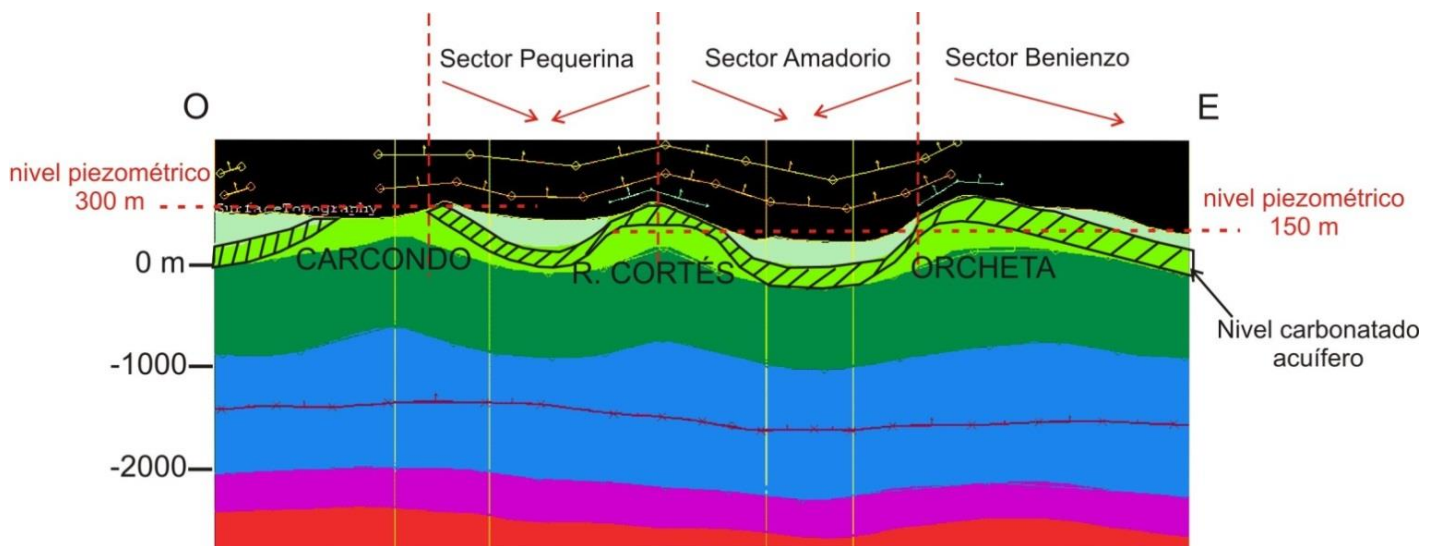


Figura 19B. Esquema geológico según corte VIII (ver figura 7B) donde se ha marcado el nivel carbonatado (Cenomaniense-Turonense) que se considera acuífero (modelo geológico considerando el Paleógeno y Cretácico Inferior %grueso-). También se diferencian los sectores y sus direcciones de flujo.

Según DPA, 2010, los límites impermeables del acuífero están formados por los afloramientos de Trías en facies Keuper en la zona norte y este, seguida hacia el oeste por la serie margosa del Mioceno Inferior. El límite sur estaría formado por las margas y calcarenitas del Oligoceno-Mioceno Inferior. El borde más occidental queda delimitado por el afloramiento del impermeable de base (del Cenomaniense) en el núcleo del anticlinal (de Carcondo) al O del sinclinal de Pequerina+(figuras 19A y 19B). Esto implica que los límites estructurales N y S del acuífero serían los cabalgamientos de Orcheta y Paleógeno, respectivamente, cuyos saltos aislarían el acuífero. Ese puede ser el caso del cabalgamiento de Orcheta al N, pero no del Paleógeno al S (corte II en las figuras 7A y 7B); es decir, el límite S es un tanto arbitrario en DPA, 2010, y difícil de establecer en la práctica.

No obstante lo anterior, los valores de reservas totales de agua subterránea calculados que se resumen en Tabla VI y figura 20, en la que se ha representado la curva de reservas del acuífero de Orcheta, se refieren a los límites del acuífero establecidos en DPA, 2010. Los datos aparecen distribuidos según tres sectores. De los cuatro sectores definidos en DPA, 2010, sólo tres de ellos corresponden a nuestra zona de trabajo, siendo éstos los más occidentales: Pequerina, Amadorio y Benienzo (figuras 8, 20).

En el caso del sector Pequerina, en el sinclinal del mismo nombre, figura 19 (A y B), el nivel piezométrico más alto se sitúa en el límite suroeste del acuífero, donde se ha estimado una altura de 325 m.s.n.m. El punto de menor potencial estaría en el embalse de Relleu (al norte del sector Pequerina, figura 11) con una altura de unos 275 m.s.n.m. Entre ambos niveles extremos se sitúan el resto de piezometrías intermedias, realizándose los cálculos de reservas cada 25 metros por encima de la cota mínima (275 m), cada 50 m hasta la cota cero, cota estimada de base del acuífero (tabla VI y figura 20). Las reservas totales resultantes son de 5.1 hm³ con una porosidad de 0.5%.

En el sector Amadorio el nivel piezométrico más alto se sitúa en el este del acuífero, coincidiendo con el eje anticlinal de Rincón de Cortés (figuras 19A y 19B), con una altura estimada de unos 150 m.s.n.m. El punto de menor potencial está en el embalse de Amadorio (al oeste de este sector) con una altura de 125 m.s.n.m. Entre ambos niveles extremos se sitúan el resto de piezometrías intermedias, realizándose los cálculos de reservas cada 25 metros por encima de la cota mínima (tabla VI y figura 20). Las reservas resultantes son de 0.15 hm³ con una porosidad de 0.5%. En el sector Benienzo, suponiendo los mismos niveles que en Amadorio, las reservas resultantes son de 0.7 hm³. Las curvas de explotación desde los sondeos de La Pequerina, y Embalse de Amadorio serían idénticas a las representadas, si bien eliminando las reservas por encima de 275 m para La Pequerina (nivel piezométrico medio estimado en el sondeo), y por encima de 140 m en el caso de Embalse de Amadorio.

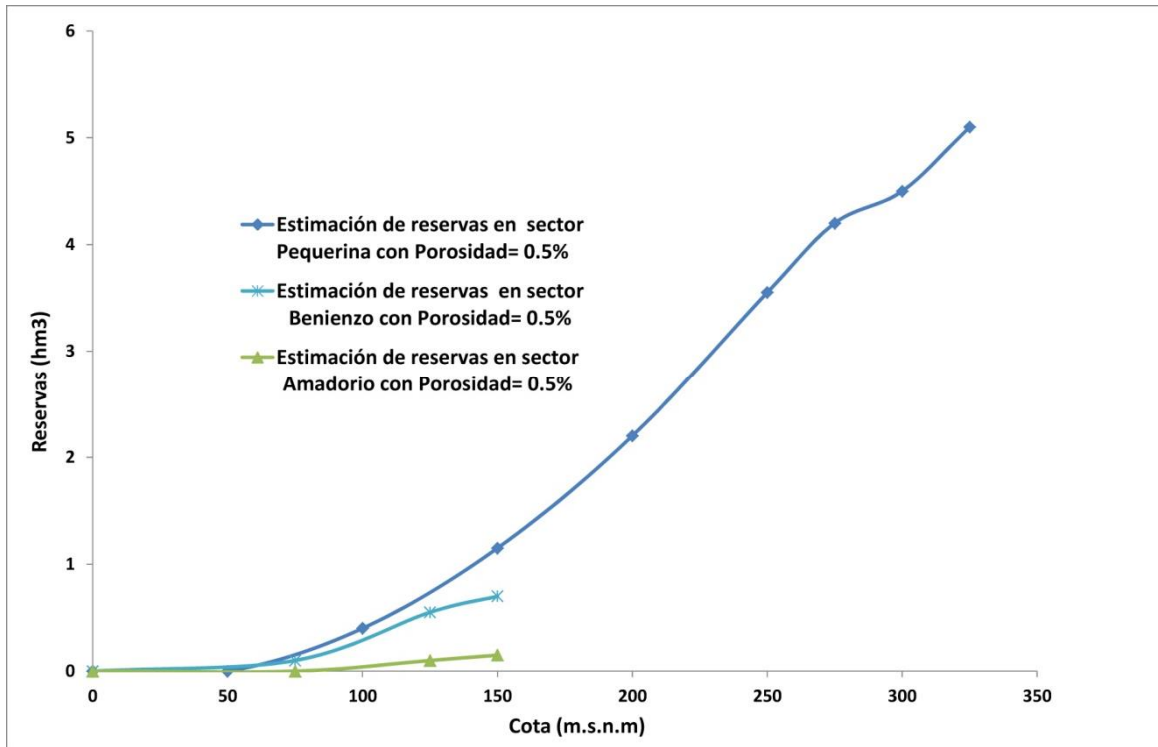


Figura 20. Curvas de reservas totales del Acuífero Orcheta obtenidas a partir de los modelos geológicos 3D del acuífero. Se distinguen los sectores Pequerina, Amadorio y Benienzo.

SECTOR PEQUERINA (20 km ²)			SECTOR AMADORIO (17.4 km ²)			SECTOR BENIENZO (11 km ²)		
Porosidad 0.5%			Porosidad 0.5%			Porosidad 0.5%		
Cota (msnm)	Volumen saturado (km ³)	Volumen total (hm ³)	Cota (msnm)	Volumen saturado (km ³)	Volumen en total (hm ³)	Cota (msnm)	Volumen saturado (km ³)	Volumen total (hm ³)
325	1,02	5,10	150	0,03	0,15	150	0,14	0,7
300	0,90	4,50	125	0,02	0,1	125	0,11	0,55
275	0,84	4,20	75	0	0	75	0,02	0,10
250	0,71	3,55	0	0	0	0	0	0
200	0,44	2,20						
150	0,23	1,15						
100	0,08	0,40						
50	0,00	0,00						
0	0,00	0,00						

Tabla VI. Resumen de reservas del acuífero Orcheta. Reservas dadas por el modelo 3D del acuífero para porosidades del 0.5% en los sectores Pequerina, Amadorio y Benienzo.

El modelo geológico 3D del Sistema Acuífero de los Anticlinales de Orcheta obtenido en 3D Geomodeller (apartado 5) integra una evaluación simple de la estructura del anticlinal de Cabezón del Oro, lo que permite una aproximación al cálculo de reservas acuíferas del mismo. Según la geometría obtenida de su techo (figura 17C), suponiendo un nivel piezométrico de 150 m.s.n.m., figura 9, las reservas serían de:

-8 hm³, que corresponderían a las comprendidas entre la cota 0 msnm y dicho nivel piezométrico, suponiendo que no existen reservas explotables debajo del nivel del mar, y de,

-18.45 hm³ entre 150 y -200 msnm (elevación máxima del Trías en el anticlinal de Cabezón del Oro, según figura 17D) y el mismo nivel piezométrico.

En ambos casos las porosidades consideradas serían del 0.5%.

7 CONCLUSIONES

Las conclusiones finales obtenidas en este proyecto son las siguientes.

1. A pesar de la falta de datos relativos a los espesores sedimentarios, tanto del Cretácico Superior como del Cretácico Inferior por inexistencia de sondeos de control, y de las incertidumbres que rodean la interpretación de las secciones sísmicas disponibles, y en particular la de la línea guía BT-7 y del sondeo Macaroba-1, se ha obtenido un modelo 3D ajustado a la cartografía de superficie, datos estructurales de afloramiento y sísmica interpretada. El modelo 3D obtenido delinea una estructura en silla de montar, constituida por un monoclinal vergente al NO, culminante en los anticlinales de Orcheta (eje NE-SO de la silla sobre los anticlinales de Carcondo, Rincón de Cortés y Orcheta), con depocentros al N de las fallas de Macaroba y Orcheta, y elevaciones laterales al SO (anticlinal Cabezón de Oro) y NE (diapiro de Finestrat).
2. En el modelo obtenido, la estructura de monoclinal culminante en los anticlinales de Orcheta presenta continuidad hacia el oeste, a través de un depocentro intermedio, hasta el anticlinal jurásico de Cabezón de Oro.

Alternativamente, la prolongación al SO de los cabalgamientos de Macaroba y Orcheta aislarían el acuífero jurásico de Cabezón de Oro del Jurásico infrayacente al sistema de los anticlinales cretácicos de Orcheta (lo que constituiría el cierre lateral del almacén de CO₂ de este sistema, almacén estudiado en IGME, 2010).

3. Las incertidumbres del modelo anterior son importantes, tanto acerca de la extensión, geometría y saltos de los cabalgamientos principales, como sobre todo, por lo que respecta a espesores del Paleógeno, Cretácico Inferior y de Jurásico.

Se ha ensayado una interpretación (o escenario) alternativa de ~~el~~ Cretácico Inferior grueso+ que aumenta considerablemente estos espesores en el modelo (para ello se han reinterpretado la línea sísmica BT-7 y el sondeo Macaroba-1). No obstante, los espesores y reservas del acuífero de Orcheta, en el Cretácico Carbonatado, y el techo del mismo, apenas si sufrirían modificaciones, por lo que las reservas hidráulicas resultantes no se verían modificadas.

En el caso del escenario de Paleógeno ~~delgado~~+ en la zona litoral, el muro del Paleógeno alcanzaría los -500 m.s.n.m. mientras que en el caso de Paleógeno ~~grueso~~+ el muro llegaría a -1000 m.s.n.m. Las diferencias entre estos dos modelos no sólo radican en el aumento de espesor (300-500 m), sino también en la geometría de la cuenca, con un promontorio relativo muy desarrollado en el modelo grueso centrado en las coordenadas x=739.000 e y=4.266.000. Estas diferencias son difíciles de contrastar debido a la falta de datos de subsuelo, pero tendrían implicaciones importantes en el caso de que los materiales paleógenos fueran explotados ya como acuífero, o sobre todo como reservorio de almacenamiento de sustancias de rechazo de diversos procesos industriales (salmueras u otras).

Añadir por último, que es obvio que sin sondeos de control del Cretácico Inferior y del techo del Jurásico, la interpretación del Jurásico presentada en este trabajo, basada en pocas líneas sísmicas de mala calidad, está sometida a fuertes interrogantes.

4. Los límites impermeables del acuífero están bien establecidos (DPA, 2010). Al E-NE (afloramientos de Trías en facies Keuper de Finestrat) y en el borde occidental por el afloramiento del impermeable de base del Cenomaniense en el núcleo del anticlinal de Carcondo. Los límites estructurales N y S definidos en DPA, 2010, serían los cabalgamientos de Orcheta y Paleógeno, respectivamente, cuyos saltos aislarían el acuífero, lo que puede ser el caso del cabalgamiento al N, pero no del Paleógeno al S.
5. Las reservas resultantes totales estimadas para porosidades del 0.5% en los tres sectores estudiados son 5.95 hm³. Las reservas resultantes totales explotables son las siguientes:
 - La Pequerina: 4.20 hm³
 - Embalse de Amadorio: 0.15 hm³
 - Benienzo: 0.7 (reservas totales)

Estas reservas se refieren a los límites del acuífero establecidos en DPA, 2010, pudiendo ser ligeramente restrictivas, dado que el límite S del mismo se extiende más en esa dirección de lo que señala el mapa de DPA, 2010, aunque es complicado de establecerlo en la práctica por la ausencia de datos sobre el mismo.

6. Una aproximación al cálculo de reservas totales acuíferas del anticlinal de Cabezón del Oro, en los supuestos del modelo, arroja valores entre 8 hm³ y 18.45 hm³.

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, 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. 1980. Cartografía Geológica 1:50000, MAGNA. Hoja 847- Villajoyosa y memoria adjunta.
- IGME. 2010. Plan de Almacenamiento geológico de CO₂ del IGME. Plan ALGECO₂, Volumen IV-1 Cadenas Béticas y Cuenca del Guadalquivir - Geología. Fondo Documental del IGME, (Informe SID nº 64051). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- IGME-ENAGAS. 1995. Viabilidad de almacenamientos de gas. Hojas 72-73. Elche-Alicante (1:200.000). Resultados del análisis de la información geológica, hidrogeológica, minera y geofísica. Fondo Documental del IGME, (Informe SID nº 25089). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp
- Marín Lechado, C., Martos Rosillo, S., Pedrera Parias, A., García Lobón, J.L., Galindo Zaldívar, J. 2014. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE CARRASCAL-FERRER Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. (nº Informe SID por asignar).
- Martínez Abad, J.L. and Querol Muller, R. 1990. Documentos sobre la geología del subsuelo de España- Vol II- Béticas-Granada_guadalix/Baza-Murcia/Almeria-Alboran (Informe SID nº 29037).

Lucia, F.J. 1995. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. Am Assoc Petrol Geol Bull 79: 1275-1300.

Rey Moral, C., García Lobón, J.L., Marín Lechado, C., Reguera García, M.I., Jiménez Sanz, A. 2013. MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE MEDIODÍA Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64104). http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/ConsultaSID/Index.asp

Robins, N.S., Rutter, H.K., Dumbleton, S., Peach, D.W. 2004. The role of 3D visualisations 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.

SIGECO. Geological Information, System, Geophysical database [on line] (2012).IGME. Editor: J. Navas. Available in: <http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htm>

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. INTERPRETACIÓN SÍSMICA

Línea BT-7: ver página siguiente, figura 21.

Línea RV-87-02. Se han suavizado los horizontes y ajustado mejor a las trazas de los reflectores en las secciones, además de haber completado la serie con los horizontes que no aparecían en la interpretación antigua (Triásico y Paleozoico). Las Fallas también han sido reajustadas a las secciones tratadas en Kingdom Suit®.

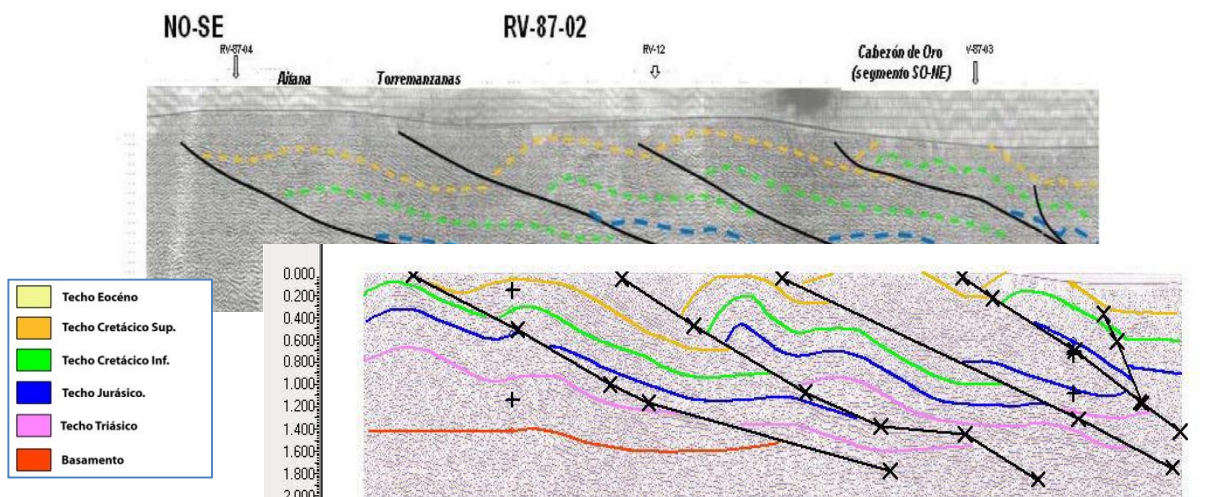


Figura 22. Sección sísmica RV-87-02. (10 km.). Arriba: Interpretación IGME (2010). Abajo: interpretación consistente revisada en TKS (2013).

La escala de tiempo doble viene dada en segundos. El color marrón indica techo de estratos de edad terciaria, verde techo cretácico, azul techo jurásico, rosa del techo de triás salino y rojo al techo del basamento. Se puede observar que para una velocidad de migración de 3500 m/s, los reflectores cretácicos a 0,1s de tiempo doble, le corresponden 175m de profundidad, en zona norte; mientras que, según nos acercamos a la costa, profundizan, llegando a los 0,8s de tiempo doble (equivalentes a 1400m de profundidad) cerca del cabalgamiento de la Macaroba. Esta tendencia se repite para el resto de reflectores, incluidos los del Jurásico que pasa de una profundidad de 2100m en Cabezón de Oro (1,2s tiempo doble). Sin embargo, con cada cabalgamiento vuelven a ser más superficiales y van profundizando, de nuevo. Nótese como puede apreciarse, en la sección, la verticalidad de la falla de Orxeta, donde el Cret. se sitúa a 840m-927m de profundidad y el Jurásico a 1417-1680m a cada lado del cabalgamiento

RV-87-01. Esta sección ha sido la que menos reinterpretación ha necesitado; los cambios solo fueron los necesarios para ajustar los horizontes a las otras secciones que la intersectan.

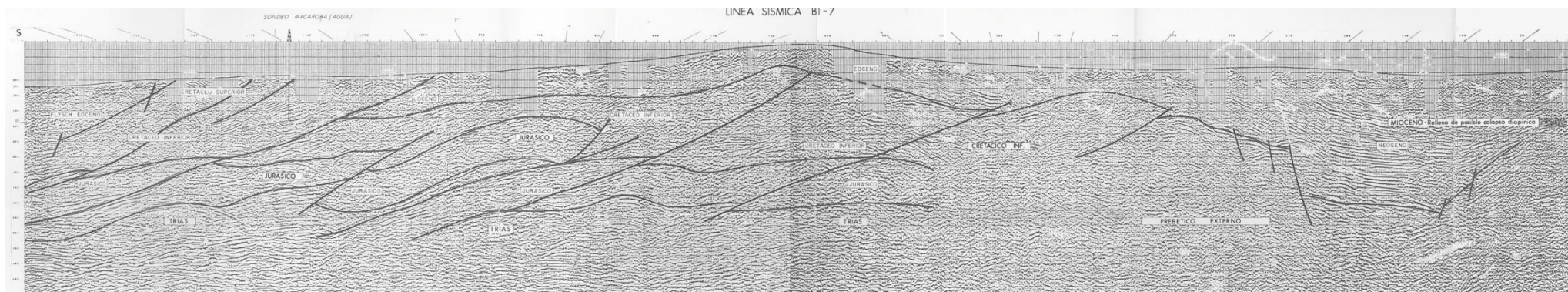


Figura 21. Línea sísmica BT-7 (50 km de longitud) Interpretación de Querol (J.L. Martínez Abad y R. Querol Muller, Documentos sobre la geología del subsuelo de España; 1990. Código SID nº 29037).

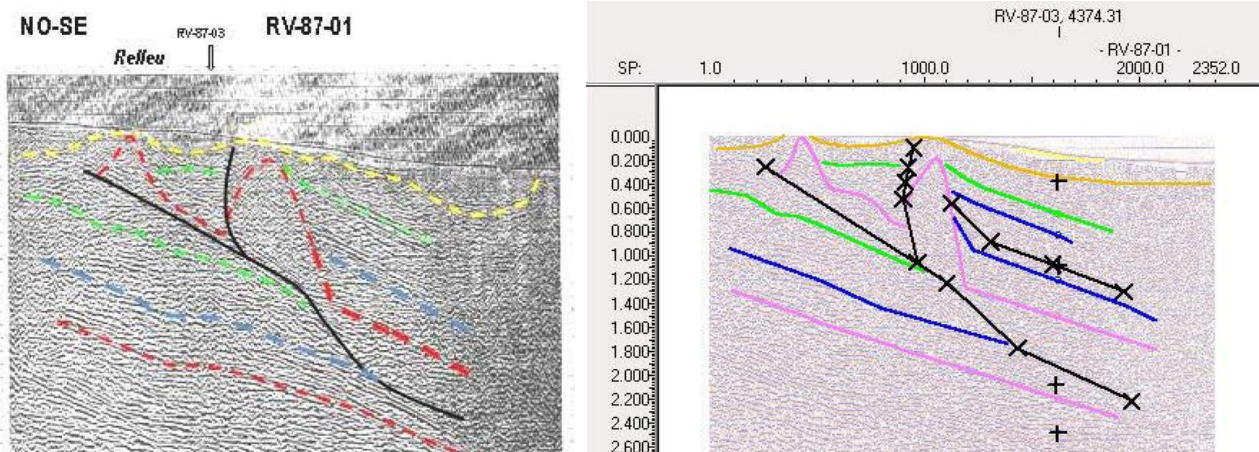


Figura 23. RV-87-01. (18 km.): Interpretación IGME (2010), izquierda, e interpretación revisada en TKS (2012), derecha.

La sección RV-87-01 muestra la tendencia a profundizar según nos desplazamos al sur (costa), y más somera en los sucesivos cabalgamientos en serie, pero a diferencia de las BT-7 y RV-87-02; se interpretan domos salinos a consecuencia del ascenso del Keuper infrayacente: se visualizan dos domos diferenciados, a consecuencia de un cabalgamiento profundo, por la tectónica compresiva; y otra falla inversa, verticalizada, posiblemente a causa de la tectónica salina. Las profundidades del Trías salino son variadas, debido a la naturaleza plástica del mismo, favorecida por las fracturas inversas y cabalgamientos que la propician; pasando de aflorar en superficie a alcanzar varios km de profundidad para depósitos que no han ascendido. El resto de reflectores tienen la tendencia a profundizar hacia la costa. El cretácico más somero ronda los 350m y el más profundo los 1750m; mientras el jurásico más profundo (SE) se sitúa a unos 2800m y el más superficial a 850m.

RV-11V. Esta sección ha tenido que ser reinterpretada casi por completo, ya que en la interpretación del 2010+ situaba el diapiro salino del Trías varios km más al NO, de donde se encuentra en el mapa geológico y consecuentemente ha habido que ajustar todos los demás horizontes.

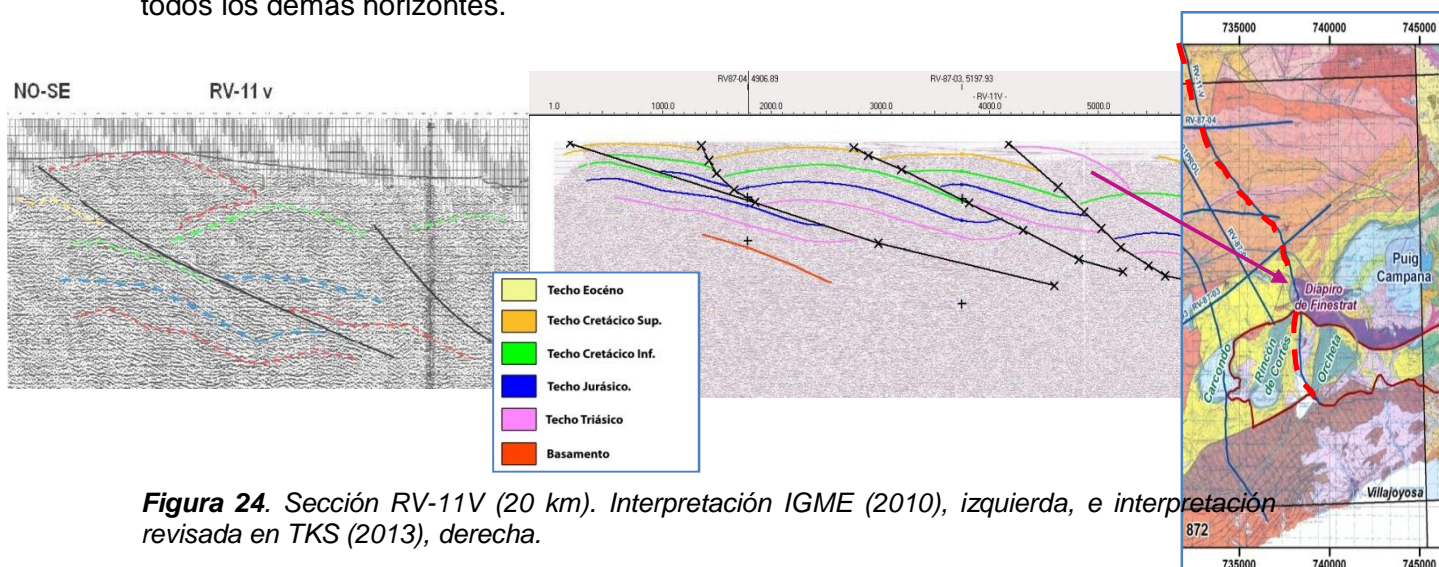


Figura 24. Sección RV-11V (20 km). Interpretación IGME (2010), izquierda, e interpretación revisada en TKS (2013), derecha.

La estructura interpretada es la que se repite en todas las anteriores secciones. Secuencia de cabalgamientos NO-SE con profundización de los reflectores hacia el sur y la aparición de diapiros salinos al SE. En este caso es el Diapiro de Finestrat (detalle de figura 1). En cuanto a los horizontes cretácicos, siguen con la tendencia de las anteriores; con profundidades de 350-450m, en cabalgamientos más altos y de 1750m al E, en su punto más profundo. El jurásico se encuentra a 1050m de profundidad al NO y a 2625m al SE.

RV-87-03. Las secciones sísmicas que discurren dirección E-W (ésta y la siguiente) presentan dificultad de interpretación, ya que las láminas cabalgantes vergen hacia el NO, por lo que no se puede llevar control de las fallas que limitan las láminas, como en las anteriores. En el caso que describimos ahora, se ha mantenido la estructura del anticlinal del Cabezón de Oro, sobre la falla inversa y con afloramiento de materiales Jurásicos, descritos anteriormente, coincidiendo en gran medida con la interpretación antigua. Sin embargo en la segunda parte de la sección situada más al Este de la hoja geológica ha debido obviarse la interpretación anterior y se ha representado como un conjunto de fallas inversas cabalgantes, así como considerar ascensos de los materiales salinos del Trías a favor de las fallas; para correlacionar coherentemente las secciones que la cruzan y ésta misma (todas las descritas y la RV-11).

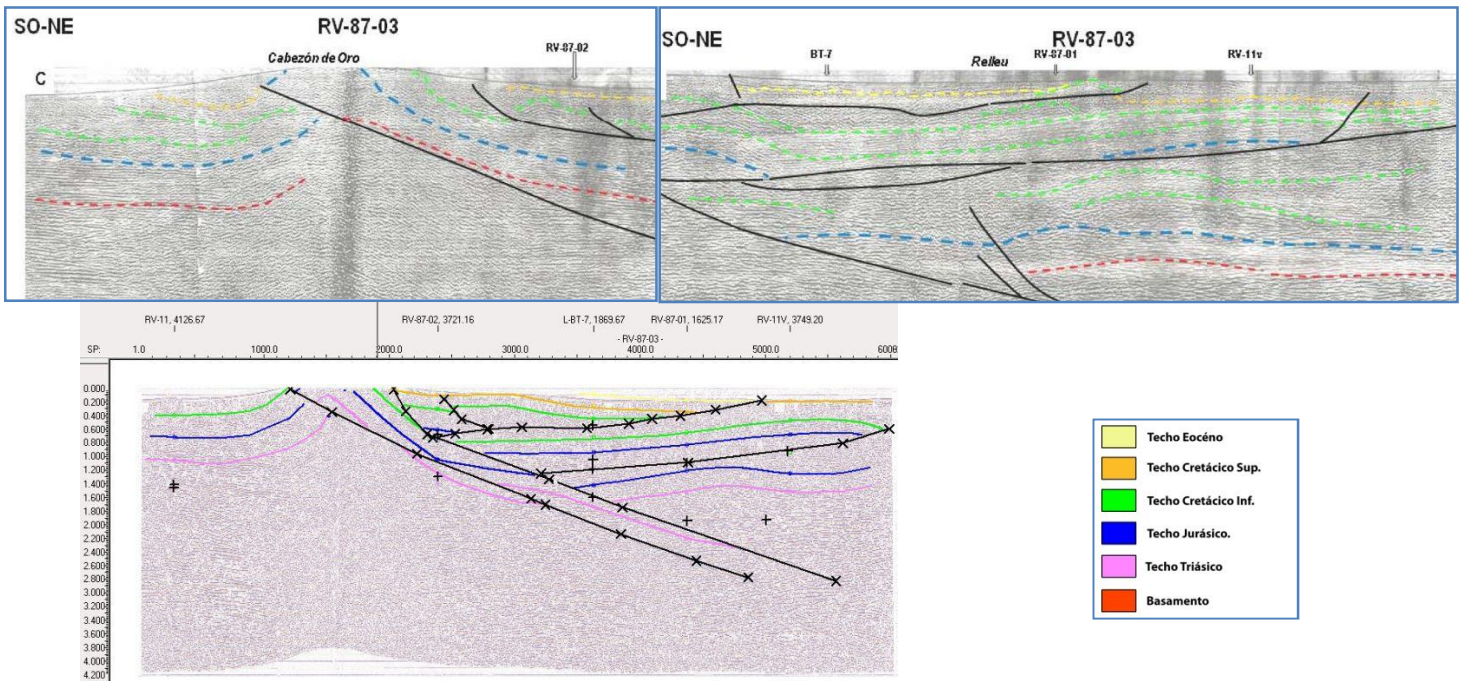


Figura 25. Sección RV-87-03. (20 km) Interpretación IGME (2010), izquierda, e interpretación revisada en TKS (2013), derecha.

En la sección sísmica se aprecia fácilmente el Anticlinal de Cabezón de Oro, producido por un diapiro, formado por material del Keuper salino, posteriormente afectado por la tectónica compresiva general de toda la zona; dando lugar a una familia de fallas inversas, una de ellas afectándolo de pleno; y otra de sentido opuesto a éste.

RV-11. En la sección que ahora nombramos se ha seguido el mismo principio que con la anterior, si bien, al no discurrir sentido E-W, sino N-S no es cruzada por tantas líneas como la RV-87-04 y no disponemos de tantos puntos de control como la anterior, para los horizontes. Sólo es cruzada por las dos líneas sísmicas que atraviesan la zona E-W y casi en los extremos de esta, por lo que la zona intermedia de la RV-11 es solamente supuesta, aunque se sigue manteniendo la geometría de los potentes materiales de Cretácico y Jurásico en ella.

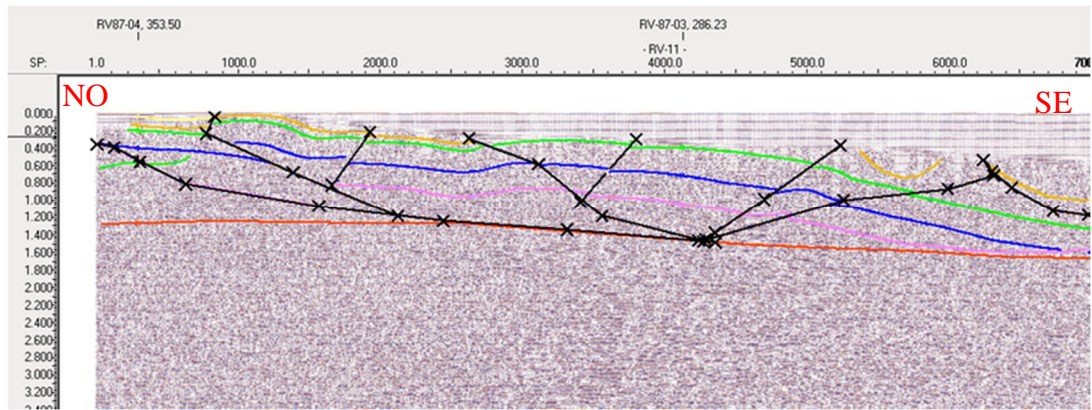


Figura 26. Sección RV-11. (25 km). Interpretación IGME (2010), izquierda, y revisada en TKS (2013), derecha.

Esta sección, situada más al O de cuantas se han tenido en cuenta para el estudio, presenta a diferencia de las anteriores, un mayor número de fallas normales y una gran falla inversa a gran profundidad, que partiendo del Paleozoico, sirve de nivel de despegue al Trías salino, sobre el que se deposita el Jurásico y materiales suprayacentes, originando un solo cabalgamiento, pero sí varios pliegues. Los reflectores de interés del cretácico, alcanzan una profundidad de unos 2275 m al S y 175 m en el cabalgamiento, al N; mientras que el jurásico pasa de 525 m en el cabalgamiento, a 2625 en la zona más profunda.

En resumen: la sísmica describe bien la tectónica comprensiva, sufrida en la zona, con esfuerzos tectónicos en dirección NO-SE, con la consecuente aparición de fallado en dirección SO-NE y cabalgamientos y la formación de pliegues y cubetas entre las mismas. Estas fallas favorecieron el ascenso del Trías Salino, formando Diapiros.

La conversión tiempo-profundidad (tabla VII) se ha realizado apoyándose en los datos de velocidad RMS de cada línea con una corrección de la misma de un 20% menos, para compensar la sobrestimación.

Tiempo TWT (ms)	Profundidad (m)	Velocidad RMS m/s
35	61	3500
77	150	3900
220	430	3910
375	740	3950
450	896	3980
550	1100	4000
600	1230	4100
700	1450	4150
800	1680	4200
820	1722	4200
950	1996	4200
1100	2365	4300
1400	3080	4400
1600	3560	4450
1800	4050	4500

Tabla VII. Tiempo Doble-Profundidad

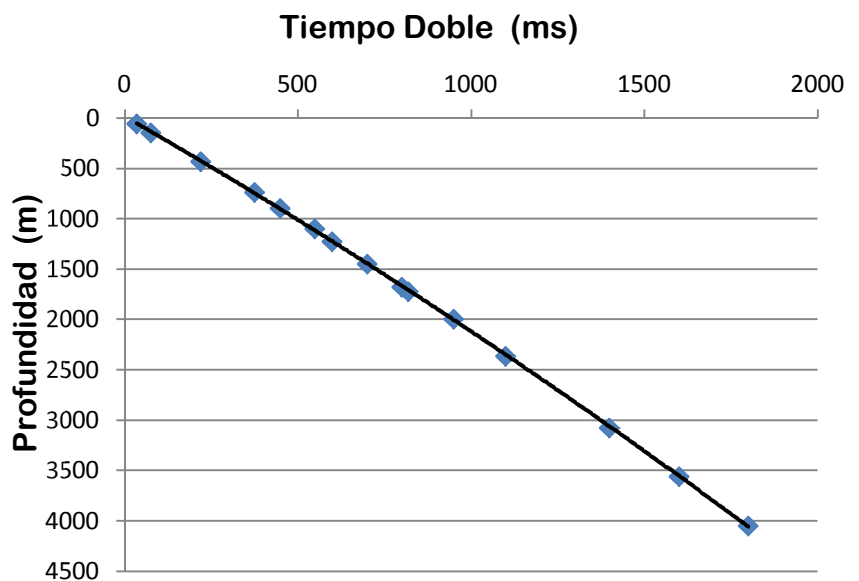


Figura 27. Gráfico conversión tiempo doble Profundidad de la Línea BT-7

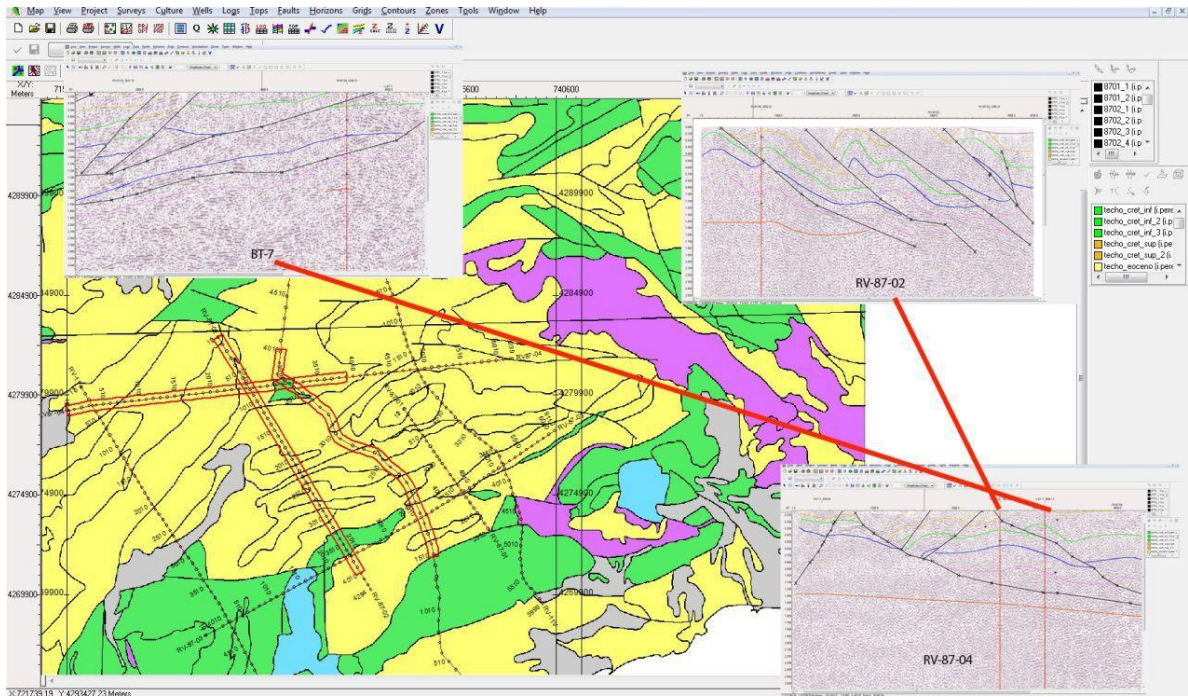
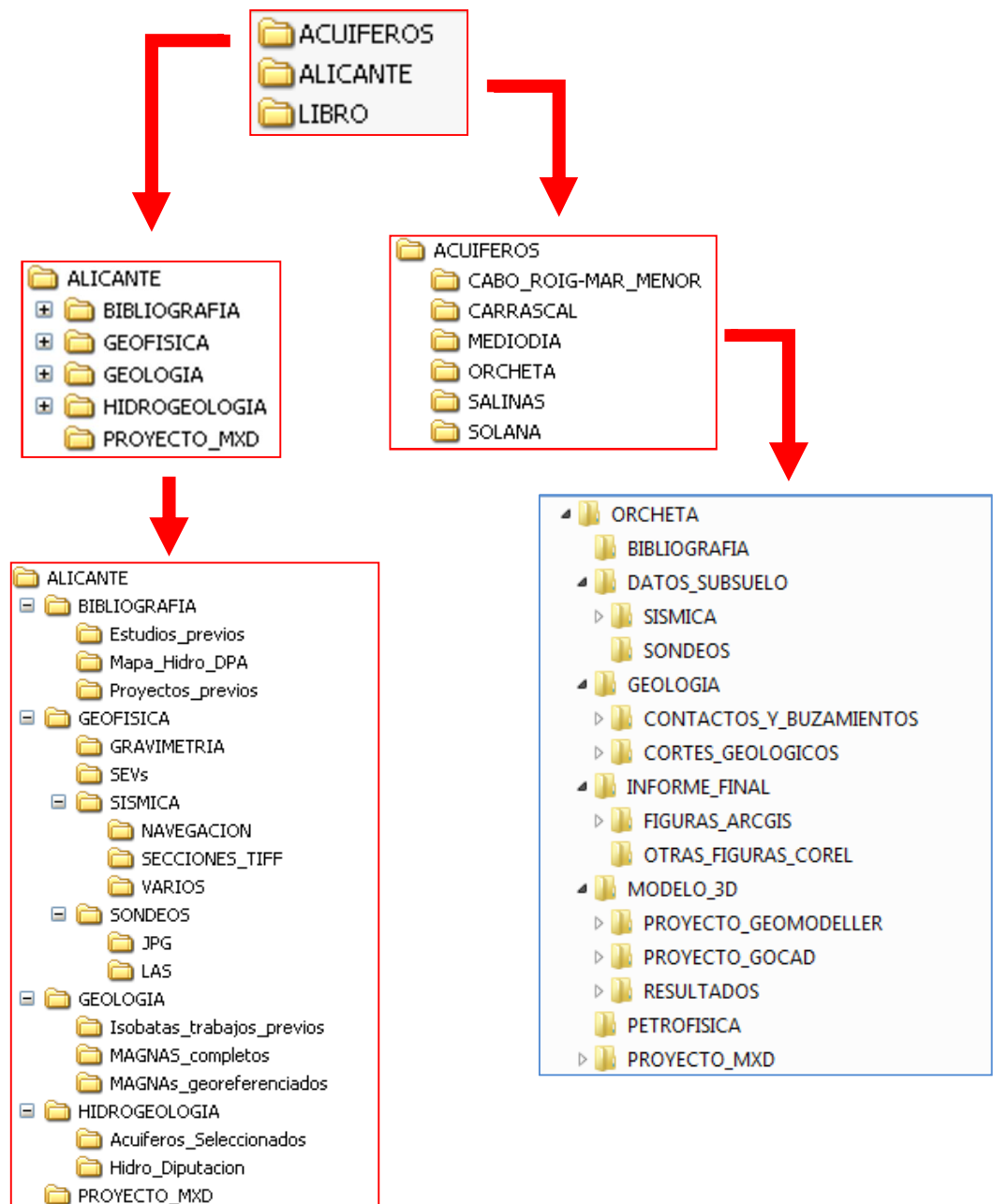


Figura 28. Detalle del cruce de secciones para interpretación continua (consistente) de horizontes sísmicos.

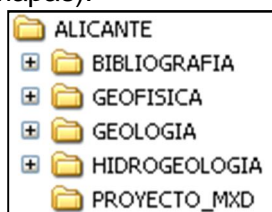
ANEXO II. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL

1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL



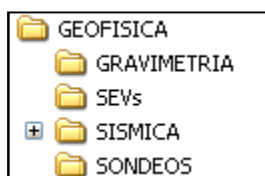
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE


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.

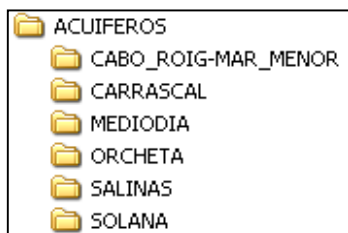
 **Estudios_previos:** En ella se encuentran documentos PDF sobre los diversos acuíferos descritos en la provincia de Alicante. Además hay un archivo .doc que resume las zonas que comprenden dichos estudios y las figuras que hay en cada uno de los informes.

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.

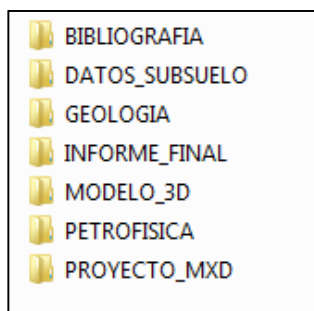
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO ORCHETA

La información digital del acuífero Orcheta 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 Orcheta 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, fotografías de campo, etc.

 **CORTES_GEOLOGICOS** Cortes empleados en la modelización en diferentes formatos (MXD, .shp, JPG, .xlsx, etc.).

 **CONTACTOS_Y_BUZAMIENTOS** Contactos y buzamientos introducidos en el modelo 3D (.shp, .csv)


PROYECTO_MXD


Proyecto MXD generado durante el estudio, junto con sus archivos (MDT, cortes, sondeos, 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 Orcheta. Contiene a su vez las siguientes carpetas:

SISMICA

 **NAVEGACION** En esta carpeta están los archivos .sis, .txt, etc. con la navegación de las líneas sísmicas.

 **PERFILES_IMAGENES** Las imágenes TIFF de las secciones sísmicas.

 **PROCESADO** Las velocidades RMS, los archivos Excel del cálculo de la ley de velocidad, los archivos de los reflectores interpretados en tiempo y velocidad, etc.


 **SONDEOS** Información sobre los sondeos de la zona (hojas Excel con los sondeos y PDF).


PETROFISICA


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


MODELO_3D

 **PROYECTO_GEOMODELLER** Proyectos del modelo 3D en GeoModeller del acuífero Orcheta.

 **PROYECTO_GOCAD** Proyecto Gocad con todos los objetos modelizados del acuífero Orcheta (superficies, sondeos, sísmica, sgrid, etc.).

 **RESULTADOS** El modelo 3D se puede abrir directamente desde Geomodeller y desde Gocad. Sin embargo, el modelo 3D no se puede examinar si no se dispone del software específico. Existen unos productos derivados del modelo como cortes geológicos al modelo, 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** Mapas de isobatas de las superficies modelizadas en MXD (.shp).

 **SUPERFICIES** Superficies modelizadas en formato .asc y .xyz.

INFORME_FINAL

Informe final del acuífero Orcheta y las figuras del informe en formato JPG, así como otras figuras en formato CorelDraw.

4. LISTADO DE FICHEROS

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