

# HIDROGEOLOGÍA Y RECURSOS HIDRÁULICOS

Tomo **XXX**

## X SIMPOSIO DE HIDROGEOLOGÍA



**GRANADA**

**16-18 de Octubre de 2013**

Comité de Honor

Comité Organizador

Comité Local

Entidades Patrocinadoras y Colaboradoras

**Índice**

Conferencias, Ponencias y Mesas Redondas

Presentación



NIPO: 728-13-026-7  
ISBN: 978-84-7840-914-3



MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico y Minero de España

# PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESERVAS HÍDRICAS EN ACUÍFEROS PROFUNDOS MEDIANTE MODELIZACIÓN GEOLÓGICA 3D. APLICACIÓN AL ACUÍFERO DE CARRASCAL-FERRER (ALICANTE)

MARÍN-LECHADO, Carlos<sup>(1)</sup>; MARTOS-ROSILLO, Sergio<sup>(1)</sup>; PEDRERA, Antonio<sup>(2)</sup>; FERNANDEZ-LEYVA, Concepción<sup>(1)</sup>; GARCÍA-LOBÓN, José Luís<sup>(1)</sup>; GALINDO-ZALDÍVAR, Jesús<sup>(2,3)</sup>, RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, Luís<sup>(4)</sup> y LÓPEZ-GETA, Juan Antonio<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España  
<sup>(2)</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC)  
<sup>(3)</sup> Universidad de Granada  
<sup>(4)</sup> Diputación provincial de Alicante

**Palabras clave:** hidrogeología profunda, curva de reservas, sistema poroso, acuífero carbonatado, 3D Geomodeller, Gocad.

## RESUMEN

El acuífero de Carrascal-Ferrer, situado en el noreste de la provincia de Alicante, está formado por calizas y dolomías de edades comprendidas entre el Aptiense y el Aquitaniense con un espesor medio del orden de 1.400 m. Presenta una estructura geológica compleja, afectada por pliegues de dirección variable, cortados por fallas inversas y de salto en dirección. En esta comunicación se presenta un desarrollo metodológico para la modelización geológica 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer, mediante la integración de datos de superficie y subsuelo implementada en los códigos *3D Geomodeller* y *Gocad*, y se evalúan sus reservas totales de agua subterránea.

El modelo geológico 3D realizado incorpora como datos de entrada: líneas sísmicas, datos procedentes de sondeos y abundante información estructural. Los resultados conseguidos han permitido mejorar el conocimiento de su estructura y geometría profunda; además, se ha puesto de manifiesto su posible conexión lateral con diferentes sectores de los acuíferos de Cocoll, Sierra de Aixortá y la Depresión de Benissa. Las unidades modelizadas permitirán construir futuros modelos matemáticos de flujo y transporte, evaluar las reservas potencialmente explotables y definir, entre otros aspectos, los sectores más favorables para la captación de reservas de agua en situaciones de emergencia.

## 1.- INTRODUCCIÓN

En el marco del Convenio “Acuerdo específico en cooperación 2010-2013, en materia de aguas subterráneas”, entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Diputación provincial de Alicante (DPA) se incluyó la actividad

“Desarrollos metodológicos en geología del subsuelo para la caracterización de recursos hidrogeológicos profundos de Alicante” cuyos resultados parciales se presentan en esta comunicación.

Los objetivos fundamentales de este trabajo han consistido en establecer una metodología para la modelación geológica 3D de este tipo de acuíferos carbonatados con buena exposición superficial y escasos datos de subsuelo, y el cálculo del volumen total de reservas hídricas subterráneas del acuífero de Carrascal-Ferrer, en particular.

Desde el punto de vista metodológico, el acuífero de Carrascal-Ferrer representa a diferentes acuíferos alicantinos en los que existe poca información geofísica y una buena exposición geológica en superficie, lo que permite la toma de abundantes datos estructurales.

## 2.- CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

El acuífero de Carrascal-Ferrer se sitúa al noreste de la provincia de Alicante. Ocupa un área de 120 km<sup>2</sup> y lo forman las sierras de Carrascal, Ferrer y el sector occidental de la Sierra de Bernia.

Desde el punto de vista geológico, se localiza en el Prebético interno de las Zonas Externas de la Cordillera Bética. La sucesión estratigráfica (Figura 2) comprende rocas de edad triásica a cuaternaria. Las rocas triásicas están formadas principalmente por evaporitas y arcillas y afloran en la actualidad gracias a la formación de diapiros. El Jurásico no aflora en el sector estudiado, sin embargo, están expuestas calizas y dolomías de esa edad algunos kilómetros hacia el sur en los núcleos de los anticlinales. El Cretácico inferior de la región está formado por calizas arrecifales, calizas orgánicas y margas. La unidad cretácica más antigua que aflora en el área es de edad Barremiense. Las rocas del Cretácico superior, ampliamente expuestas en la zona de estudio (Figura 1), consisten en calizas y margocalizas intercaladas con depósitos margosos. La sedimentación paleocena en aparente continuidad con el Cretácico superior, está representada por margocalizas hemipelágicas y margas. Las calizas y margas del Eoceno superior-Oligoceno también se depositaron en medios sedimentarios de plataforma y talud y se encuentran discordantes sobre las rocas mesozoicas y paleocenas. La secuencia del Oligoceno superior y Neógeno se depositó sincrónicamente al desarrollo del plegamiento y por lo tanto incluyen variados medios sedimentarios con importantes variaciones laterales de facies. En el Prebético, la dirección estructural general es ENE-OSO pero incluye frecuentes estructuras oblicuas y sectores arqueados como ocurre en el sector estudiado (Figura 1). Los anticlinales están en su mayoría nucleados sobre evaporitas triásicas y calizas, formando comúnmente pliegues con vergencia norte y geometrías en caja, con flancos muy buzantes a invertidos (Roca et al., 2006). El acuífero de Carrascal-Ferrer presenta una estructura geológica formada por una gran sinforma limitada al norte, este y sur por antiformas que permiten aflorar a las rocas cretácicas a lo largo de sierras de orientaciones variables (Figuras 1 y 3).



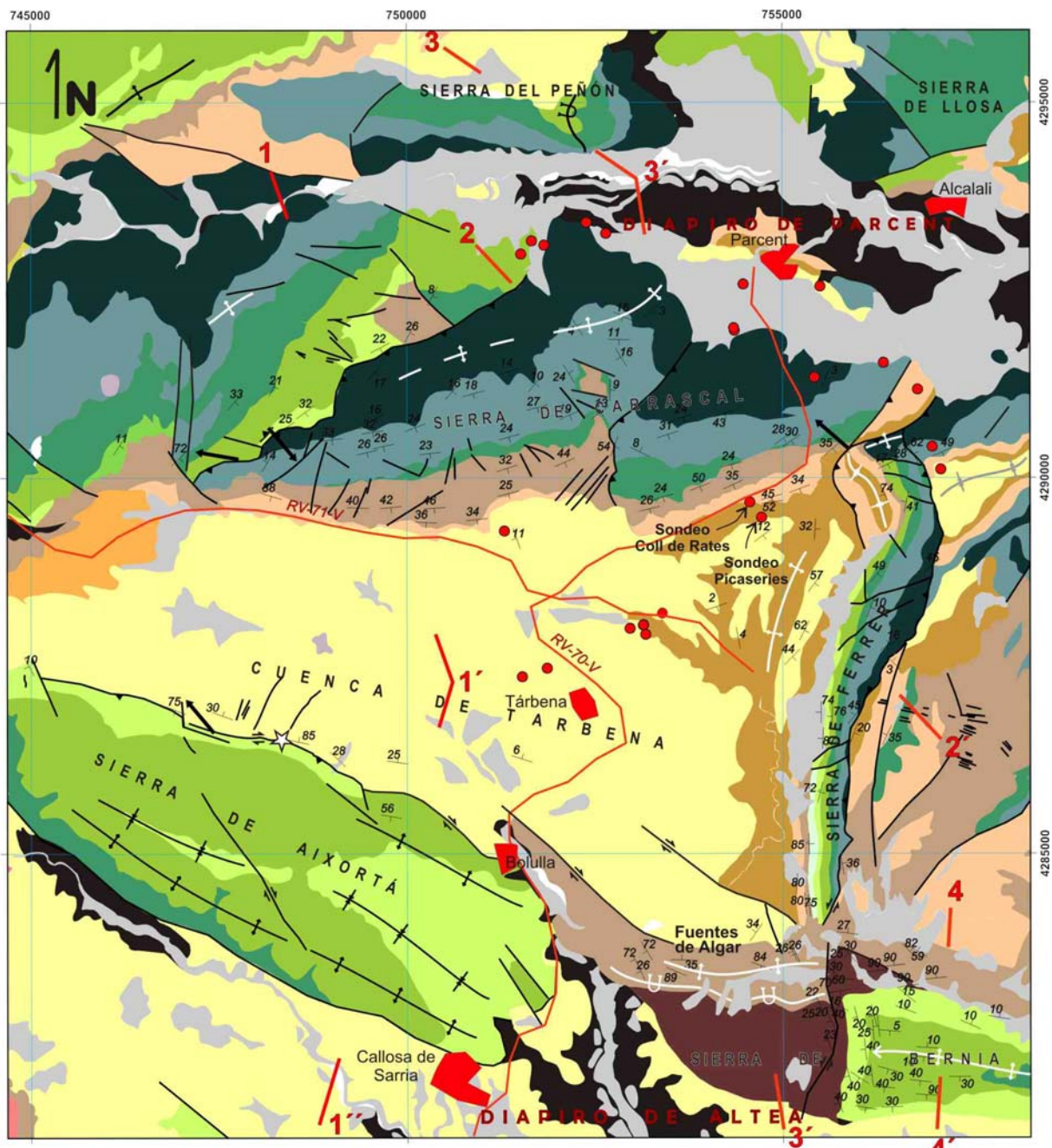
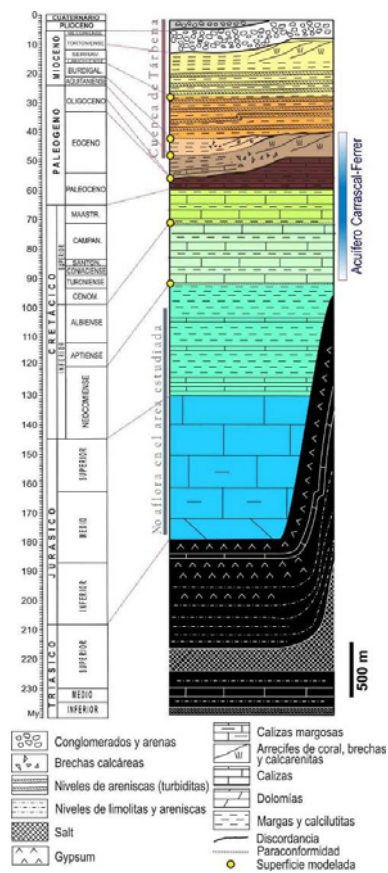


Figura 1. Mapa geológico de Carrascal-Ferrer. Se ubican sondeos y líneas sísmicas RV-70-V y RV-71-V. A partir de revisión del MAGNA 822 (IGME, 2008).

Las formaciones permeables que dan lugar al acuífero de Carrascal-Ferrer son de naturaleza carbonática; presentan edades comprendidas entre el Aptiense y el Aquitaniense. Entre estas formaciones permeables destacan los tramos calizos Aptiense medio y superior y del Cenomaniense-Turoniense, que afloran en las



sierras de Carrascal y Ferrer, las calizas senonenses y las calizas detríticas pararrecifales del Oligoceno al Aquitaniense.

El carácter abierto o cerrado de los límites hidrogeológicos laterales del acuífero de Carrascal-Ferrer es complejo, sin embargo, la realización del modelo 3D ha permitido conseguir una notable mejora en su conocimiento. La proyección en superficie del techo y el muro del acuífero de Carrascal-Ferrer permite comprobar que tiene una forma de triángulo isósceles con su lado menor dispuesto hacia el este. El área total del acuífero es de 119 km<sup>2</sup>, de los que 29,6 km<sup>2</sup> corresponden a afloramientos permeables.

Figura 2. Columna estratigráfica del área estudiada. Los círculos amarillos indican los límites estratigráficos que conforman las superficies de referencia reconstruidas en el modelo 3D del acuífero.

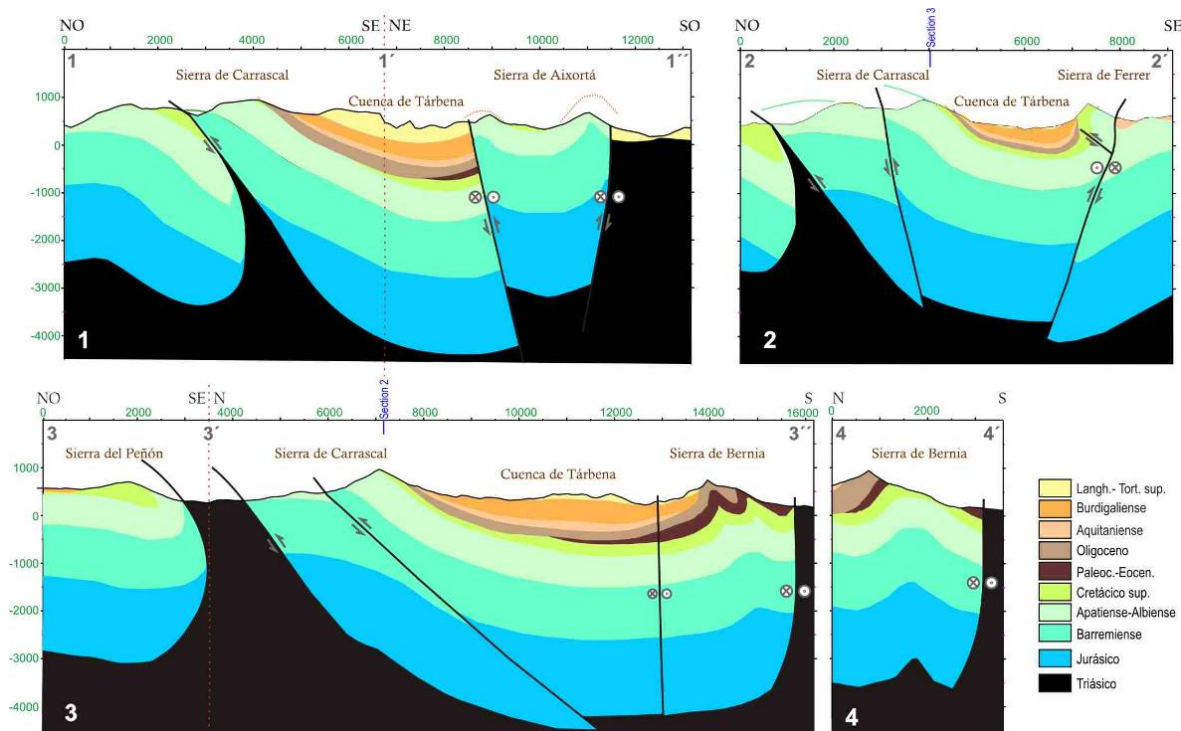


Figura 3. Cortes geológicos del 1 al 4 indicados en la figura 1. Los cortes han sido contruidos a partir de la interpretación sísmica y el modelo geológico 3d.



### 3.- METODOLOGÍA

Para el cálculo del volumen de reservas totales del acuífero se ha realizado un modelo 3D, en el que se han utilizado los códigos *Gocad* y *3D GeoModeller*. En la tabla 1 se resumen los datos utilizados para la elaboración del modelo.

Tipo	Datos	Descripción	Fuente
Superficie	Cartografía geológica	hojas 822 (Benisa) y 848 (Altea)	Magna, fotointerpretación y cartografía en campo
	Datos estructurales	147 medidas de dirección y buzamiento de la estratificación	Fotointerpretación y medidas de campo
	Ortofotografía/MDT	210 km <sup>2</sup> de ortofotografías con 0.5 m de resolución. MDT de 10 m de resolución.	Instituto Geográfico Nacional
Subsuelo	Cortes geológicos	9 cortes	Elaboración para este estudio
	Sondeos	28 sondeos	DPA
	Líneas sísmicas	RV-71-V y RV-70-V. 30 Km. de líneas a interpretar.	Campaña RV (1984-85)

Tabla 1. Datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de Carrascal-Ferrer.

La secuencia metodológica utilizada en la construcción del modelo se representa en la figura 4.

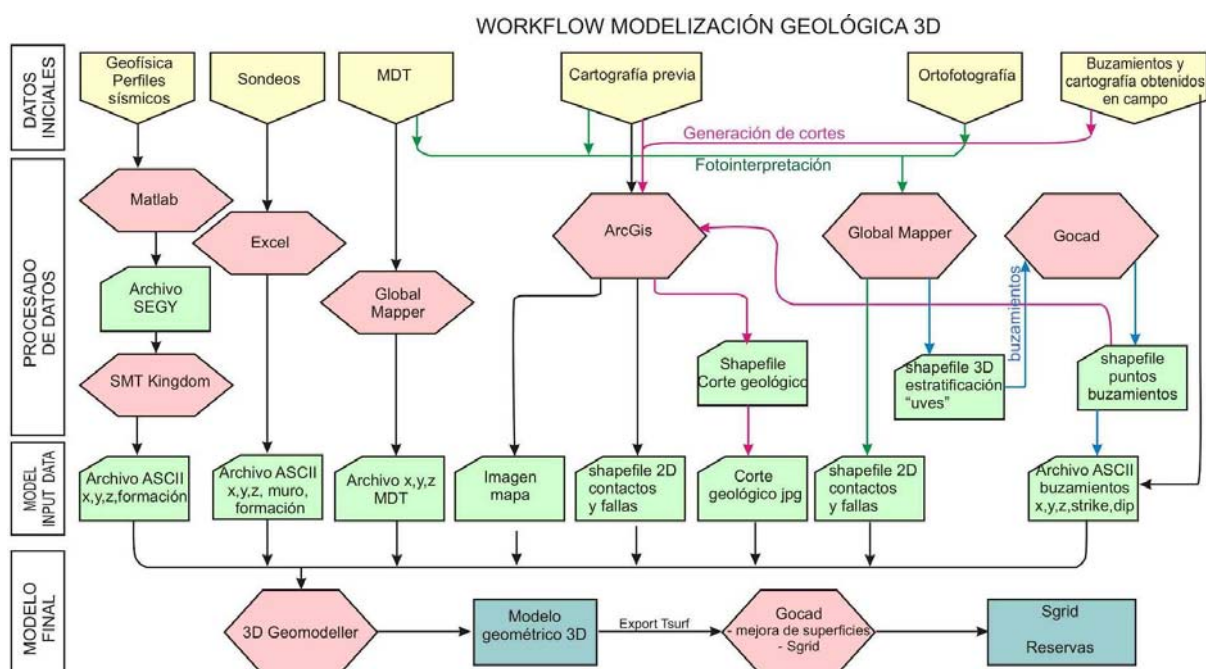


Figura 4. Diagrama de flujo para la realización del modelo geológico 3D de Carrascal-Ferrer.

Para la interpretación de los perfiles sísmicos, que se encuentran originalmente en formato analógico (imagen *tif* escaneada del papel), en la base de datos geofísica

del IGME, se ha realizado una transformación al formato digital *seg-y*. Al no existir ningún sondeo profundo con datos de velocidad, se ha realizado una transformación tiempo-profundidad a partir de las velocidades NMO generadas en el procesado sísmico. Posteriormente, los horizontes sísmicos interpretados (Figura 5) se exportan a un archivo ASCII (x, y, z, formación) y se incluyen en el programa de modelización *3D Geomodeller*.

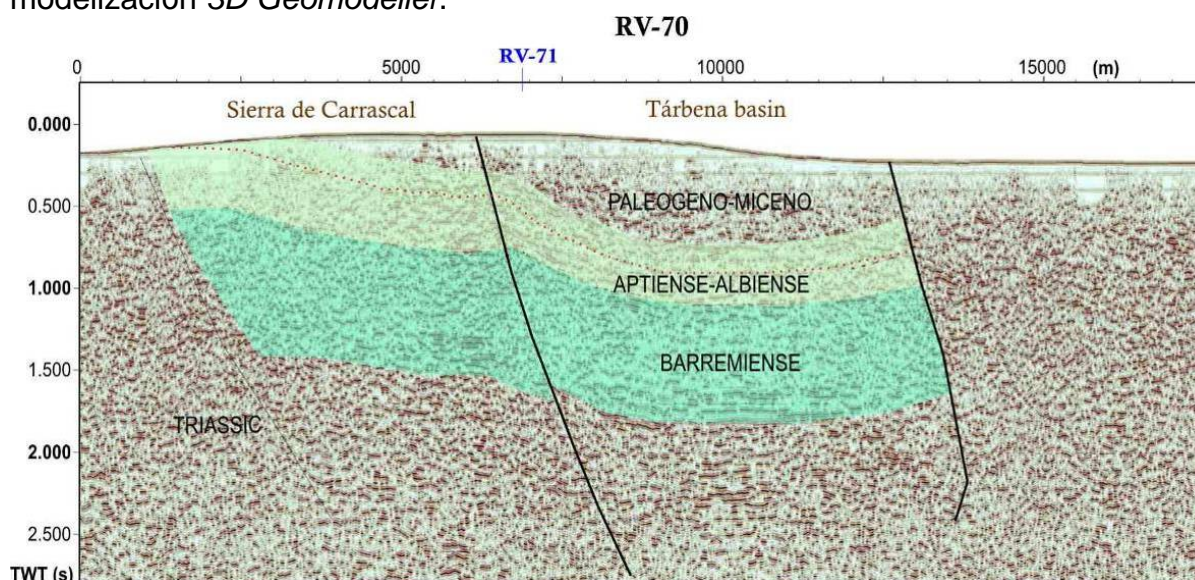


Figura 5. Perfil sísmico RV-70 e interpretación.

Otro de los datos de entrada al modelo 3D es la superficie topográfica que en *3D Geomodeller* es una sección especial sobre la que se proyectan los contactos y fallas cartográficas así como los datos de orientación y buzamiento. El modelo digital del terreno (MDT) utilizado tiene valor de cota topográfica cada 10 metros.

La cartografía geológica ha sido incorporada a *3D Geomodeller* como una imagen georeferenciada, sobre la que se han digitalizado los contactos y fallas. También se han incorporado los nuevos contactos cartografiados como archivos *shapefile*. Los nueve cortes realizados integran la información cartográfica (contactos, fallas y buzamientos) y de sondeos. Para la realización de los cortes se utilizan las herramientas *CrossSectionTool* (Thoms, 2011) y *x\_section\_xacto\_v.1*, respectivamente, que funcionan en ArcGis. En el proceso de fotointerpretación se visualizan las superficies de estratificación sobre el MDT. Al digitalizar estas superficies se obtiene una línea 3D que se corresponde con la intersección de la estratificación con la topografía. Las líneas 3D se importan al programa *Gocad* y se obtienen los planos de estratificación que se ajustan a estas líneas (Figura 4). Mediante este procedimiento se han conseguido 97 nuevos datos de dirección y buzamiento de la estratificación. El conjunto de datos de buzamiento se importan en *3D Geomodeller* como datos de entrada y condicionan la geometría de las superficies modelizadas.

Una vez importados todos los datos de subsuelo y superficie, el algoritmo de *cokriging* de *3D Geomodeller* permite construir un modelo geométrico 3D con las superficies de referencia que limitan a las siete unidades geológicas definidas.

Construidas estas superficies se podrán realizar los cálculos volumétricos necesarios para la estimación de las reservas del acuífero, con el programa *Gocad*.

En lo que se refiere a la caracterización del sistema poroso de las formaciones almacén y en relación con el cálculo del volumen de reservas de agua, en este trabajo se asume que en la matriz de la roca se concentra la práctica totalidad de la capacidad de almacenamiento del acuífero. Este hecho es evidente en los acuíferos detríticos y, según los estudios actuales, también lo es en los acuíferos de naturaleza carbonática (calizas y dolomías). En este sentido, las investigaciones más recientes ponen de manifiesto que las fracturas y los conductos kársticos proveen un escaso porcentaje de la capacidad de almacenamiento total de los acuíferos carbonáticos (Ahr 2008, Nelson 2001, Worthington 2007). Esta misma asunción se mantiene en los cálculos de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> (Bachu 2008, Eisinger y Jensen 2011) y en los proyectos de Almacenamiento Subterráneo y Recuperación (ASR) (Lowry y Anderson 2006, Vacher et al. 2006) para reservorios de formaciones carbonáticas.

Para el cálculo de la porosidad abierta se han recogido 51 muestras en campo a las que, tras un estudio petrográfico (lámina delgada) e identificación de sus principales propiedades petrofísicas, se les ha determinado la porosidad abierta mediante inmersión en agua en cámara de vacío, en el laboratorio del IGME, según el procedimiento UNE-EN 1936: 2007 (PTE-ET-041 E.8), que en esencia consiste en el procedimiento descrito por Borczak et al. (1990).

Las reservas totales de agua se han calculado considerando los volúmenes de roca saturada comprendidos entre la superficie piezométrica más alta (periodo de registro 1986-2013) y el techo y muro de las unidades acuíferas modelizadas. El modelo permite calcular, con el código *Gocad*, el volumen de acuífero saturado en carga (confinado) y el libre, a diferentes cotas piezométricas. Dichos volúmenes se han multiplicado por los percentiles 25 y 75 de la muestra estadística de porosidad abierta y por coeficientes de almacenamiento comprendidos entre 10<sup>-5</sup> y 10<sup>-6</sup>, en los sectores en carga. De esta forma se han calculado las curvas de reservas subterráneas que resultan de aplicar porosidades abiertas y los coeficientes de almacenamiento a diferentes cotas piezométricas. Por curva de reserva se entiende aquella función que expresa el volumen de reservas de un acuífero por debajo de una cota piezométrica determinada (López-Geta, 2004).

## 4.- RESULTADOS

### Modelo geológico 3D

El análisis y tratamiento de los datos geológicos de superficie y de subsuelo ha permitido reconstruir la geometría de siete unidades en un modelo geológico 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer (Figura 5). Las unidades geológicas modelizadas son las siguientes: i) Mioceno medio, ii) Burdigaliense, iii) Aquitaniense, iv) Oligoceno, v) Eoceno, vi) Cretácico superior – Paleoceno y vii) Aptiense – Albiense.



El modelo geológico 3D que resulta indica que el acuífero está limitado al norte por el muro de la unidad Aptiense-Albiense, que aflora en el núcleo de una amplia cresta anticlinal E-O. Hacia el noreste, lo limita el diapiro de Parcent, y, hacia el noroeste, una falla inversa que cabalga el Cretácico inferior sobre el Cretácico superior – Oligoceno de la Sierra del Cocoll. El límite oriental corresponde a la falla N-S que limita la Sierra de Ferrer con la Depresión de Benissa. Hacia el sur, el límite lo define el diapiro de Altea y al suroeste la falla inversa-dextra que pone en contacto la Sierra de Aixortá con la Cuenca de Tárben. El límite occidental del modelo es un límite arbitrario N-S que pasa al este de la población de Castell de Castells.

La posición del depocentro de la sinforma de la Cuenca de Tárben está bien caracterizada a partir de la línea sísmica RV-70-V y la interpolación de la geometría de la estratificación que aflora en las sierras de Carrascal, Ferrer y Bernia. Los sondeos que perforan este acuífero son en su mayoría poco profundos a excepción del Pozo Picaserís y el sondeo Coll de Rates (posición en figura 1). La profundidad máxima del techo del acuífero (unidad Aquitaniense) se encuentra a -435 m.s.n.m y el muro del acuífero (unidad Aptiense-Albiense) a -1800 m.s.n.m. El espesor del acuífero en el entorno de las poblaciones de Tárben y Bolulla es de unos 1350 m.

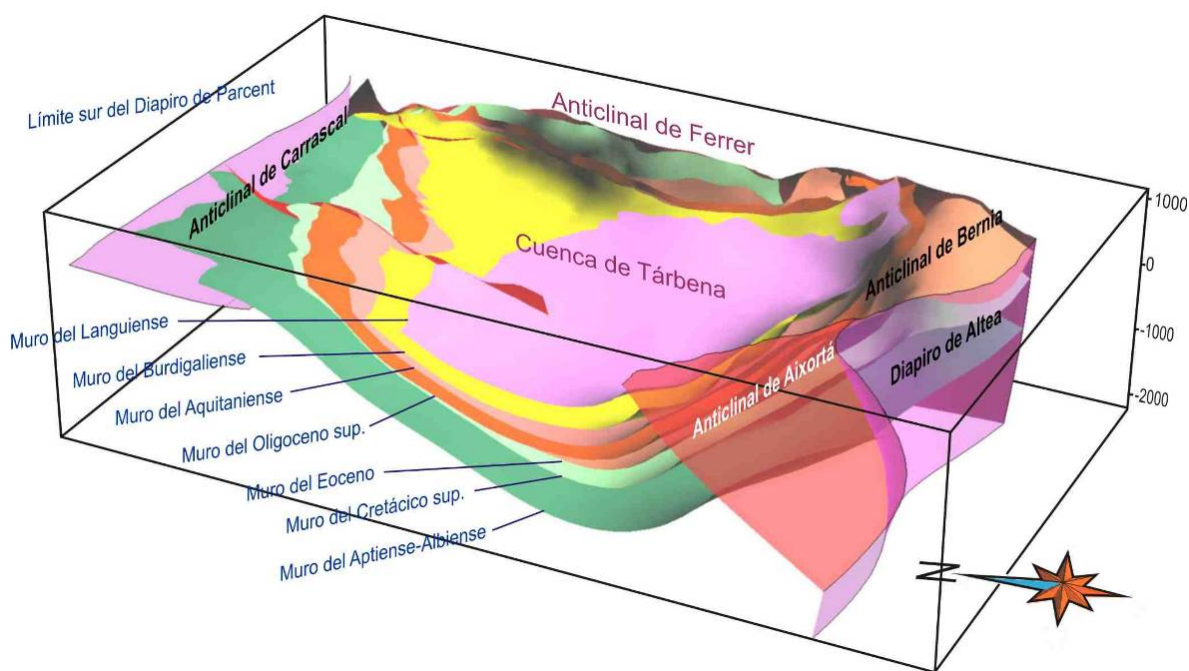


Figura 5. Vista 3D del Modelo Geológico 3D del Acuífero de Carrascal-Ferrer

La Unidad Oligocena muestra una evolución lateral de las facies de norte a sur, como resultado del levantamiento del anticlinal de Carrascal durante el Oligoceno superior (Figura 6). Las rocas del Oligoceno superior, con una potencia media de unos 180 m, se disponen discordantemente sobre el flanco sur del anticlinal de la Sierra de Carrascal y llegan a erosionar la mayor parte del Cretácico superior. Por el contrario descansan paraconformes sobre las rocas eocenas en el sur de la Sierra de Bernia y Fuentes del Algar.

La unidad eocena se restringe a la parte sur de la cuenca ya que fue erosionada en la mitad norte durante el levantamiento del anticlinal de Carrascal. La posición del límite erosivo bajo la cuenca de Tárbena ha sido estimada a partir de la geometría de la capa suprayacente erosiva y la capa infrayacente paraconforme. La unidad Cretácico superior – Paleoceno aflora en la Sierra de Bernia y alcanza potencias de 360 m. La mayor profundidad del muro se localiza a unos -1200 metros bajo el nivel del mar. La potencia media de la unidad Aptiense-Albiense es de 675 m y alcanza una profundidad máxima de -1800 m bajo el nivel del mar.

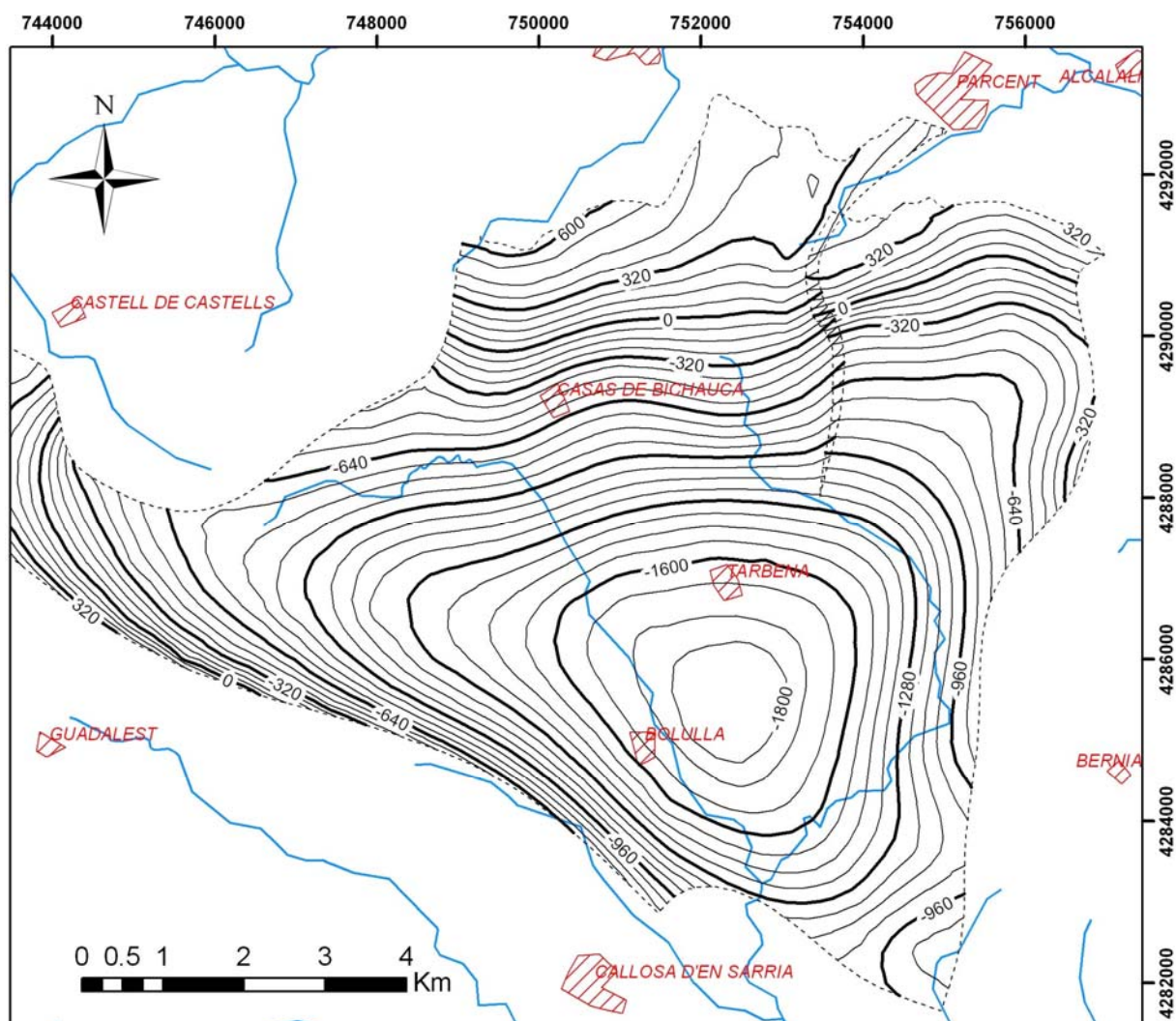


Figura 7. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Aptiense-Albiense (muro del acuífero Carrascal-Ferrer). Profundidad referida al nivel del mar.

### Capacidad total de almacenamiento

Los resultados de los ensayos de porosidad abierta a las 51 muestras realizadas se representan en la figura 8. La muestra estadística no se ajusta a una distribución normal, sin embargo el 88 % de las muestras presenta una porosidad menor del 3%. El valor medio de la porosidad abierta y la desviación estándar asociada es

1,35±1,50%. Por su parte, el valor de la mediana es de 0,8% y los percentiles 25 y 75 de 0,35 y 1,9 %, respectivamente.

Las reservas dinámicas, es decir, las que se almacenan por encima de la cota del principal punto de drenaje (Fuentes del Algar, 150 m s.n.m.), se han calculado superponiendo la piezometría de “aguas altas” al modelo 3D. Resultan, en la situación más desfavorable ( $p_0 = 0,35 \%$  y  $S = 10^{-6}$ ),  $6 \text{ hm}^3$ . Con la porosidad del percentil 75 ( $p_0 = 1,9\%$ ) y un coeficiente de almacenamiento de  $10^{-5}$  las reservas dinámicas son de  $19,4 \text{ hm}^3$ . Para calcular reservas a distinta cota piezométrica (curva de reservas, figura 9) se ha procedido de igual forma, desde la superficie piezométrica con mayor carga hasta la base del acuífero. No obstante, cuando el nivel piezométrico se encuentra por debajo de 150 m s.n.m., los cálculos se han realizado suponiendo que la superficie piezométrica es horizontal. Las reservas máximas obtenidas están comprendidas entre 224 y  $1218 \text{ hm}^3$ .

## 5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología para la modelización geológica 3D y para la evaluación de las reservas hídricas en acuíferos profundos con una serie de particularidades en lo que a la disponibilidad de información se refiere.

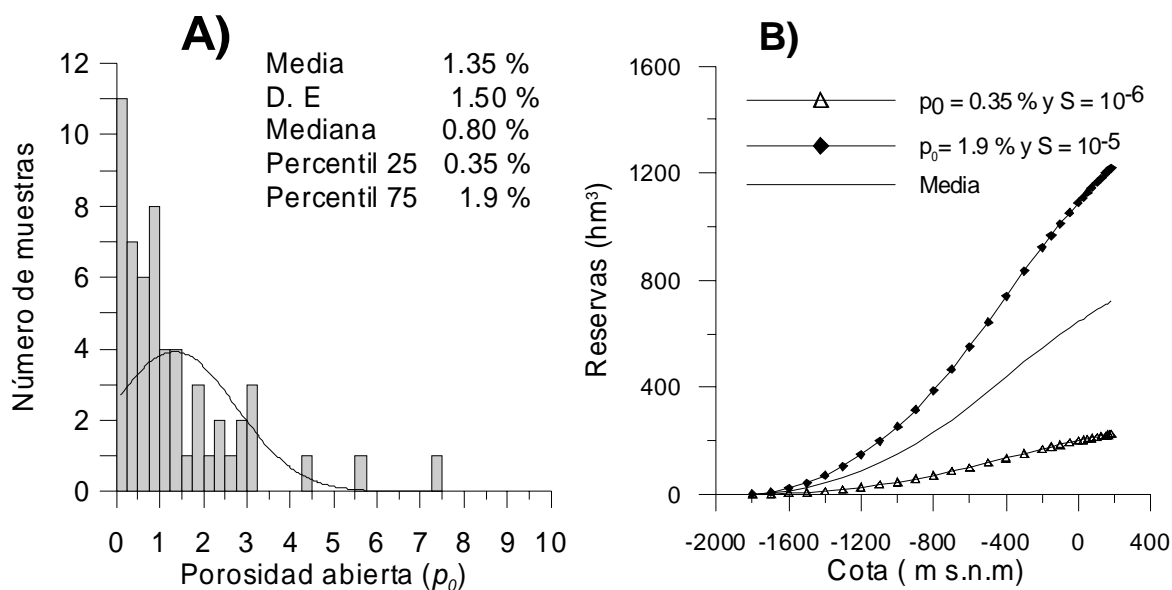


Figura 8. A) Histograma de porosidades abiertas de las muestras recogidas en Carrascal –Ferrer y B) curva de reservas del acuífero que resultan del modelo 3D.

El acuífero investigado, localizado en el Prebético de Alicante, corresponde a una tipología de acuífero en la que existe una buena exposición y afloramiento de las estructuras y no demasiados datos de subsuelo. El importante esfuerzo realizado en el estudio estructural de campo (dirección y buzamiento de la estratificación, cartografía de contactos, medida de cinemática de fallas, secuencia temporal de las estructuras de plegamiento y las fallas, etc.), en la fotointerpretación y en el procesado e interpretación de las líneas sísmicas existentes han permitido “compensar” la ausencia de datos procedentes de sondeos mecánicos profundos.



En definitiva, se vislumbra que la metodología utilizada para la construcción del modelo 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer será de gran interés para su aplicabilidad en numerosos acuíferos carbonatados profundos de la Cordillera Bética.

El resultado de la modelización geológica 3D del acuífero ha sido satisfactorio. Se han modelizado un total de 7 unidades geológicas de la región y 5 fallas principales, lo que ha supuesto un gran avance en el conocimiento previo del acuífero. La geometría 3D obtenida se caracteriza principalmente por una gran sinforma compleja limitada al norte, este y sur por los anticlinales de las sierras de Carrascal, Ferrer, Bernia y Aixortá respectivamente, que permiten aflorar a las rocas cretácicas y paleógenas. En esta sinforma se desarrolla la Cuenca de Tárben de edad Oligocena-Miocena.

Las reservas totales de agua subterránea que resultan están comprendidas entre 224 y 1218 hm<sup>3</sup>. Se debe tener en cuenta que estas no son las reservas recuperables, es decir, para determinar el volumen de agua que se puede extraer de un determinado acuífero es necesario recurrir a la modelización y simulación del flujo subterráneo en distintos escenarios. No obstante, un buen modelo de flujo debe estar construido sobre un buen modelo geológico. En este sentido, se debe indicar que el punto débil de la mayoría de modelos de flujo subterráneo es el de su geometría. Las propiedades hidráulicas calibradas en los modelos (T y S, entre otras) dependen proporcionalmente del espesor de la formación acuífera; si éste es erróneo, también lo serán los parámetros hidráulicos calibrados. Construido el modelo geológico 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer, es posible exportar las superficies de referencia de techo/muro de las unidades geológicas del mismo a modelos de flujo y transporte de agua subterránea. Asimismo, la explotación del modelo geológico 3D del acuífero permitirá que los técnicos de la DPA puedan hacer diseños más eficientes y productivos de sondeos de explotación y/o de investigación de aguas subterráneas.

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

## REFERENCIAS

- Ahr, W. M., (2008). *Geology of carbonate reservoirs : the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks*. John Wiley & Sons, Inc. , Hoboken, New Jersey, 277p.
- Bachu, S., (2008). Comparasion between methodologies recommended for estimation of CO2 storage capacity in geological media. In: *Carbon Sequestration Leadership Forum (CLSF) and USDOE Capacity and Fairways Subgroup of the Regional Carbon Sequestration Partnerships Program, Canada*, 17.
- Borczak, S., Motyka, J. y Pulido-Bosch, A., (1990): The hydrogeological properties of the matrix of the chalk in the Lublin coal basin (southeast Poland). *Hydrological Sciences Journal*, 35: 523-534
- Eisinger, C. y Jensen, J. (2011). Reservoir characterization for CO2 sequestration: assessing the

- potential of the Devonian Carbonate Nisku formation of Central Alberta. *Oil & Gas Science and Technology*, 66
- IGME, (2008). Mapa geológico de España 822 (Benisa), escala 1:50,000.
- López-Geta, JA. (2004). *Análisis metroológico sobre la utilización de los embalses subterráneos en la regulación de los recursos hídricos. Aplicación a la transferencia Ebro-Levante-Sureste peninsular español*. Tesis Doctoral. Univ. Polit. de Madrid, 615 pp.
- Lowry, C. S. y Anderson, M. P., (2006). An assessment of aquifers storage recovery using ground water flow models. *Ground Water*, 44: 661-667
- Martos-Rosillo, S., Rodríguez-Rodríguez, M., Pedrera, A. Cruz-SanJulián, J.J., Carlos-Rubio, J.C. (2013). Groundwater recharge in semi-arid carbonate aquifers under intensive use: the Estepa Range aquifers (Seville, southern Spain). *Environmental Earth Science*, DOI 10.1007/s12665-013-2288-0.
- Nelson, R. A. (2001). Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. *2nd ed Editorial, Houston*, 322 p.
- Roca, E., Sans, M., Koyi, H., (2006). Polyphase deformation of diapiric areas in models and in the eastern Prebetics (Spain). *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull*, 90, 115–136.
- Thoms, E. (2011) Creating and Managing Digital Geologic Cross Sections within ArcGIS. U.S. *Geological Survey Open-File Report 2005-1428*.  
<http://pubs.usgs.gov/of/2005/1428/thoms/index.html>
- Vacher, H. L., Hutchings, W. C. y Budd, D. A., (2006). Metaphors and models: the ASR bubble in the Floridan Aquifer. *Ground Water*, 44: 661-667
- Worthington, S. H. R., (2007). Ground-water residence times in unconfined carbonate aquifers. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69: 94-102