



MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



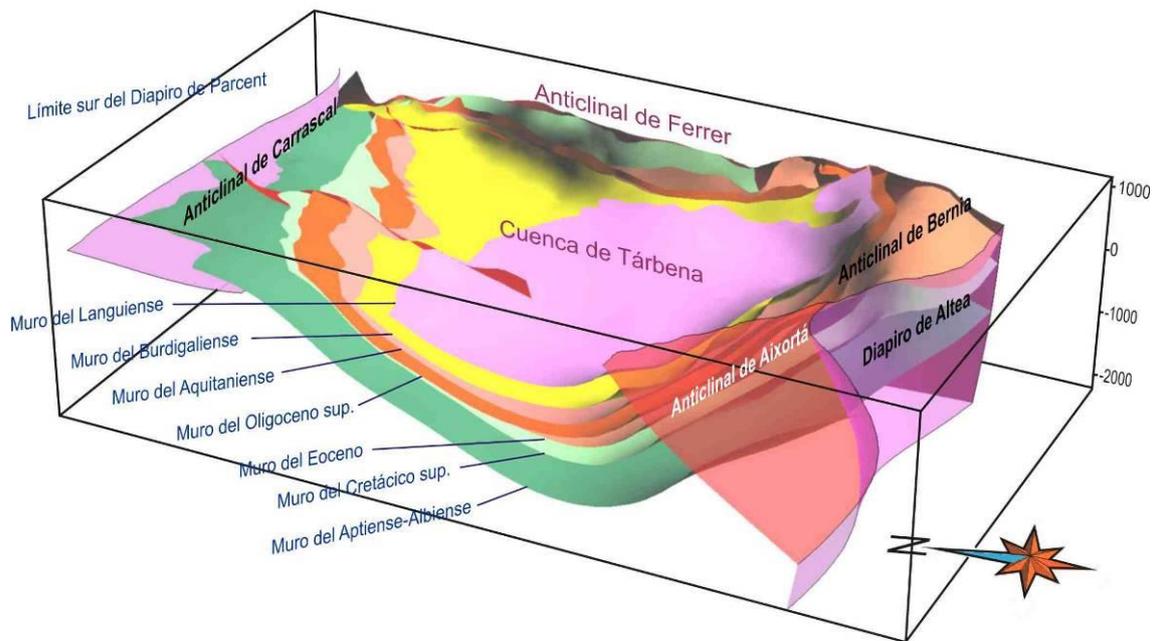
Instituto Geológico
y Minero de España



DIPUTACIÓN
DE ALICANTE

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

MODELO GEOLÓGICO 3D DEL ACUÍFERO DE CARRASCAL-FERRER Y EVALUACIÓN DE SUS RESERVAS TOTALES DE AGUA SUBTERRÁNEA



Junio de 2013

Carlos Marín Lechado
Sergio Martos Rosillo
Concepción Fernández Leyva
Antonio Pedrera Parias
José Luís García Lobón
Jesús Galindo Zaldívar

ÍNDICE

RESUMEN	7
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Justificación del estudio y antecedentes	9
1.2 Localización	10
1.3 Objetivos	11
2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.....	13
2.1 Geología	13
2.1.1 Encuadre geológico.....	13
2.1.2 Estratigrafía	13
2.1.3 Estructura	16
2.2 Hidrogeología	17
3 METODOLOGÍA	21
3.1 Modelización 3D	21
3.1.1 Elementos del modelo. Superficies de Referencia y Fallas.....	21
3.1.2 Métodos y proceso de datos.....	24
3.2 Caracterización del sistema poroso.....	28
3.2.1 Estudio petrográfico	29
3.2.2 Porosidad abierta.....	30
3.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas	30
4 RESULTADOS	31
4.1 Modelización 3D	31
4.2 Sistema poroso	47
4.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas	49
4.4 Implicaciones hidrogeológicas del modelo	51
5 CONCLUSIONES	53
6 REFERENCIAS.....	55
ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL ENTREGADA	61
1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL.....	61
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE	62
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO CARRASCAL.....	64
4. LISTADO DE FICHEROS	66
ANEXO II. ESTUDIO PETROGRÁFICO	67
ANEXO III. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	123

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio 11

Figura 2. 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) 14

Figura 3. Cortes 1 a 4 de la figura 2 15

Figura 4. Columna estratigráfica del área estudiada. Los círculos amarillos denotan los límites estratigráficos que conforman las superficies de referencia reconstruidas en el modelo 3D del acuífero 15

Figura 5. Columna litológica del acuífero de Carrascal-Ferrer. 17

Figura 6. Evolución del nivel piezométrico en el acuífero de Carrascal-Ferrer (Fuente. Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Alicante) 18

Figura 7. Evolución del caudal simulado en el manantial del Algar (Fuente: Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Alicante) 19

Figura 8. Diagrama de flujo utilizado para la realización del modelo geológico 3D Carrascal-Ferrer 26

Figura 9. Perfil sísmico RV-70 e interpretación 27

Figura 10. A) Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D (Global Mapper). B) Planos que se ajustan a las líneas 3D digitalizadas (Gocad). Los planos indican dirección y buzamiento de la estratificación y son utilizados en la modelización de las superficies en 3D Geomodeler 27

Figura 11. Localización de las muestras sobre cartografía geológica MAGNA 29

Figura 12. Vista 3D del Modelo geológico 3D del Acuífero de Carrascal-Ferrer 31

Figura 13. Distribución de datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer 32

Figura 14. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Mioceno medio. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.) 37

Figura 15. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Burdigaliense. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.) 38

Figura 16. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Aquitaniense. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.) 39

Figura 17. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Oligocena. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.) 40

Figura 18. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Eocena. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.) 41

Figura 19. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Cretácico superior. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.) 42

Figura 20. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Aptiense-Albiense. Zona norte. Profundidad referida sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) 43

Figura 21. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Aptiense-Albiense. Zona sur. Profundidad referida sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) 44

Figura 22. Cortes geológicos realizados al modelo 3D 46

Figura 23. Histograma de los valores de porosidad abierta de las muestras tomadas en el acuífero de Carrascal-Ferrer 47

Figura 24. Distribución de porosidades abiertas por formaciones 48

Figura 25. Histograma de los valores de porosidad abierta agrupados según la clasificación de Lucia (1995) 48

Figura 26. Curvas de reservas del Acuífero Carrascal-Ferrer obtenidas a partir del modelo 3D 49

Figura 27. Curvas de explotación del Acuífero Carrascal-Ferrer desde el sondeo Picaserías obtenidas a partir del modelo 3D 50

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D del Acuífero de Carrascal-Ferrer. 22

Tabla 2. Datos incorporados al modelo 3D para cada unidad modelizada 33

RESUMEN

El acuífero de Carrascal-Ferrer, situado en el sector noreste de la provincia de Alicante, tiene una extensión de 119 km², si bien la suma de afloramientos permeables es de 29,6 km². Este acuífero constituye una de las principales fuentes de suministro de agua potable y de riego de la comarca de La Marina Baja. El acuífero lo forman calizas y dolomías de edades comprendidas entre el Barremiense y el Aquitaniense, con un espesor medio del orden de 1.400 m. Sus recursos medios renovables han sido estimados en 14 hm³/año.

En este informe se presentan los desarrollos metodológicos en Geología del Subsuelo y resultados del modelo geológico 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer realizado con los códigos *3D Geomodeller* y *Gocad*. Este modelo se ha construido con los objetivos de conocer el volumen total de reservas de agua almacenada y de establecer las relaciones geométricas entre las diferentes unidades acuíferas diferenciadas. En el modelo geológico 3D se definen siete unidades geológicas y cinco fallas primarias y secundarias.

La consideración de datos geofísicos de exploración petrolera, entre los que cabe destacar los perfiles de sísmica de reflexión RV-71-V y RV-70-V, la recopilación de 28 columnas litológicas de sondeos de investigación hidrogeológica y la abundante información estructural generada con motivo de este proyecto han contribuido a conseguir un nuevo avance en el conocimiento geológico e hidrogeológico de este acuífero.

El acuífero de Carrascal-Ferrer presenta una compleja estructura geológica, afectada por pliegues de dirección variable, cortados por fallas inversas y de salto en dirección. Está confinado en el 75 % de su extensión, en concreto bajo la Cuenca de Tárben. En la actualidad, presenta un volumen de roca saturada de unos 64 km³.

La media de la porosidad abierta de las formaciones acuíferas muestreadas es de 1,35%, su mediana de 0,80%, mientras que los percentiles 25 y 75 de la muestra estadística considerada son de 0,35 y 1,9 %, respectivamente. Si se consideran como representativos los valores de los percentiles 25 y 75, las reservas totales de agua en el acuífero están comprendidas entre 224 y 1218 hm³. Del mismo modo, las reservas dinámicas, las que quedarían por encima de la cota de drenaje de los principales puntos de descarga época de aguas altas, quedarían comprendidas entre 3,6 y 19,4 hm³.

Los nuevos datos geológicos integrados en el modelo geológico del acuífero de Carrascal-Ferrer, además de proporcionar unos valores aproximados de reservas totales de agua, permiten a los gestores y planificadores del agua disponer de un mejor conocimiento de la estructura del acuífero. El modelo 3D generado indica que es posible la conexión lateral con los acuíferos de Cocoll, de la Sierra de Aixorta y con el de la Depresión de Benissa. Por otro lado, las capas de información georeferenciadas de techo y muro de las distintas unidades acuíferas serán fundamentales para poder construir futuros modelos matemáticos de flujo y transporte, con los que evaluar las reservas potencialmente explotables, además de para conocer los sectores más favorables para la captación de reservas de agua en situaciones de emergencia.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del estudio y antecedentes

Desde la elaboración del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), durante la década de los años setenta y ochenta del anterior siglo, el 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, como las que nos ocupa (UNESCO, 1979), 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 (Martos-Rosillo et al., 2013). 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 las reservas de agua subterránea en la provincia de Alicante. En este sentido, se han realizado evaluaciones de reservas de agua en más de treinta acuíferos de la provincia. Todo este esfuerzo ha contribuido, sin duda, a que esta sea una de las provincias españolas en las que más se ha avanzado en este sentido (DPA, 2009).

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 a la evaluación de reservas hídricas ante la previsión de fenómenos extremos, cuyos resultados parciales se presentan en esta Memoria.

En este trabajo se describe y aplica un procedimiento metodológico para la modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas totales de agua subterránea en acuíferos profundos. Para alcanzar estos objetivos se han aprovechado los recientes y notables avances en la modelación matemática de reservorios geológicos profundos integrando la información geológica, sondeos y geofísica existente (sísmica, especialmente). Durante los 30 últimos años los métodos y la tecnología en la investigación de formaciones geológicas profundas, y en especial la de naturaleza carbonática, han avanzado drásticamente gracias a la industria petrolera (Ahr 2008, Lucia 1999). En este sentido, la reciente incorporación de los modelos geológicos 3D en la investigación hidrogeológica ha contribuido a conseguir un notable avance en el conocimiento de los acuíferos en sus tres dimensiones. De este modo, desde la realización del *First Australian 3D Hydrogeology Workshop*, celebrado en Canberra, en 2009, ha crecido el número de publicaciones en las que se presentan modelizaciones geológicas 3D de acuíferos encaminadas 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 notable experiencia y 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 acuífero de Carrascal-Ferrer. 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, donde se pueden obtener datos estructurales de calidad, lo que permite ensayar modelaciones geológicas con técnicas y software modernos disponibles en el IGME.

1.2 Localización

El acuífero de Carrascal-Ferrer se sitúa al noreste de la provincia de Alicante, en la zona limítrofe entre las comarcas alicantinas de La Marina Alta y La Marina Baja (figura 1). Ocupa un área de 120 km², si bien la superficie de afloramientos permeables es de 29,6 km². El acuífero lo forman las sierras de Carrascal de Parcent, Ferrer, Besa y el sector occidental de la de Bernia. Bolulla y Taberna son las dos únicas poblaciones ubicadas sobre el acuífero. En las proximidades de su límite norte se localizan las poblaciones de Benichembla, Parcent y Jalón.

Es una zona muy abrupta. La cota topográfica de los afloramientos del acuífero está comprendida entre los 150 m.s.n.m. de las Fuentes del Algar, principal punto de drenaje cuando funcionaba en régimen natural, y los 993 m.s.n.m. en la Sierra de Carrascal.

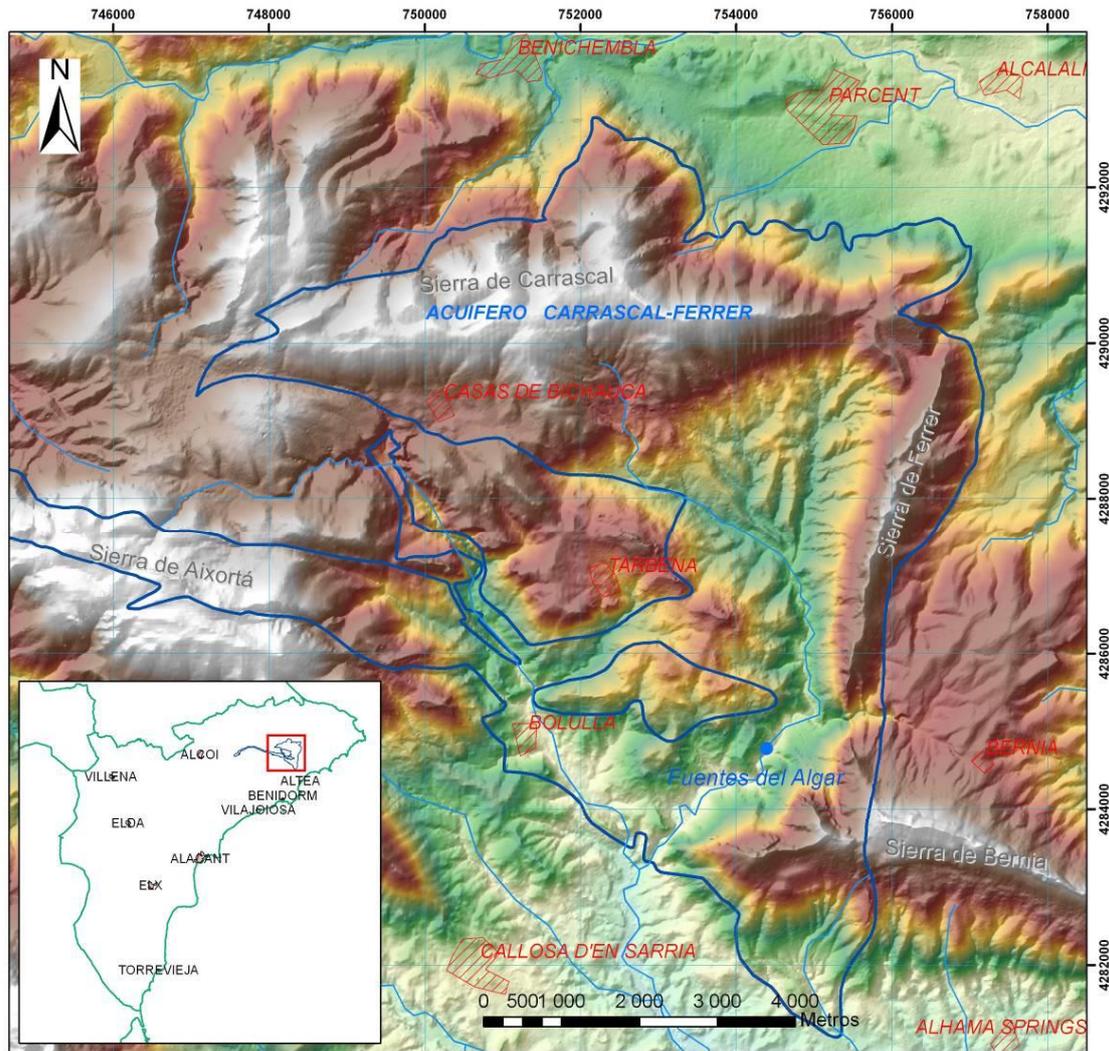


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

1.3 Objetivos

Dos son los objetivos fundamentales de este trabajo. El primero consiste en establecer una metodología para la modelación geológica 3D y consiguiente evaluación de las reservas hídricas de acuíferos profundos, y el segundo, en aplicar esta metodología al acuífero de Carrascal-Ferrer.

Asimismo, 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 petrolera y el posterior análisis 3D de toda esta información han permitido conseguir unos objetivos secundarios, pero no por ello menos importantes. Entre éstos cabe citar: i) la consecución de capas georeferenciadas de techo y muro de formaciones geológicas exportables a modelos de flujo y transporte de aguas subterráneas, ii) la posible utilización del modelo 3D como una herramienta de soporte de decisiones para emplazar nuevas captaciones de agua subterránea, y iii) la mejora del conocimiento de los límites laterales del acuífero.

2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

2.1 Geología

2.1.1 Encuadre geológico

El acuífero de Carrascal-Ferrer se localiza en el Prebético interno de las Zonas Externas de la Cordillera Bética. El Prebético se ha dividido tradicionalmente en dos áreas: el Prebético externo y el interno (De Ruig, 1992). El Prebético externo está localizado cerca del Macizo Ibérico y lo forman depósitos continentales Jurásicos y Cretácicos en transición a plataformas internas someras, con sedimentación mixta carbonatada-siliciclástica (Martín-Chivelet et al., 2002). El Prebético interno, donde se localiza el área de estudio, está situado hacia el interior de la cuenca e incluye una plataforma abierta con facies de talud y un aumento progresivo en la potencia de las secuencias jurásicas y cretácicas hacia el SE. En el Prebético interno, la sedimentación marina continuó durante el Paleógeno y el Mioceno inferior.

El Prebético se presenta estructurado en un cinturón de pliegues y cabalgamientos de dirección principal ENE-OSO a NE-SO que deforma la cobertera mesozoica-cenozoica. Esta cobertera se encuentra despegada sobre las evaporitas y arcillas triásicas. El área de estudio es una región geológicamente compleja con una dirección estructural principal ENE-OSO pero que incluye frecuentes estructuras oblicuas y sectores arqueados. Los anticlinales están en su mayoría nucleados por evaporitas triásicas y calizas, formando comúnmente geometrías en caja con flancos muy buzantes a invertidos (Roca et al., 2006). La presencia de diapiros triásicos añade complejidad a la estructura geológica, siendo en gran parte los responsables de la oblicuidad entre las sierras y la geometría de los pliegues.

2.1.2 Estratigrafía

La sucesión estratigráfica en el sector estudiado comprende rocas de edad triásica a cuaternaria.

Las rocas triásicas están formadas principalmente por evaporitas y arcillas aunque también incluyen niveles de calizas y areniscas. Estas rocas, que se depositaron originalmente sobre el basamento ibérico varisco, afloran en la actualidad gracias a la formación de diapiros.

Las calizas y dolomías jurásicas no afloran en el sector estudiado, sin embargo, están expuestas algunos kilómetros hacia el sur en los núcleos de los anticlinales. El sondeo Azcoy-1 localizado hacia el oeste en el Prebético interno perforó 1.200 m de secuencia jurásica.

El Cretácico inferior está formado por calizas arrénciales, calizas orgánicas y margas. La unidad cretácica más antigua que aflora en el área estudiada es de edad Barremiense.

Las rocas del Cretácico superior, ampliamente expuestas en la zona de estudio (figura 2), consisten en calizas y margocalizas intercaladas con depósitos margosos.

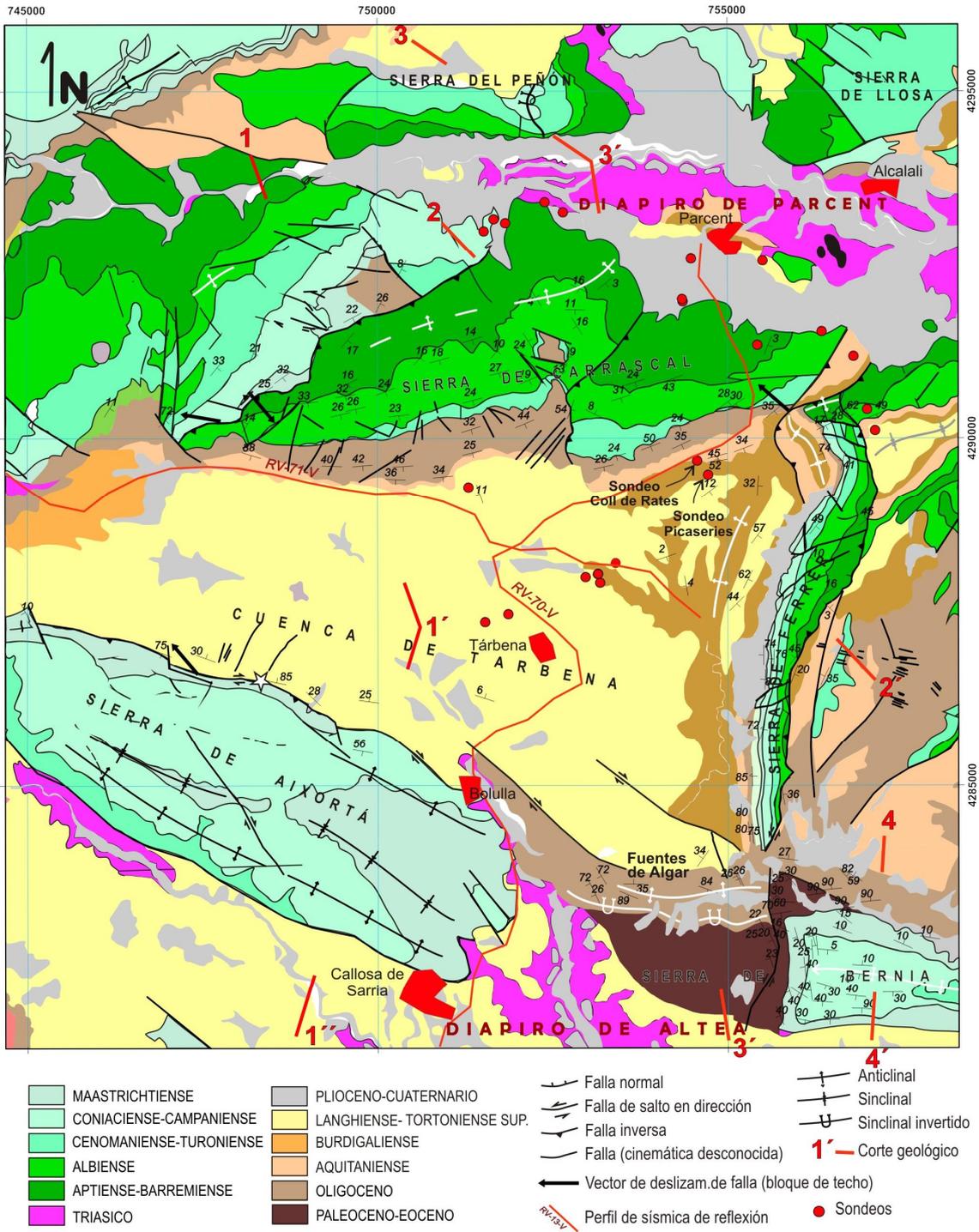


Figura 2. Mapa geológico de Carrascal-Ferrer. Se ubican sondeos y líneas sísmicas RV-70-V y RV-71-V. A partir de revisión del MAGNA 822 (IGME, 2008).

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.

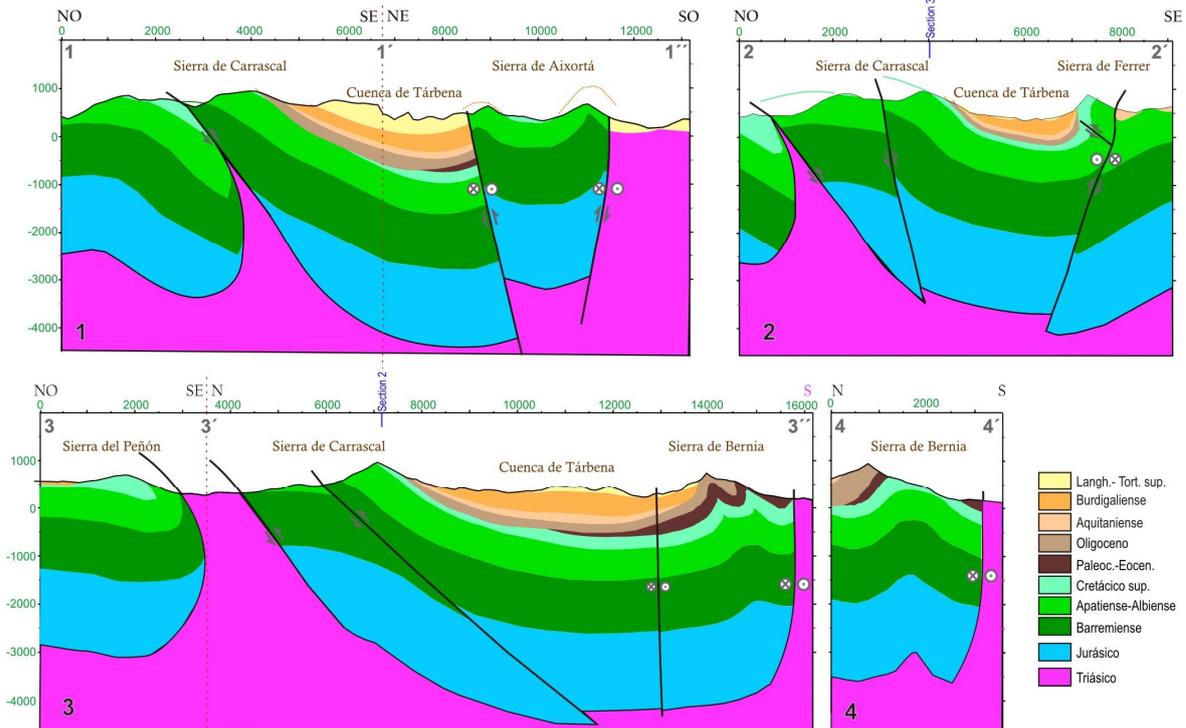
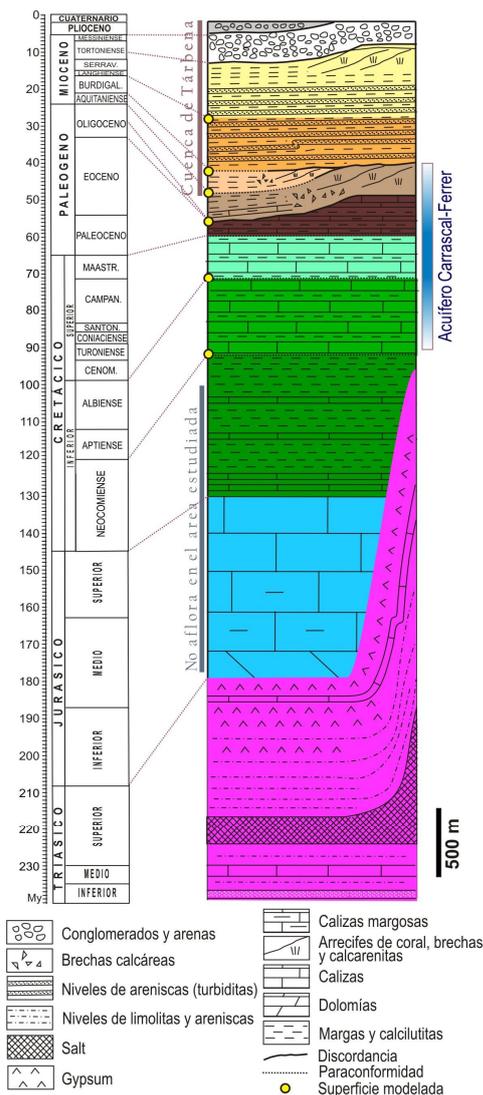


Figura 3. Cortes 1 a 4 de la figura 2.



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. La secuencia sedimentaria del Oligoceno superior la forman turbiditas carbonatadas y margas que afloran en la Sierra de Carrascal y que pasan lateralmente a calizas en la Sierra de Aixortá situada el sur. De forma similar, la secuencia de edad aquitaniense incluye calizas arenosas, calcarenitas y margas. Por su parte el Burdigaliense está constituido por calcarenitas flicschoides, margas, calizas margosas y turbiditas. En la secuencia Langhiense-Serravalliense se observan unas margas y margocalizas gris-azuladas que pasan a techo a unas calizas con bioclastos principalmente de edad Eocena. Frecuentemente se observan grandes deslizamientos de estas calizas sobre las margas infrayacentes. Estas calizas del Mioceno medio han sido interpretadas como grandes olistolitos (IGME, 2008). La secuencia estratigráfica finaliza con unos conglomerados de edad Tortonense superior.

Figura 4. Columna estratigráfica del área estudiada. Los círculos amarillos denotan los límites estratigráficos que conforman las superficies de referencia reconstruidas en el modelo 3d del acuífero.

2.1.3 Estructura

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 (figura 2)

El límite norte del acuífero corresponde a la Sierra de Carrascal, cuyo relieve está relacionado con una antiforma vergente al norte, con dirección N70°E a lo largo de 9 km. La secuencia anterior al plegamiento está compuesta de carbonatos y margas de edad jurásica a Eocena. Los buzamientos en el flanco sur del anticlinal de la Sierra de Carrascal, de unos 25° hacia el SE, son bastante constantes dentro de la secuencia cretácica.

El límite sur del acuífero de Carrascal-Ferrer lo define la Sierra de Aixortá que se extiende 12 km hacia el ONO desde la población de Callosa de Sarriá. En su parte occidental cambia abruptamente de dirección y continúa a lo largo de la Sierra de Serrella con una dirección ENE-OSO. Las sierras de Serrella-Aixortá pertenecen a un único anticlinal. La rama ENE-OSO del anticlinal de Serrella presenta una forma de caja compleja vergente al norte con el flanco noroeste subvertical y deformado por una falla inversa de alto ángulo que localmente pinza rocas triásicas (Colodrón y Ruiz, 1980). El límite oeste del modelo geológico 3D realizado en este trabajo corresponde con la terminación oriental de la estructura de Aixortá que constituye el límite sur de la cuenca de Tárben. La estructura general de la rama de Aixortá es también un anticlinal en caja *box-like shape* limitado por fallas subverticales al NE y SO. La falla que limita al anticlinal hacia el NE es una falla inversa dextra y constituye el límite sur de la cuenca de Tárben (Pedrera et al., 2013). En la Sierra de Aixortá, la secuencia anterior al plegamiento comprende desde rocas jurásicas hasta calizas y margas del Oligoceno superior. La amplitud media del anticlinal es de 2.5 km en la zona estudiada, no obstante, el anticlinal tiene flancos muy buzantes y un sinclinal suave en la zona de charnela.

Hacia el ENE de la Sierra de Aixortá, se encuentra la Sierra de Bernia. El anticlinal de Bernia de dirección E-O se localiza entre las Fuentes del Algar y la línea de costa. Este anticlinal presenta una forma simple en caja en su zona oriental que se hace bastante más compleja hacia su terminación occidental. En esta zona, la antiforma es arrastrada por la falla inversa sinistral N-S de Ferrer, mostrando un fuerte cabeceo hacia el oeste. Hacia el sur, el anticlinal está limitado por el diapiro triásico de Altea.

El límite este del acuífero de Carrascal-Ferrer lo constituye la Sierra de Ferrer. Esta sierra está formada por un flanco subvertical (más de 60° buzando al oeste) de dirección N-S a NNE-SSO a lo largo de 6 km enlazando con los anticlinales de Bernia y Carrascal y se presenta localmente invertido. La Sierra de Ferrer aparece limitada hacia el este por una falla de salto oblicuo inverso-sinistro vergente al este. Hacia el este se encuentran fallas normales ampliamente distribuidas de dirección N-S a NNE-SSO.

La Cuenca de Tárben es una cuenca con forma triangular localizada entre los anticlinales descritos en los párrafos anteriores. Buena parte del acuífero de Carrascal-Ferrer se encuentra bajo esta cuenca sedimentaria. Los límites de la Cuenca de Tárben son el anticlinal de Carrascal hacia el norte, los anticlinales de Aixortá y Bernia en el sur y la Sierra de Ferrer hacia el este. Los anticlinales de Carrascal y de Aixortá de direcciones ENE-OSO y ONO-ESE respectivamente, convergen constituyendo el límite occidental de la cuenca. La Cuenca de Tárben se formó con el depósito de sedimentos sobre un basamento constituido por calizas eocenas y su

evolución está relacionada con la historia contractiva que produjo la deformación de la cobertera mesozoica y eocena del margen ibérico suroriental. Por lo tanto, la secuencia sedimentaria oligocena a tortonense registra esta historia contractiva con el desarrollo de pliegues y fallas inversas. Además, la distribución de facies, discordancias y el adelgazamiento de los estratos hacia los márgenes de la cuenca, son rasgos indicativos de un depósito sincrónico al plegamiento (Pedrera et al., 2013).

2.2 Hidrogeología

Las formaciones permeables que dan lugar al acuífero de Carrascal-Ferrer son de naturaleza carbonática; presentan edades comprendidas entre el Barremiense y el Aquitaniense, con un espesor medio del orden de 1.400 m.

Entre estas formaciones permeables destacan los tramos calizas Aptiense medio y superior y del Cenomaniense-Turonense, que afloran en las sierras de Carrascal y Ferrer; las calizas senonenses y las calizas detríticas pararecificales del Oligoceno al Mioceno inferior (Aquitaniense), que afloran en la vertiente meridional de la Sierra de Carrascal y en la vertiente occidental de la Sierra de Ferrer. Por último, se indica la presencia de distintos niveles de calizas del Eoceno que dan lugar a la formación de diferentes acuíferos, desconectados del de Carrascal-Ferrer. Entre éstos cabe citar a los acuíferos de Bolulla, Tárben, y el de los Chorros. Estos últimos niveles permeables no han sido considerados en la modelización 3D, debido a la ausencia de información suficiente para su tratamiento. 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.

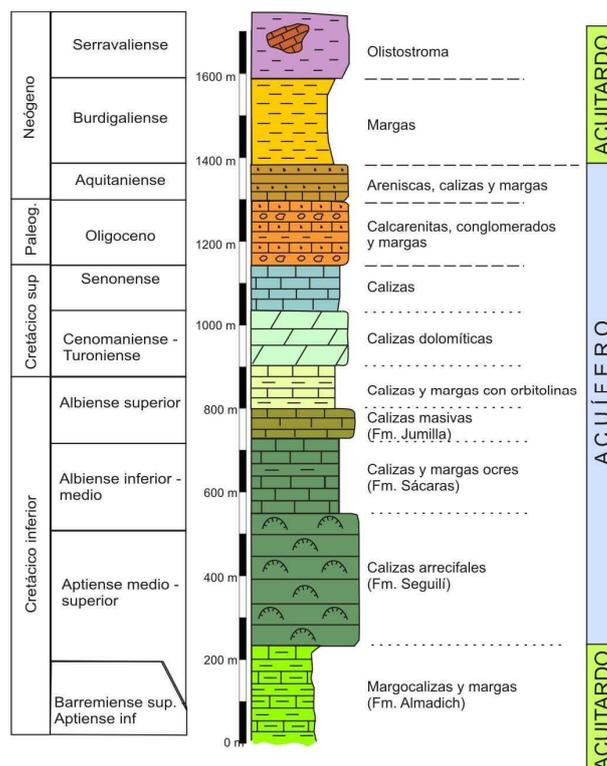


Figura 5. Columna litológica del acuífero de Carrascal-Ferrer.

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 éste dispone de una forma de triángulo isósceles con su base menor dispuesta hacia el este. Esta proyección indica que el acuífero se extiende en una superficie de unos 119 km², de los que, en superficie, afloran 29,56 km² de materiales permeables.

Con los nuevos datos geométricos del acuífero, se puede comprobar que buena parte de la Sierra de Carrascal, en la margen septentrional del acuífero, se encuentra desaturada, al quedar el nivel piezométrico enfrentando al muro del acuífero, en la margen meridional de la Sierra. Este límite norte sería por tanto de flujo nulo. No

obstante, al noroeste de la Sierra de Carrascal (como ya se apuntó en IGME, 1986), y a lo largo de unos 2.500 m, una falla inversa pone en contacto a los materiales permeables de los acuíferos de Carrascal-Ferrer y de la Sierra de Cocoll, permitiendo la transferencia de recursos.

La terminación occidental del acuífero de Carrascal-Ferrer es cerrada al flujo subterráneo. La elevación del cierre del sinclinal levanta el impermeable de base. Por su parte, el límite oriental del acuífero podría ser abierto al flujo subterráneo, al quedar el impermeable de base a mayor profundidad de lo que se suponía, lo que permitiría la conexión con el acuífero de la Depresión de Benissa.

En el límite meridional del acuífero se pueden diferenciar dos tramos. El más oriental se extiende desde las inmediaciones de Bolulla hasta el vértice suroriental del acuífero. Este tramo impide la transferencia de recursos, al enfrentarse los materiales permeables con el diapiro de Altea. En el segundo tramo del límite meridional, desde las inmediaciones de Bolulla hasta el vértice occidental del acuífero, existe la posibilidad de conexión con el acuífero de Serreta. Aixorta. Los materiales permeables de ambos acuíferos quedan conectados lateralmente.

Existe poca información referente a la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero. En este sentido, en DPA (2009) se determinó una porosidad eficaz media del acuífero del 1% y un coeficiente de almacenamiento elástico de $7,2 \times 10^{-6}$.

Por otro lado, en DPA (2007), se indica que la recarga del acuífero de Carrascal-Ferrer se produce fundamentalmente a partir de la infiltración del agua de lluvia sobre sus afloramientos permeables. Por su parte, las descargas naturales se realizaban, en régimen natural, exclusivamente a través de manantiales. En la actualidad, el importante régimen de bombeo condiciona notablemente el funcionamiento de los manantiales. Las cotas piezométricas de mayor potencial hidráulico se encuentran por debajo de los 200 m.s.n.m. en el sector más nororiental (sondeo Picaserries, figura 2).

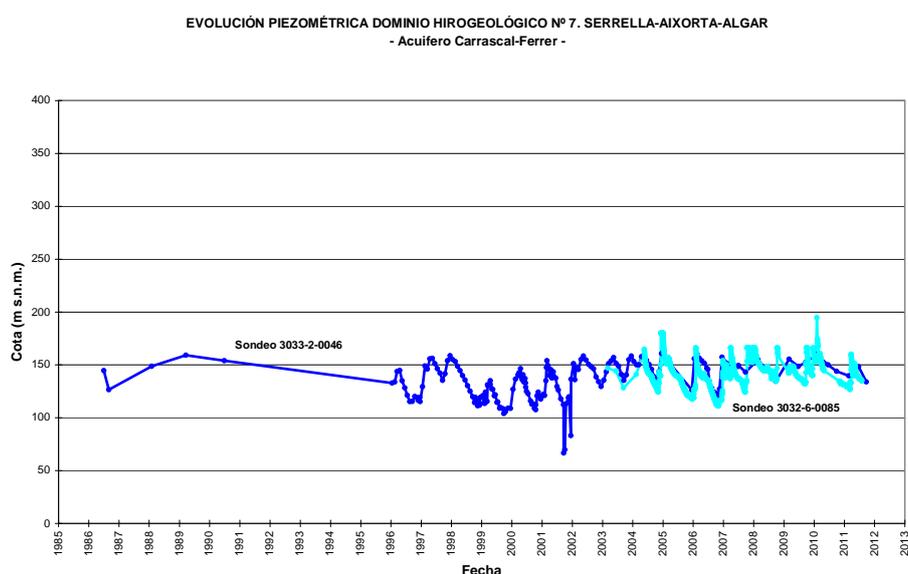


Figura 6. Evolución del nivel piezométrico en el acuífero de Carrascal-Ferrer (Fuente. Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Alicante).

Las surgencias naturales del acuífero las constituyen las fuentes del Algar (3033-2-1 y 2-2), que nacen a una cota próxima a los 150 m.s.n.m. y configuran un entorno paisajístico de singular belleza, explotado para usos recreativos y turísticos. Estas

contribuyen de forma notoria a la alimentación del río Algar. En estas surgencias se han medido caudales punta de 9 m³/s (figura 6), quedando en estiaje con caudales de 400 l/s (DPA-IGME, 2013, in prep.). Actualmente las citadas fuentes se encuentran reguladas. El balance hídrico medio se indica a continuación (DPA, 2007):

Entradas (hm³/año)

Infiltración de lluvia	14,00
Total	14,00

Salidas (hm³/año)

Cauces y surgencias	8,00
Bombeos	6,00
Total salidas	14,00

Las extracciones de la batería de sondeos Sacos y las salidas por las Fuente del Algar se utilizan para riego, en el abastecimiento de municipios costeros de la Marina Baja y en usos recreativos. La zona regable de 1.308 ha que se extiende por el término municipal de Callosa d'En Sarriá, está dedicada al cultivo de frutales.

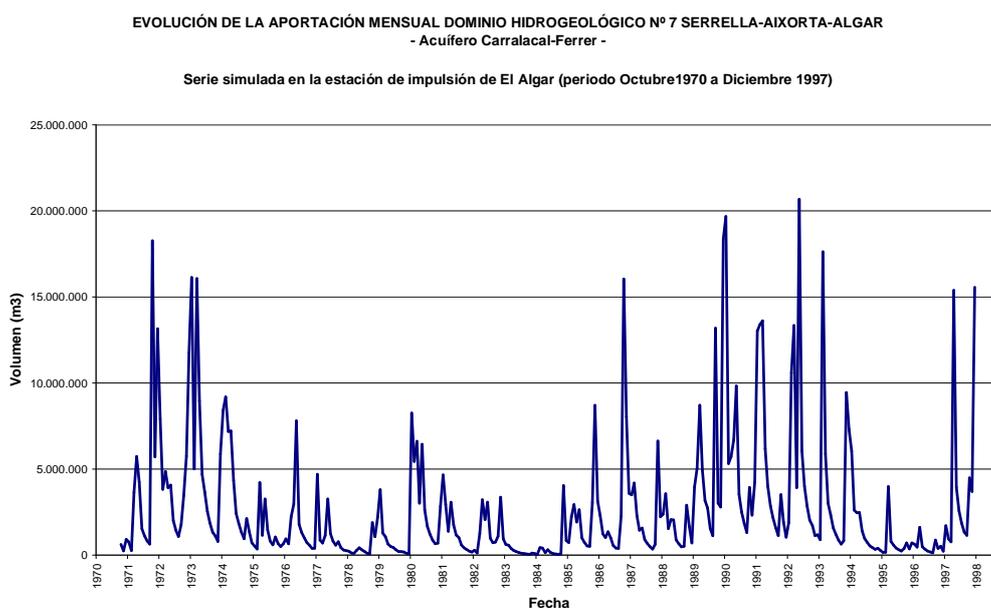


Figura 7. Evolución del caudal simulado en el manantial del Algar (Fuente: Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Alicante).

Las aguas de las Fuentes del Algar son de facies bicarbonatadas cálcicas y baja mineralización (<400 µS/cm), con contenidos muy bajos en especies nitrogenadas (<4 mg/l de nitratos y ausencia de nitritos y amonio). Se trata, por tanto, de un agua de excelente calidad química tanto para abastecimiento, como para riego (DPA-IGME, 2013, in prep.).

3 METODOLOGÍA

Para el cálculo del volumen de reservas totales del acuífero de Carrascal-Ferrer se ha realizado un detallado modelo geológico 3D. Se han utilizado los códigos *Gocad* y *3D GeoModeller*, donde se ha integrado información cartográfica y estructural de detalle, geofísica (sísmica de reflexión, fundamentalmente), información litológica procedente de sondeos mecánicos y datos de la porosidad de la matriz, de muestras tomadas en campo para este proyecto. Cada uno de los dos grandes apartados metodológicos (modelización 3D, y evaluación de la porosidad abierta y cálculo del volumen total de reservas) se explican con mayor detalle a continuación.

3.1 Modelización 3D

3.1.1 Elementos del modelo. Superficies de Referencia y Fallas

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

El análisis de datos geológicos de superficie y de subsuelo disponibles en la región del acuífero de Carrascal-Ferrer, así como el de la serie estratigráfica y reflectores sísmicos de las líneas RV-70-V y RV-71-V, ha permitido constatar que es posible reconstruir 7 superficies en un modelo geológico 3D del acuífero de Carrascal (indicadas en figura 4). Existen 3 fallas inversas y en dirección asociadas a los anticlinales principales, que junto con los diapiros de Altea y Parcent, van a constituir las superficies límite del modelo del acuífero.

Los datos de superficie corresponden principalmente a los contactos litológicos entre las formaciones y los contactos de falla. Estos contactos provienen en su mayor parte de la cartografía geológica previa del IGME, aunque localmente se han modificado algunos de ellos a partir de las observaciones realizadas en campo y de la fotointerpretación. También se han incorporado al modelo 3D medidas de la orientación de la estratificación y datos cinemáticos del movimiento de las fallas. La mayor parte de los datos de buzamiento de la estratificación se han obtenido mediante la interpretación de ortofotografías sobre el modelo digital de elevaciones, además de medidas realizadas directamente en campo.

Se han realizado 9 cortes geológicos a partir de la cartografía geológica, buzamientos y sondeos. Estos cortes geológicos son un dato fundamental para la construcción del modelo 3D.

Los datos de subsuelo utilizados para la construcción del modelo geológico 3D corresponden a columnas litológicas de 28 sondeos mecánicos de la base de datos del grupo de Ciclo Hidrológico de la DPA. También se han incorporado al modelo geológico 3D los horizontes sísmicos interpretados y convertidos a profundidad de las líneas RV-71-V y RV-70-V.

Tipo	Datos	Descripción	Fuente
Superficie	Cartografía geológica	hojas 822 (Benisa) y 848 (Altea)	Cartografía Magna y fotointerpretación
	Datos estructurales	147 medidas de dirección y buzamiento estratificación	Fotointerpretación y medidas de campo
	Ortofotografía/MDT	210 km ² 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 proyecto
	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.

El software utilizado para la construcción del modelo geológico 3D ha sido el siguiente:

3D Geomodeller

3D Geomodeller es un software que permite la construcción de modelos geológicos complejos en 3D (fallas, pliegues, estratos invertidos, intrusiones, etc.). Para ello utiliza datos geológicos de superficie y subsuelo y luego aplica un algoritmo geoestadístico para obtener una solución satisfactoria. *3D Geomodeller* considera que la estratificación y las fallas corresponden a superficies en el espacio 3D análogas a las de los campos potenciales. Mientras que los contactos son isovalores del campo potencial, los buzamientos son gradientes de ese campo. El algoritmo de interpolación de este programa es el *kokriging+*. El *kokriging* equipotencial (puntos de contacto de las unidades geológicas) y sus derivadas (datos de orientación) proporcionan una función espacial 3D de la superficie que se quiere modelizar (Lajaunie et al., 1997).

Gocad

El programa *Gocad* (*Geological Objects Computer Aided Design*) es un programa de modelización geológica 3D. Este código presenta numerosos módulos para la modelización de propiedades petrofísicas y facies. También permite la incorporación de líneas sísmicas, sondeos y logs en el proceso de construcción del modelo 3D. En este proyecto *Gocad* se ha utilizado para refinar el modelo obtenido en *3D Geomodeller* y editar las superficies obtenidas. También se ha utilizado para construir la malla 3D del modelo geológico a la que se le asignan valores de porosidad eficaz para el cálculo de las reservas totales de agua subterránea.

ArcGis

ArcGis es un sistema de información geográfica orientado a la gestión y explotación de la información espacial. En este proyecto se ha utilizado *ArcGis* para la gestión de la información geográfica (sondeos, cartografía geológica, etc.) y para la elaboración de cortes geológicos que posteriormente se han exportado a *3D Geomodeller*.

SMT Kingdom Suite

Kingdom Suite es un programa de interpretación sísmica y ha sido utilizado para la interpretación de los horizontes sísmicos del modelo de Carrascal-Ferrer que posteriormente han sido exportados como datos de entrada al modelo en *3D Geomodeller*.

Global Mapper

Global Mapper es un programa de visualización cartográfica, con herramientas básicas de edición y visualización 3D aunque no tiene herramientas avanzadas de análisis SIG. La ventaja de este programa es su gran versatilidad para importar y exportar todo tipo de ficheros vectoriales y raster. Además, la visualización 3D es muy rápida y consume pocos recursos. En este proyecto se ha usado para la exportación del MDT al formato xyz requerido por *3D Geomodeller*. También se ha utilizado para la digitalización en un entorno 3D de la intersección de la estratificación con la topografía.

3.1.2 Métodos y proceso de datos

En los siguientes párrafos se describirá brevemente la secuencia metodológica seguida en este proyecto para la obtención final del modelo geológico 3D (figura 8).

Datos iniciales

Los perfiles sísmicos utilizados en este proyecto se encuentran originalmente en formato analógico (imagen tif escaneada del papel de las líneas RV-70-V y RV-71-V) en la base de datos geofísica del IGME. Por tanto, el primer paso que se realiza es el de la transformación de estos perfiles a un formato digital estándar *seg-y*. Para ello se ha utilizado la aplicación *Image2seg*y (Farrán, M., 2007) que se ejecuta desde el programa *Matlab*. Los archivos *seg-y* obtenidos se pueden cargar en el programa *SMT Kingdom* y de esta forma se pueden interpretar los reflectores de interés. Los reflectores cartografiados han sido el muro de las calizas arrecifales del Aptiense medio-superior, el muro de las calcarenitas, conglomerados y margas del Oligoceno y el muro de las areniscas, calizas y margas de edad Aquitaniense (figura 9).

Desafortunadamente no existe ningún sondeo profundo que corte las formaciones jurásicas ni datos de velocidad de las formaciones obtenidas en pozo. No obstante, se ha realizado un intento de transformación a profundidad de los horizontes interpretados utilizando los datos de velocidades NMO generados durante el procesado sísmico. A partir de la velocidad NMO se obtuvo una ecuación polinómica de segundo grado que se ajustaba razonablemente a la nube de puntos tiempo-profundidad. Generalmente las velocidades NMO son un 10-20% mayor que las reales, por lo que éstas se redujeron en un 15%. Debido a que no se dispone de ningún sondeo de control que valide la conversión a profundidad realizada existe una incertidumbre en la profundidad real de los horizontes interpretados. No obstante, la tendencia general en la geometría de los horizontes interpretados se mantiene independientemente de la ley de velocidad adoptada y permiten interpretar la geometría de los estratos en el subsuelo. Los horizontes sísmicos interpretados en las dos líneas disponibles y convertidos a profundidad se exportan a un archivo ASCII (x, y, z, formación). Este archivo se importará desde *3D Geomodeller* para utilizarlos en la construcción del modelo geológico 3D (figura 8, izquierda).

Los sondeos mecánicos de la base de datos de la DPA se han suministrado en un archivo Excel. Para importar esta información a *3D Geomodeller* se genera un archivo con las columnas x, y, z de cabeza del sondeo, muro y nombre de formación. Muro es la profundidad a la que se corta una determinada formación.

Otro de los datos de entrada al modelo 3D es la superficie topográfica. La superficie topográfica en *3D Geomodeller* es una sección especial sobre la que se proyectan los contactos y fallas cartográficas y los datos de orientación y buzamiento. Para este modelo se ha utilizado el modelo digital del terreno (MDT) del IGN con un valor de cota topográfica cada 10 metros. Para exportar el MDT al formato requerido por *3D Geomodeller* se ha utilizado el programa *Global Mapper*.

La cartografía geológica MAGNA del área estudiada se incorpora a *3D Geomodeller* como una imagen georeferenciada sobre la que se puede digitalizar los contactos y fallas. También se han importado algunos contactos a *3D Geomodeller* directamente de archivos *shapefile*.

Los cortes geológicos son datos fundamentales para construcción de superficies en *3D Geomodeller*. Se han realizado un total de 9 cortes geológicos que 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*. (Carrell, J, 2010) respectivamente que funcionan sobre *ArcGis*. Estas herramientas construyen un corte topográfico a partir del modelo digital del terreno. Los polígonos correspondientes a las formaciones geológicas del mapa se intersectan con el corte. Se proyectan desde una distancia definida perpendicular al corte los buzamientos aparentes. Finalmente se proyectan los sondeos situados a una determinada distancia. El resultado final consiste en un corte geológico en blanco con las anotaciones de la geología, buzamientos y sondeos. Sobre este corte se facilita la posterior interpretación geológica.

WORKFLOW MODELIZACIÓN GEOLÓGICA 3D

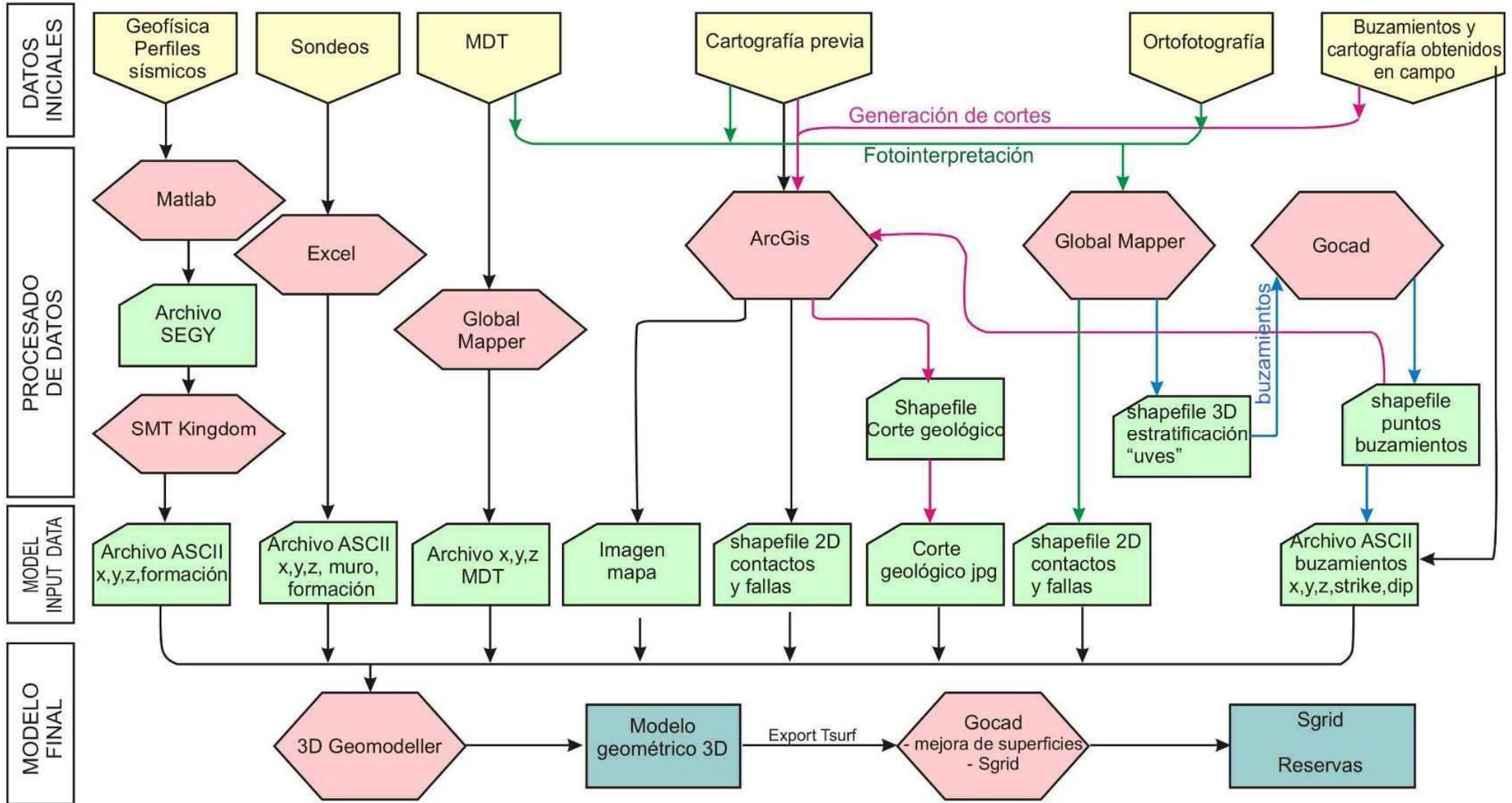


Figura 8. Diagrama de flujo utilizado para la realización del modelo de 3D de Carrascal-Ferrer.

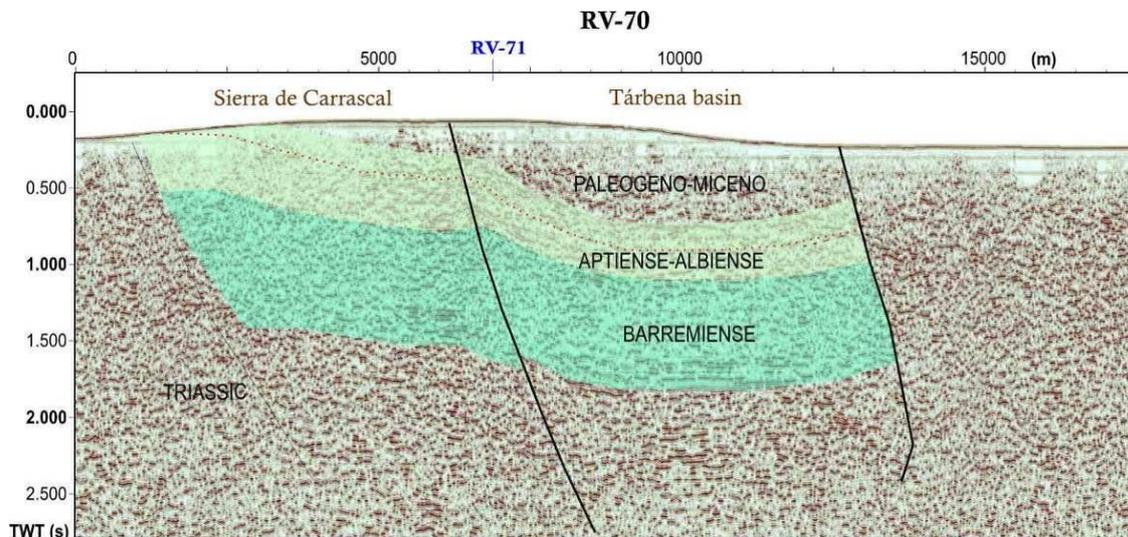


Figura 9. Perfil sísmico RV-70 e interpretación.

La mejora de los datos cartográficos de partida, requerida para un proyecto de reconstrucción 3D de calidad, se ha conseguido gracias a una importante labor de fotointerpretación. La superposición de las ortofotografías digitales a color junto con otras capas de información (cartografía geológica previa) sobre el modelo digital del terreno, permite interpretar y digitalizar los contactos geológicos en un entorno 3D. Para ello se ha utilizado el programa *Global Mapper*. Mediante esta metodología se han digitalizado con una mayor precisión los contactos geológicos de la cartografía Magna previa. En otros casos se han interpretado nuevos contactos a partir de las observaciones realizadas en campo. Estos contactos litológicos se han exportado a un archivo *shapefile* y se han incorporado al modelo geológico 3D de Carrascal-Ferrer.

En el proceso de fotointerpretación se ha podido visualizar 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. Esta línea 3D está directamente relacionada con la dirección y buzamiento de la estratificación. Para obtener estos datos, se ha digitalizado en *Global Mapper* la estratificación. Las líneas 3D se han importado al programa *Gocad* y se han obtenido los planos de estratificación que se ajustan a estas líneas (figura 10). Mediante este procedimiento se han conseguido 97 nuevos datos de dirección y buzamiento adicionales a los datos medidos en campo o indicados en los mapas geológicos previos. El conjunto de datos de buzamiento se importan en *3D Geomodeler* como datos de entrada que condicionan el modelo matemático de superficies de potencial (figura 8, derecha). Además estos datos se utilizan para la realización de los cortes geológicos 2D, como se describe a continuación.

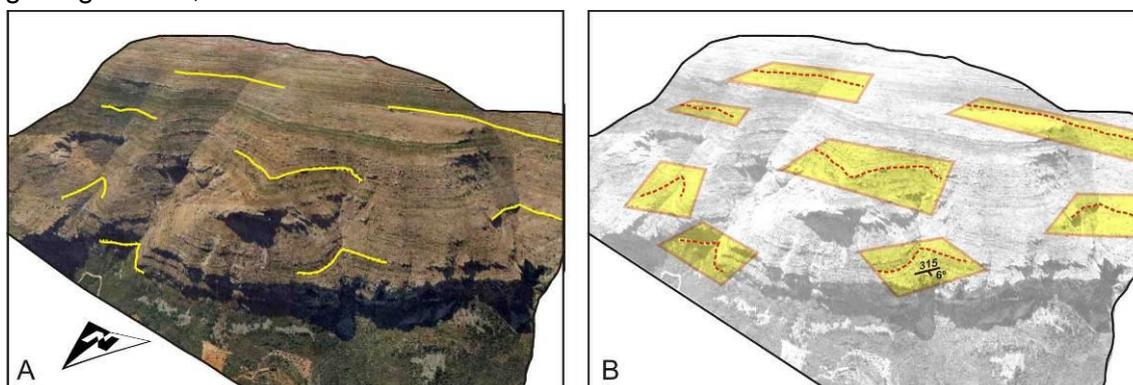


Figura 10. A) Fotointerpretación de la intersección de la estratificación con la topografía en un entorno 3D (*Global Mapper*). B) Planos que se ajustan a las líneas 3D digitalizadas (*Gocad*). Los planos indican dirección y buzamiento de la estratificación y son utilizados en la modelización de las superficies en *3D Geomodeler*.

Procesado de datos

Una vez importados todos los datos de subsuelo y superficie (interpretación de perfiles sísmicos, sondeos, superficie topográfica, contactos litológicos y fallas, cortes geológicos y buzamientos), el algoritmo matemático de cokriging de *3D Geomodeller* construye un modelo geométrico 3D de las superficies que limitan las unidades geológicas del acuífero de Carrascal-Ferrer.

Las superficies geológicas 3D construidas, se exportan (formato *Tsurf*) al programa *Gocad* (figura 8). En *Gocad* se editan estas superficies para mejorarlas debido a que:

- Las superficies de las formaciones que genera *3D Geomodeller* continúan a lo largo de las fallas al intersectar con ellas. En *Gocad*, habrá que recortar estas superficies en las zonas de intersección con las fallas.

- La triangulación de las superficies que realiza *3D Geomodeller* es deficiente con la formación de triángulos demasiado isósceles. Al importarlas a *Gocad* es necesario realizar una mejora de los triángulos para una mejor edición de la superficie.

Una vez editadas las superficies, es necesario realizar cálculos volumétricos para la estimación de las reservas del acuífero. Para ello en *Gocad*, se genera un stratigraphic grid. El stratigraphic grid en *Gocad* es una malla 3D regular que puede ser deformada y cortada por fallas para ajustarla a un modelo estructural de superficies.

3.2 Caracterización del sistema poroso

Para la caracterización del sistema poroso de las formaciones permeables del acuífero de Carrascal-Ferrer se ha realizado un estudio petrográfico y se ha calculado la porosidad de 51 muestras recogidas en campo. De cada una de las muestras se ha preparado una lámina delgada y una probeta para la determinación de la porosidad abierta mediante ensayos de inmersión en agua en cámara de vacío. La situación de los puntos de muestreo se detalla en la figura 11. Su ubicación exacta se adjunta en el Anexo II de esta Memoria.

Para 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 del almacenamiento del acuífero. Este hecho es evidente en los acuíferos detríticos y, según la literatura más actual, 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 capacidad de almacenamiento total de los acuíferos (Ahr 2008, Nelson 2001, Worthington 2007, Worthington et al. 2000). Esta misma asunción se mantiene en los cálculos de la capacidad de almacenamiento de CO₂ en reservorios de formaciones carbonáticas (Bachu 2008, Eisinger and Jensen 2011) y en los proyectos Almacenamiento Subterráneo y Recuperación (ASR) (Herrmann et al. 2004, Lowry and Anderson 2006, Vacher et al. 2006) en este tipo de materiales.

Se entiende por porosidad abierta (p_o), interconectada o efectiva, el volumen de poros que presentan cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. Por el contrario, la porosidad cerrada es aquel volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de conexión con el

exterior. Por último, la porosidad total es la suma de la porosidad conectada y la no conectada (Dullien, 1992).

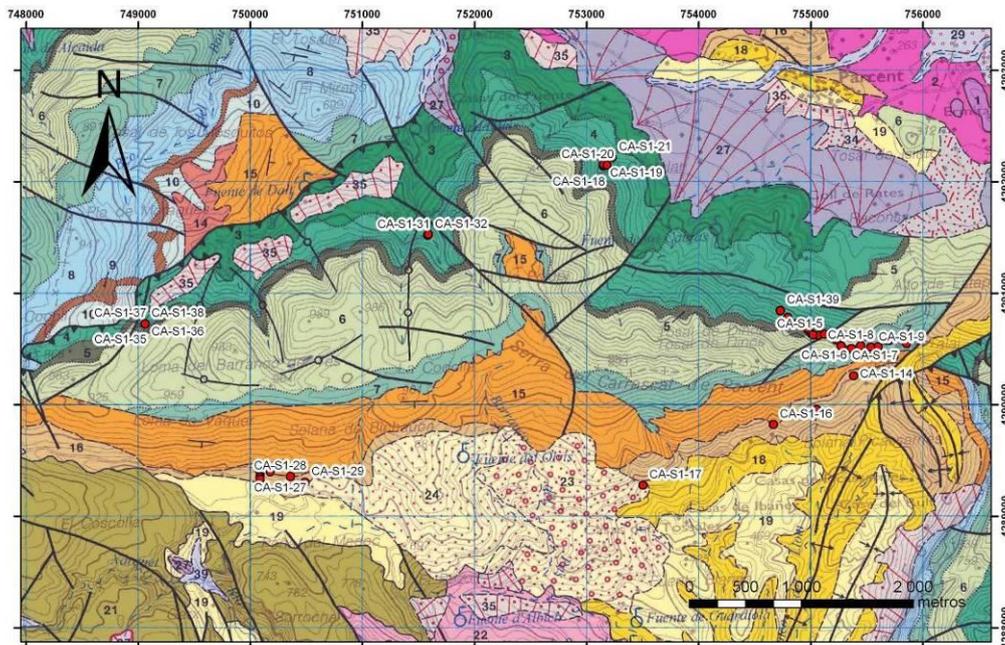


Figura 11. Localización de las muestras sobre cartografía geológica MAGNA.

3.2.1 Estudio petrográfico

Se ha realizado un estudio petrográfico de las muestra recogidas en los afloramientos carbonatados del acuífero de Carrascal-Ferrer en Alicante (Hoja nº 822, Benissa), con objeto de establecer la correlación entre la fábrica de las rocas carbonatadas y las propiedades físicas (Dürrast y Siegesmund, 1999). Se han identificado los principales elementos texturales y se han clasificado las muestras según los esquemas propuestos por Dunham (1962), Folk (1959, 1962) y Lucia (1995). Asimismo, se ha caracterizado la morfología y el tamaño de los poros, y la existencia y distribución de fisuras en las muestras estudiadas.

Para el estudio petrográfico se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada. La microscopía óptica de polarización es un método indicado para vacíos superiores a 10 μm (la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5 μm). Por tanto, es importante destacar la reducida capacidad de resolución de esta técnica para poros con diámetro inferior a 1 μm . Las observaciones se han realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión de acuerdo con la naturaleza y la preparación de las muestras.

3.2.2 Porosidad abierta

Los ensayos para determinar la porosidad interconectada (p_0) en las 51 muestras indicadas han sido realizados en el laboratorio del IGME de Tres Cantos (Madrid), siguiendo el procedimiento UNE-EN 1936: 2007 (PTE-ET-041 E.8). En esencia, consiste en el procedimiento descrito por Borczak et al. (1990). Una vez preparadas las muestras en cubos y con unas dimensiones de unos 4 a 6 cm de lado, se procede a su secado en estufa a 105-110 °C durante 24 horas. Posteriormente, se introducen en una cámara de vacío y se llenan de agua a presión atmosférica y a temperatura ambiente hasta que su peso permanezca constante. De esta forma la porosidad interconectada (p_0) es evaluada usando la siguiente expresión (Borczak et al., 1990):

$$p_0 = \frac{G_n - G_s}{G_n - G_{nw}}$$

donde, G_n es el peso de la muestra saturada con agua, G_s es el peso de la muestra seca a 105-108 °C, G_{nw} es el peso de la muestra saturada en agua y pesada en agua (balanza hidrostática), aplicando el principio de Arquímedes.

3.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas

El procedimiento empleado para el cálculo de las reservas totales ha requerido de la determinación de los volúmenes saturados de formaciones acuíferas, entre la superficie piezométrica, situada a distintas cotas, y el techo y muro de cada formación diferenciada en el modelo 3D. También es necesario conocer la porosidad abierta y el coeficiente de almacenamiento de las formaciones acuíferas.

Una vez calculado el modelo geológico 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer se procede a la construcción de un *statigraphic grid*. El *statigraphic grid* es un objeto de *Gocad* que consiste en una malla 3D deformada y ajustada a las superficies que limitan las formaciones (techo, muro y fallas o discordancias erosivas). La malla 3D puede ser cortada por la superficie piezométrica a diferentes cotas y de esta forma calcular el volumen de roca saturada. También se puede calcular el volumen de roca confinante del acuífero para cada superficie piezométrica.

De esta forma se han calculado las curvas de reservas subterráneas que resultan de aplicar porosidades abiertas que corresponden a los percentiles 25 y 75 de las muestras recogidas en campo (Anexos II y III). Por curva de reserva se entiende aquella función que expresa el volumen de reservas de un acuífero por debajo de una cota determinada (López-Geta, 2004).

Las reservas máximas se han calculado considerando los volúmenes comprendidos entre la superficie piezométrica más alta, obtenida a partir del periodo de registro disponible (1986-2013) y el techo y el muro de las formaciones acuíferas modelizadas, lo que ha permitido estimar, en esas fechas, qué parte del acuífero presentaba un comportamiento confinado y qué parte presentaba carácter libre.

4 RESULTADOS

4.1 Modelización 3D

El modelo geológico 3D del acuífero Carrascal-Ferrer se ha construido a partir de la integración de datos de superficie y subsuelo disponibles (tabla 1) y con la metodología expuesta en el apartado 3.1.2. El modelo 3D final está formado por 7 unidades o formaciones geológicas, limitadas a techo y muro por superficies estratigráficas y lateralmente por fallas y diapiros triásicos.

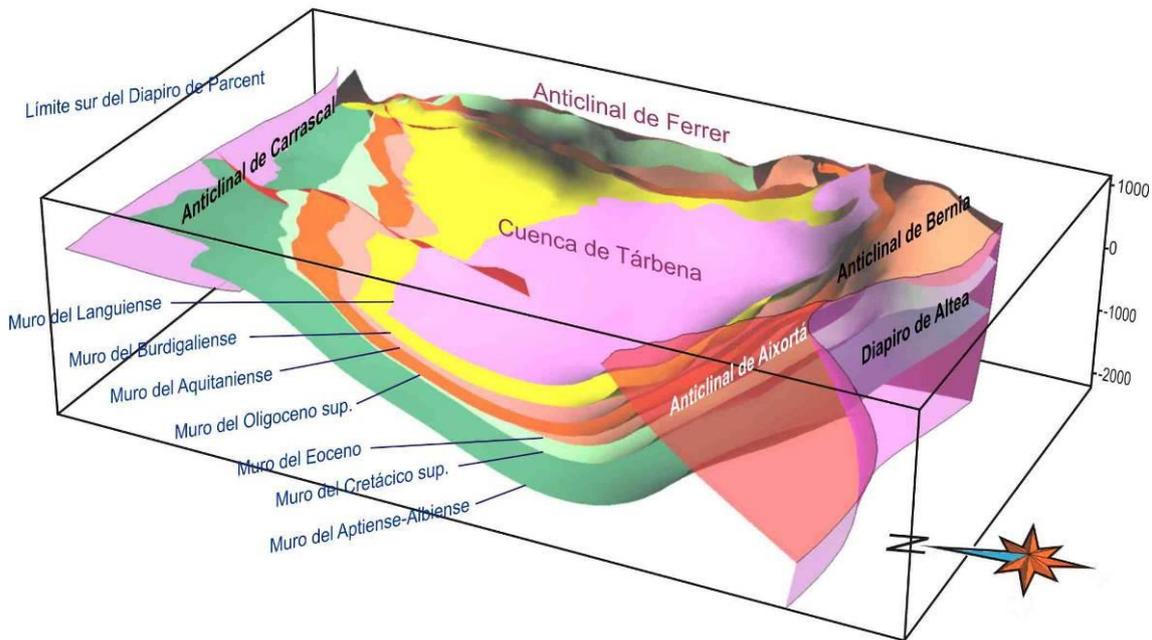


Figura 12. Vista 3D del Modelo geológico 3D del Acuífero de Carrascal-Ferrer.

Las formaciones geológicas modelizadas son las siguientes:

- Unidad Mioceno medio
- Unidad Burdigaliense
- Unidad Aquitaniense (acuífero Carrascal-Ferrer)
- Unidad Oligocena (acuífero Carrascal-Ferrer)
- Unidad Eocena (acuífero Carrascal-Ferrer)
- Unidad Cretácico superior . Paleoceno (acuífero Carrascal-Ferrer)
- Unidad Aptiense . Albiense (acuífero Carrascal-Ferrer)

El modelo geológico 3D está limitado al norte por el muro de la unidad Aptiense-Albiense que aflora en el núcleo de una amplia cresta anticlinal de dirección E-O. Hacia el noreste el modelo está limitado por el diapiro de Parcent y hacia el noroeste por la falla inversa que cabalga la unidad Aptiense . Albiense sobre el Cretácico superior . Oligoceno en la Sierra del Cocoll. El límite oriental del modelo 3D es la falla N-S que limita la Sierra de Ferrer. Hacia el sur el límite corresponde al diapiro de Altea y al suroeste a 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 norte-sur arbitrario que pasa al este de la población de Castell de Castells.

La calidad del modelo obtenido depende en gran medida del número de datos utilizados y su distribución espacial. De esta manera, en aquellas regiones donde existan más datos, la semejanza del modelo con la realidad será mayor y más fiable. En las áreas donde no existan suficientes datos, el modelo estará más ligado a la interpretación del modelizador y por tanto será menos fiable. En la figura 13 se muestra la distribución espacial en planta de los datos utilizados para construir el modelo geológico. En esta figura se puede observar como la región con menos datos corresponde a la zona occidental del acuífero bajo la Cuenca de Tárben. En esta región no existen sondeos y los horizontes sísmicos de la línea RV-71-V pierden definición. Esta zona será por tanto más imprecisa en el modelo.

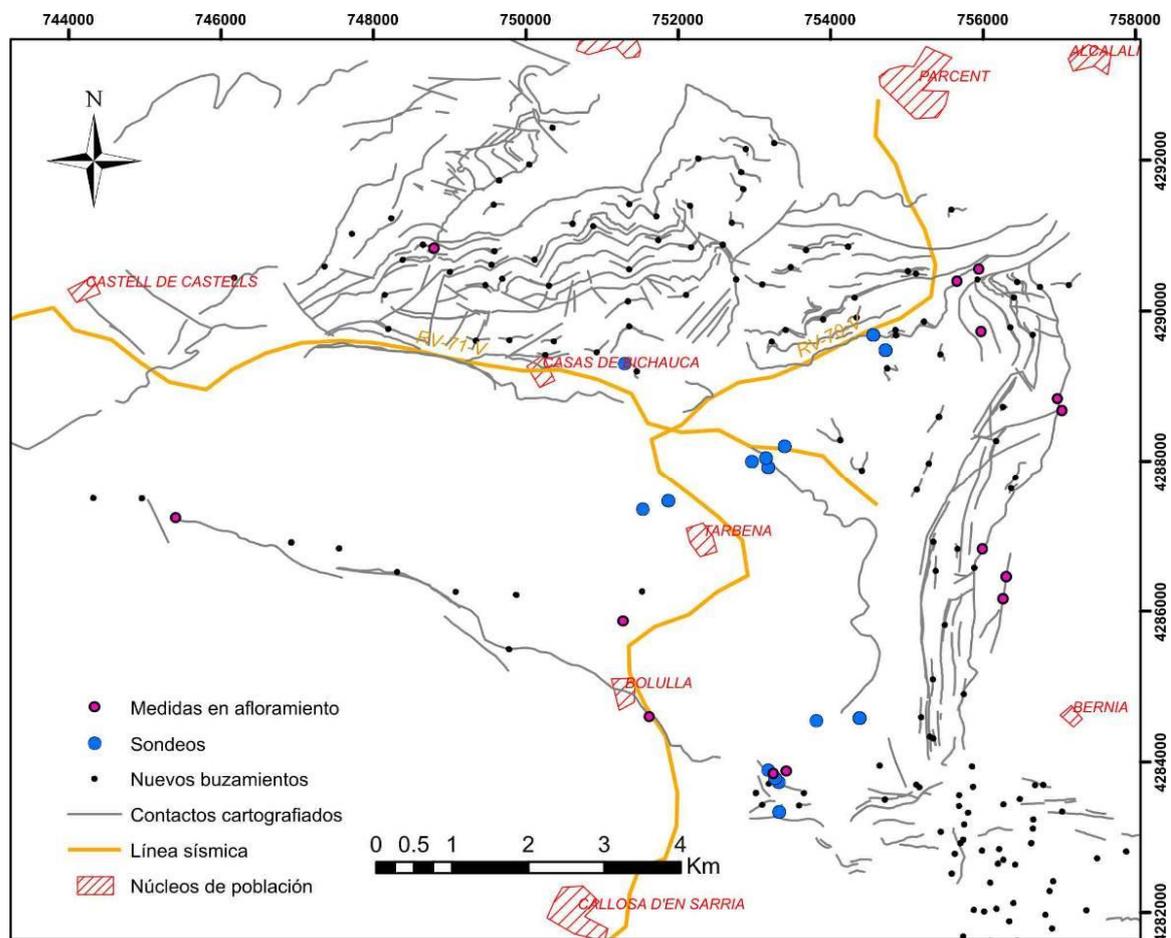


Figura 13. Distribución de datos de superficie y subsuelo utilizados para la construcción del modelo 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer.

En la tabla 2 se muestran los diferentes tipos de datos utilizados para cada una de las unidades modelizadas. Mientras que algunas unidades como el Oligoceno están interpretadas a partir de información de superficie, sondeos y sísmica, otras como la Unidad Eocena no tiene ningún dato de subsuelo.

Unidades modelizadas	Nuevos buzamientos adquiridos	Nuevos contactos cartografiados	Número de sondeos que perforan la unidad	Horizontes sísmicos interpretados
Mioceno medio	Si	No	5	No
Burdigaliense	Si	No	7	No
Aquitaniense	Si	Si (Sierra de Carrascal)	3	Si
Oligoceno	Si	Si	6	Si
Eocena	Si	No	ninguno	No
Cretácico superior – Paleoceno	Si	Si (Sierras de Carrascal y Ferrer)	2 (sin alcanzar el muro)	No
Aptiense – Albiense	Si	Si (Sierras de Carrascal y Ferrer)	ninguno	Si

Tabla 2. Datos incorporados al modelo 3D para cada unidad modelizada.

En general se puede concluir que la posición del depocentro o zona más profunda de la sinforma de la Cuenca de Tárbenas está bien caracterizada a partir de la interpretación 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, se encuentran situados entre el meridiano que pasa por Bolulla y la Sierra de Ferrer y desafortunadamente son en su mayoría poco profundos. Los sondeos, por tanto no aportan mucha información a excepción del Pozo Picaserías y el sondeo Coll de Rates.

A continuación se describen las características geométricas de cada una de las unidades modelizadas:

Unidad Mioceno medio.

Esta unidad está formada de techo a muro por unas margas y margocalizas gris-azuladas y unas calizas fosilíferas. La formación de calizas forma pequeños acuíferos libres en la Cuenca de Tárbenas denominados Acuífero de Bolulla, Acuífero de Tárbenas y Acuífero de los Chorros. En este trabajo no se han diferenciado en la unidad Langhiense-Serravallense las calizas de las margas y margocalizas infrayacentes debido a que no se disponen de suficientes datos de subsuelo para caracterizar la geometría de esta formación acuífera.

El muro de esta unidad (figura 14) se dispone discordante sobre las unidades Burdigaliense y Aquitaniense. La unidad aflora únicamente en la Cuenca de Tárbenas y se corresponde con una cuenca intramontañosa marina que se encuentra plegada en el límite sur con la Sierra de Aixortá en que los sedimentos se verticalizan o llegan a estar en algún caso invertidos como consecuencia de un régimen transpresivo.

La zona donde el muro de la formación se encuentra más profundo se extiende entre las poblaciones de Bolulla y Tárbenas a -120 metros sobre el nivel del mar. La potencia máxima alcanzada en este sector es de unos 450 metros.

Los sondeos que cortan el muro de esta unidad son el sondeo de Tárbenas (20m), Font Grossa I (25m) y Font Grossa II (18m). Los sondeos Onaire y Poble Dalt, de 250m y 142m de profundidad respectivamente y situados sobre la unidad, no llegan a cortar el muro de esta.

Unidad Burdigaliense.

Consiste en una unidad formada por alternancias de margas gris-azuladas y areniscas turbidíticas. Esta unidad se encuentra discordante sobre la unidad Aquitaniense.

La unidad Burdigaliense muestra un depocentro situado al suroeste de Tárben, con una profundidad máxima de -435 m.s.n.m. Sin embargo, el mapa de contornos del muro de la unidad (figura 15) revela que existe un eje topográfico secundario NNE-SSO cercano a la parte norte del anticlinal de Ferrer, superpuesto a la tendencia principal de la cuenca ENE-OSO. Esta subsidencia local sincrónica al depósito podría estar relacionada con la deformación a lo largo del anticlinal de Ferrer.

La potencia media de esta unidad es de unos 350 m.

Los sondeos que perforan la unidad aunque sin alcanzar el muro son el Sondeo de Tárben, Sondeo de Font Grossa I, Sondeo de Font Grossa II y Sondeo de Font Grossa III. Los sondeos Coll de Rates, pozo Picaserries y Bandoleros II alcanzaron el muro de la unidad.

Unidad Aquitaniense

La Unidad Aquitaniense está formada por calizas arenosas, calcarenitas y margas y forman parte del acuífero de Carrascal-Ferrer. Se emplaza discordantemente sobre las rocas paleógenas y muestra un adelgazamiento hacia los márgenes de la cuenca relacionados con el depósito sincrónico al plegamiento. La potencia media es de unos 135 m y en su depocentro, situado entre Tárben y Bolulla, el muro de la unidad se encuentra a -580 m.s.n.m (figura16).

Hacia el norte, en la Sierra de Ferrer, esta unidad y las infrayacentes están deformadas por un complejo pop-up que deforma los sedimentos miocenos (ver corte 3 figura 22).

El muro de la unidad ha podido ser reconocido en los perfiles sísmicos a partir de la continuación desde superficie del reflector que coincidía con el afloramiento de estas rocas. Los sondeos 3032/2/31, Coll de Rates y Picaserries llegan a perforar en su totalidad a la unidad aquitaniense.

Unidad Oligocena

La Unidad Oligocena la forman turbiditas carbonatadas y margas que afloran en la Sierra de Carrascal que pasan lateralmente a calizas arrecifales y pararrecifales en la Sierra de Aixortá y en las Fuentes del Algar, situadas al sur. La evolución lateral de las facies de esta unidad es el resultado del levantamiento del anticlinal de Carrascal durante el Oligoceno superior. Esta unidad forma parte del acuífero de Carrascal-Ferrer y en ella están situadas las Fuentes del Algar, principal punto de descarga del acuífero.

Estas rocas del Oligoceno superior 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.

Al igual que en las unidades suprayacentes, los estratos del Oligoceno superior muestran un progresivo adelgazamiento hacia la cresta del anticlinal de Carrascal y un engrosamiento hacia la Cuenca de Tárben. Este hecho es debido a la simultaneidad

del plegamiento con el depósito de la unidad. En el área de las Fuentes del Algar y de la Sierra de Bernia, la compresión provoca el apretamiento de los pliegues y del espacio de acomodación dentro del núcleo anticlinal con la formación de pliegues disarmónicos vergentes al norte y probablemente despegados en la estratificación Neocomiense infrayacente.

Esta unidad oligocena tiene una potencia media de unos 180 m de espesor. A partir de la observación de los mapas de isohipsas del muro de la unidad se comprueba, al igual que en las unidades suprayacentes, un depocentro situado entre las localidades de Tárbenas y Bolulla, a -850 metros bajo el nivel del mar (figura 17).

Los sondeos 3032/5/31, Coll de Rates, Pozo Picaseries y aquellos localizados cerca de la Fuentes del Algar, perforan esta unidad. También ha sido posible reconocer el muro de la unidad en los perfiles sísmicos, a partir de la intersección del reflector con el afloramiento en superficie.

Unidad Eocena

La unidad eocena está formada por calizas con alveolinas y corales. Se restringe a la parte sur de la cuenca y aflora únicamente en el área de Fuentes del Algar y Sierra de Bernia, ya que fue erosionada en la mitad norte durante el levantamiento del anticlinal de Carrascal. Junto con Cretácico-Paleoceno representan el basamento de la Cuenca de Tárbenas.

La posición del límite erosivo bajo la cuenca de Tárbenas no es bien conocido y ha sido estimado a partir de la geometría de la capa suprayacente erosiva y la capa infrayacente paraconforme. Por lo tanto, la posición del límite de los sedimentos eocenos bajo el subsuelo presenta un cierto grado de incertidumbre.

En la zona sur, la unidad tiene una potencia media de 240 m. La máxima profundidad del muro de la unidad se sitúa entre Tárbenas y Bolulla, a -960 metros bajo el nivel del mar (figura 18).

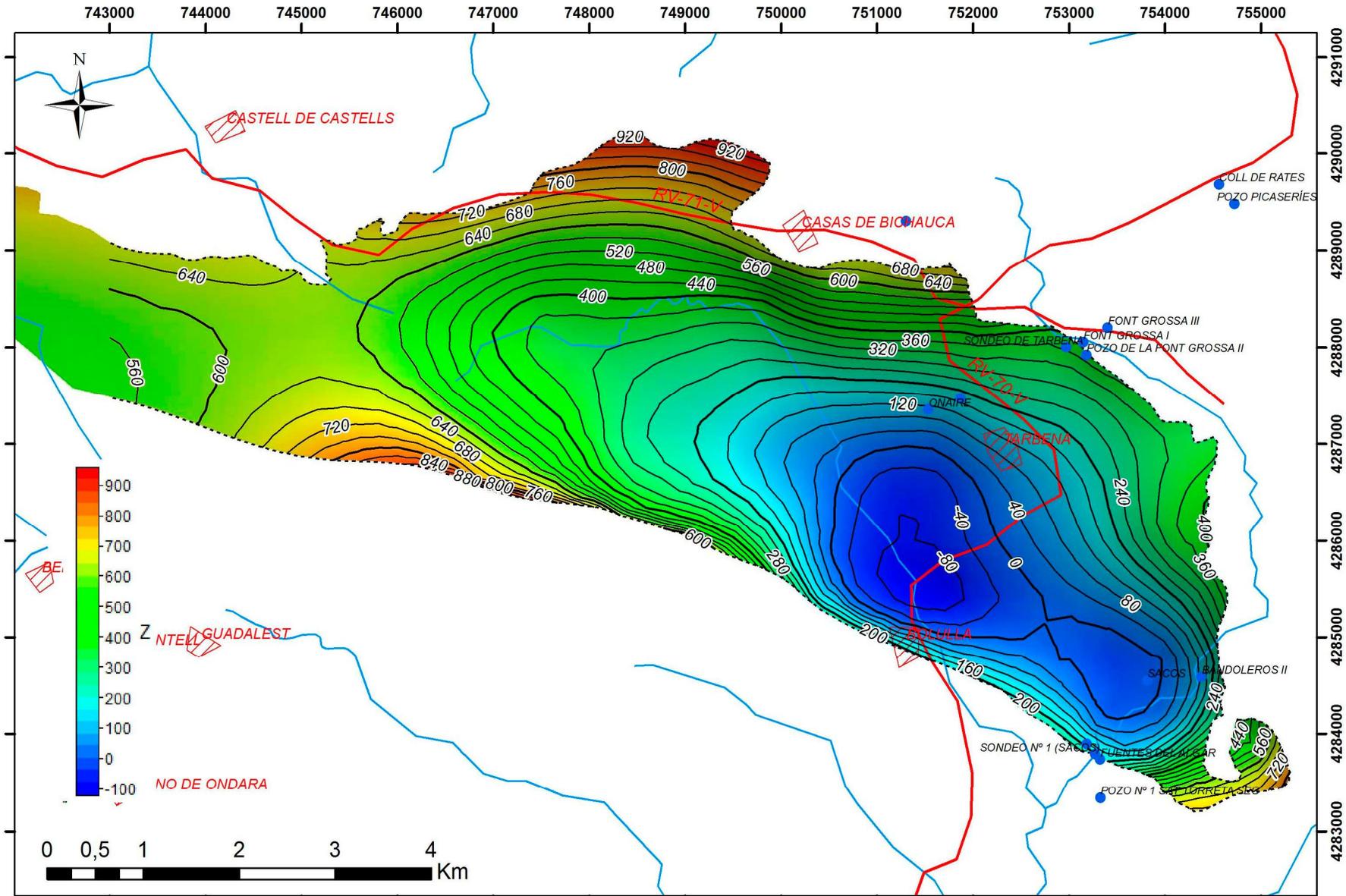


Figura 14. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Mioceno medio. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.).

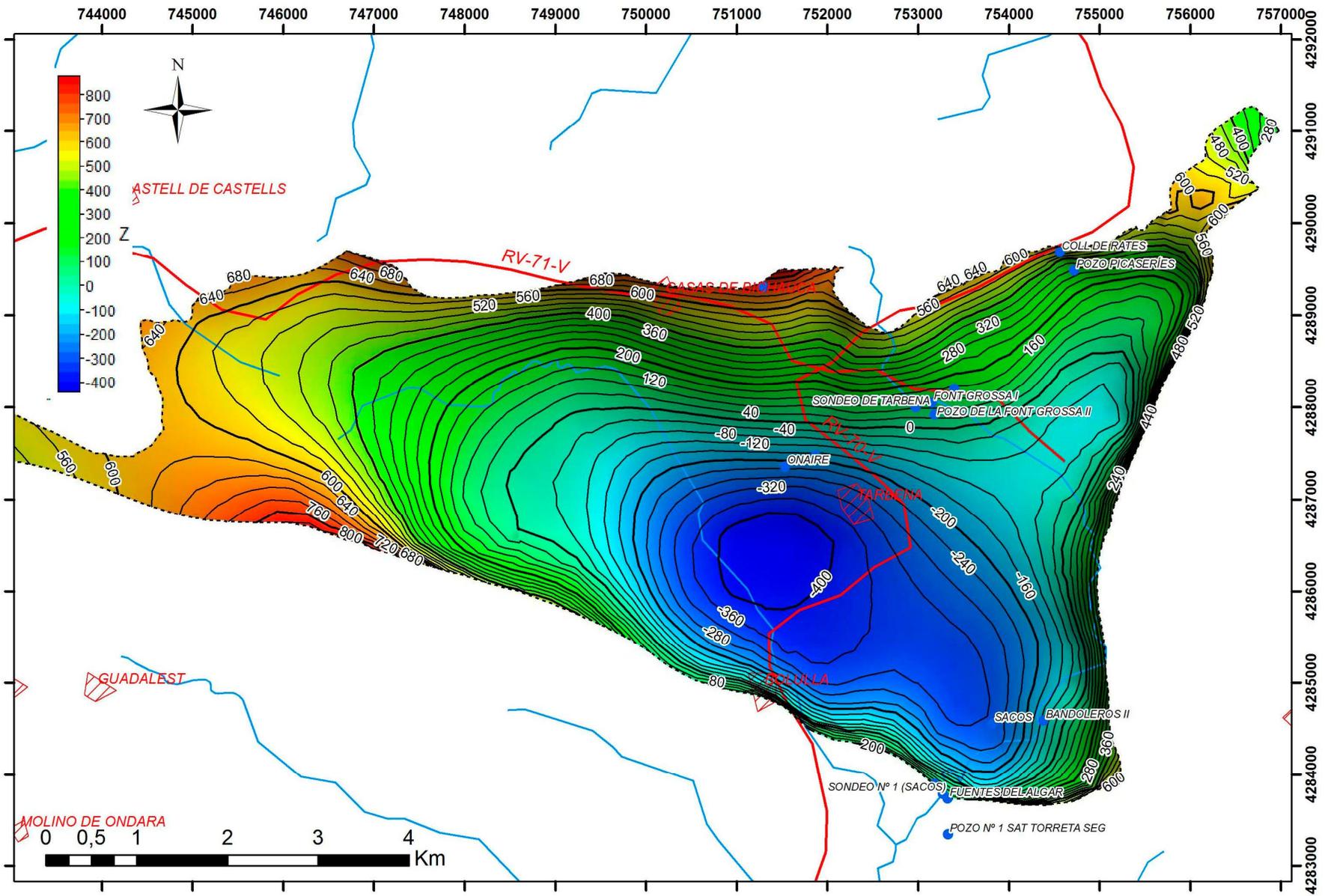


Figura 15. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Burdigaliense. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.).

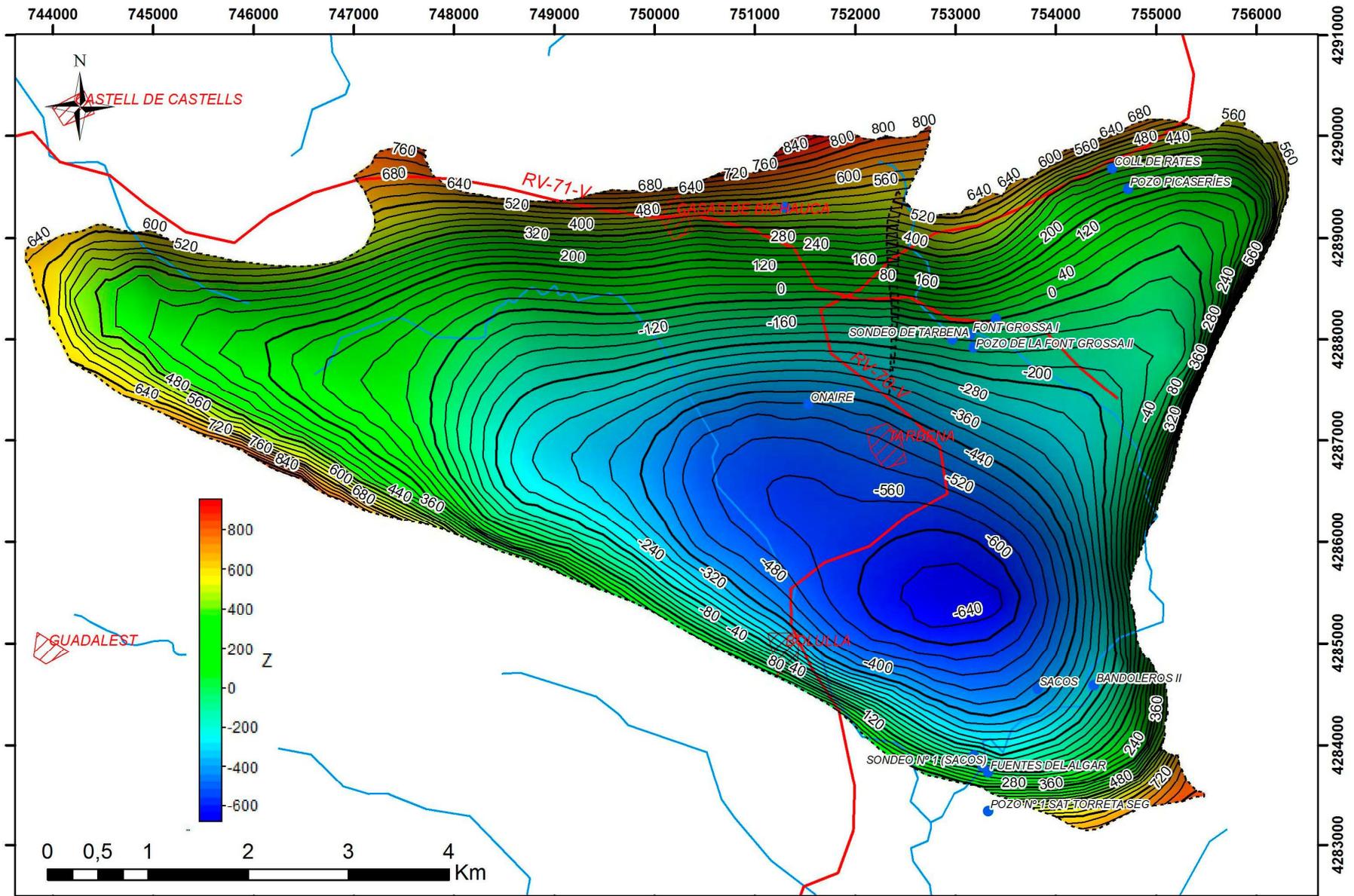


Figura 16. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Aquitaniense. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.).

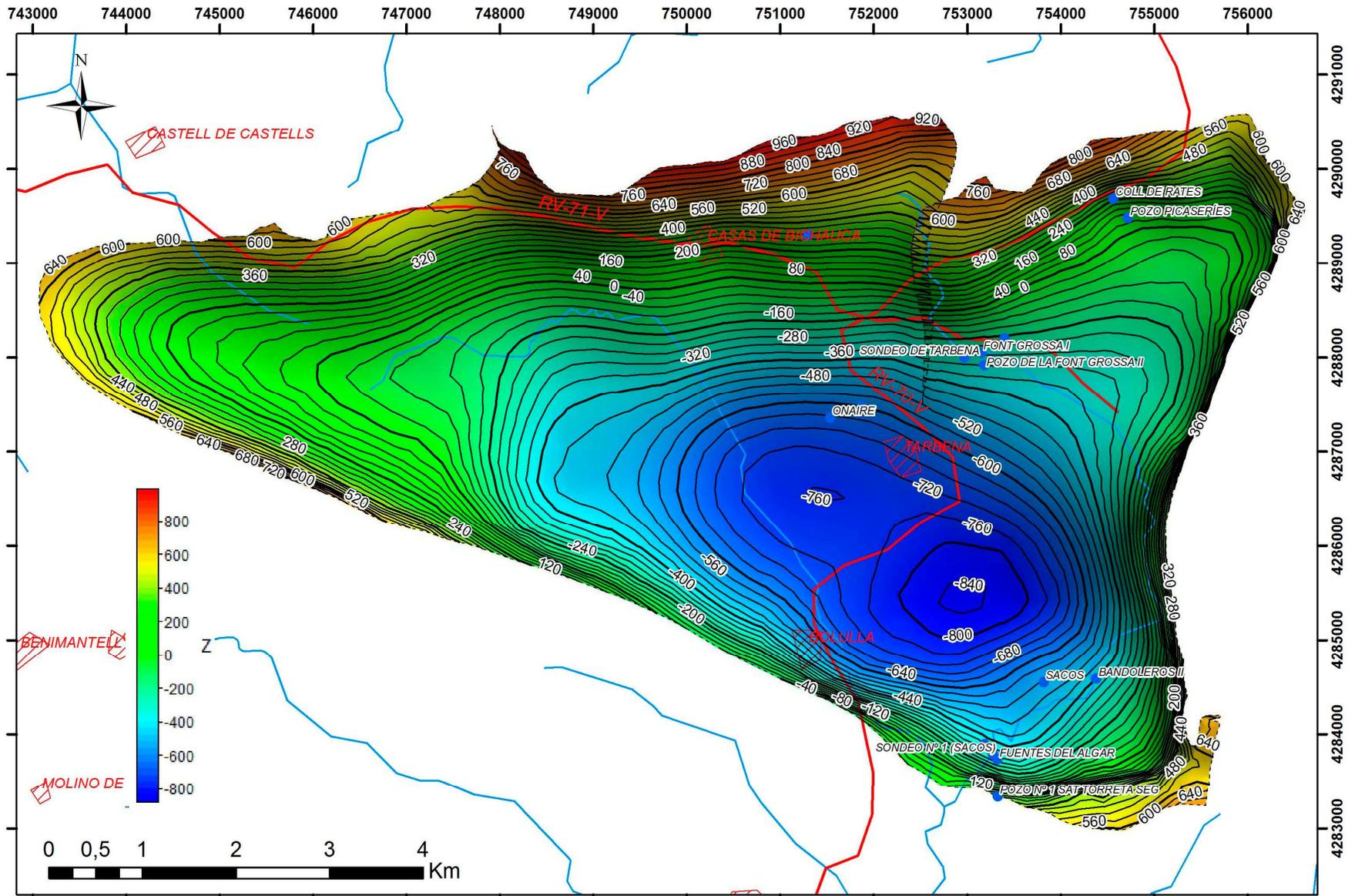


Figura 17. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Oligocena. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.).

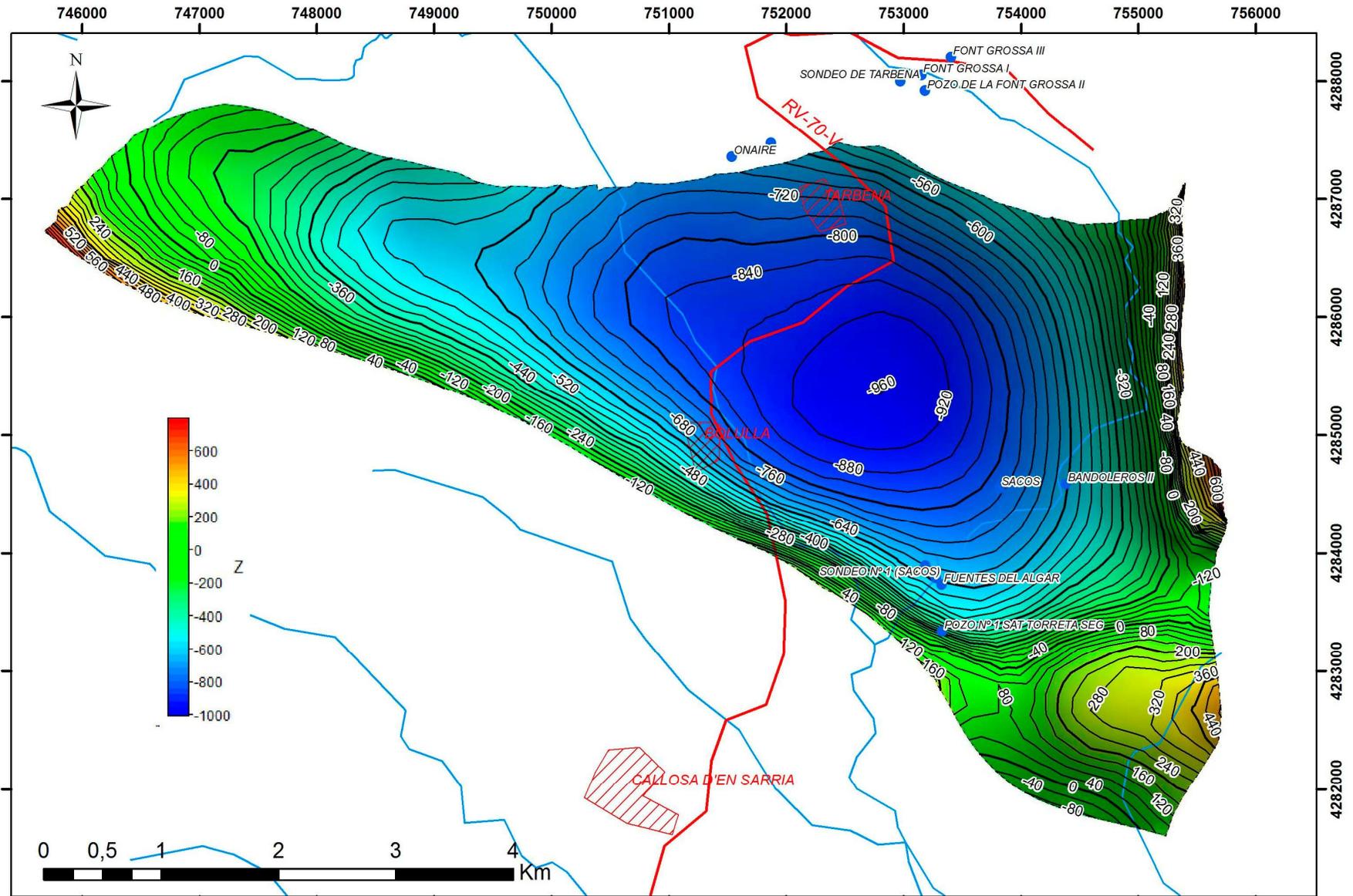


Figura 18. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Eocena. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.).

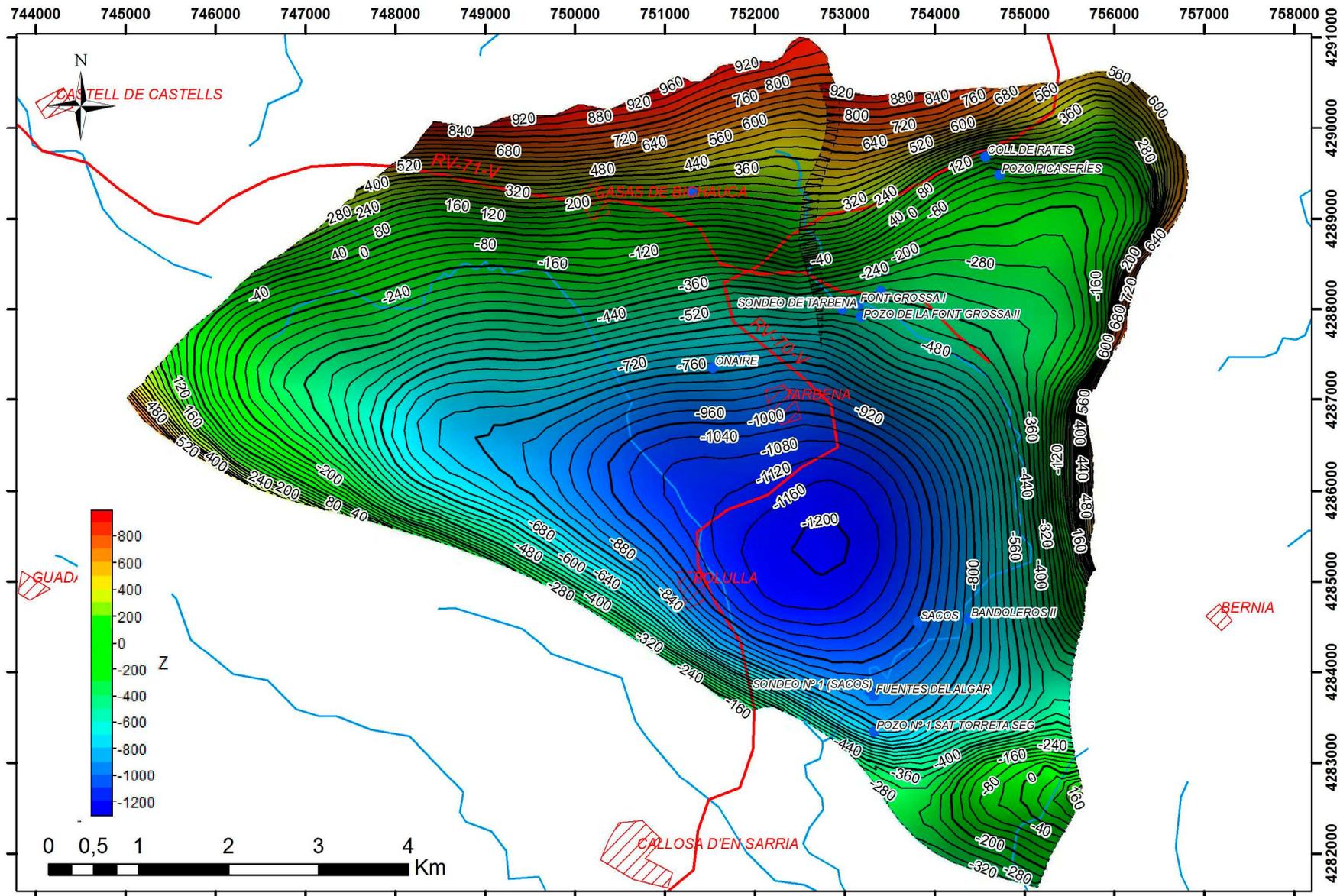


Figura 19. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Cretácico superior. Profundidad referida al nivel del mar (m.s.n.m.).

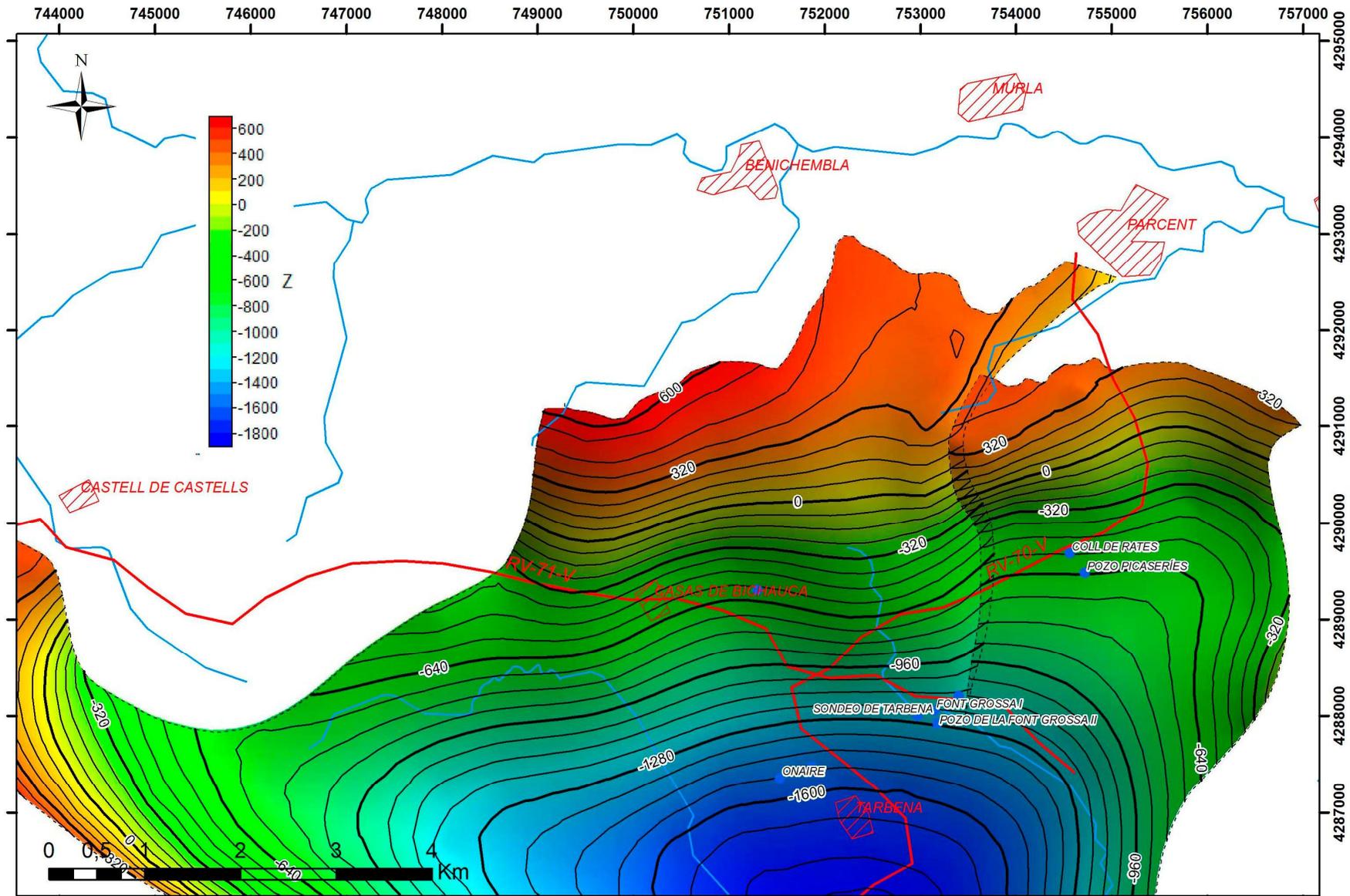


Figura 20. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Aptiense-Albiense. Zona norte. Profundidad referida sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

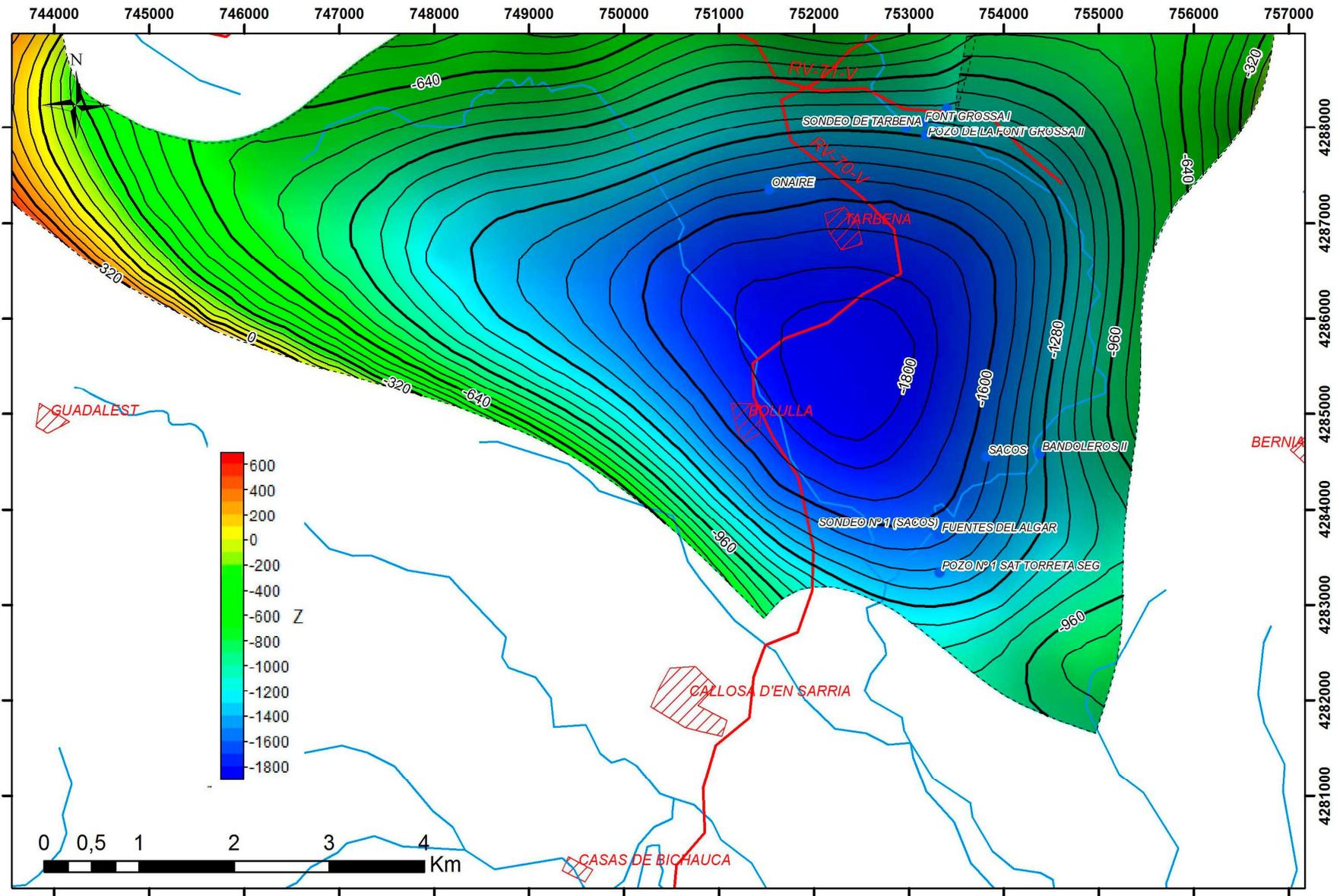


Figura 21. Mapa de isobatas del muro de la Unidad Aptaense-Albiense. Zona sur. Profundidad referida sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Unidad Cretácico superior . Paleoceno.

Esta unidad está formada por calizas, margocalizas y margas. Mientras que la Sierra de Carrascal y en la parte norte de la Sierra de Ferrer se encuentra en su mayor parte erosionado, en la Sierra de Bernia alcanza potencias de 360 m. La mayor profundidad del muro se localiza a unos -1200 metros bajo el nivel del mar (figura 19).

Únicamente los sondeos Coll de Rates y el Pozo Picaseríes perforan esta unidad en la región, aunque sin alcanzar el muro.

Unidad Aptiense-Albiense

La unidad Aptiense-Albiense la integran calizas arrecifales, calizas orgánicas y margas. Forma parte del acuífero de Carrascal Ferrer y descansa sobre las margas y margocalizas barremienses que constituyen el límite inferior impermeable del acuífero. No obstante, debe ser destacada la existencia de varios sondeos que perforan el Neocomiense, al norte de la Sierra de Carrascal y Ferrer, y que llegan a cortar hasta dos formaciones acuíferas de calizas y areniscas intercaladas entre las margas neocomienses, de hasta 100 metros de potencia cada uno de ellos. Estos acuíferos neocomienses no han sido incluidos en el modelo 3D debido a que no llegan a aflorar. Además deben tener cierta complejidad estructural por su proximidad al Diapiro de Parcent y no es posible reconstruir su geometría únicamente con los datos de los sondeos.

La potencia media de esta unidad es de 675 metros y alcanza una profundidad máxima de -1,800 metros bajo el nivel del mar (figuras 20 y 21).

La Unidad Aptiense-Albiense no ha sido perforada por ningún sondeo en la zona y se puede reconocer en los perfiles sísmicos caracterizada por fuertes reflectores de gran amplitud. Hacia la base, las margas neocomienses están caracterizadas por reflectores de carácter discontinuo y de baja amplitud. En profundidad, la unidad Neocomiense muestra reflectores de alta amplitud relacionados probablemente con niveles de calizas.

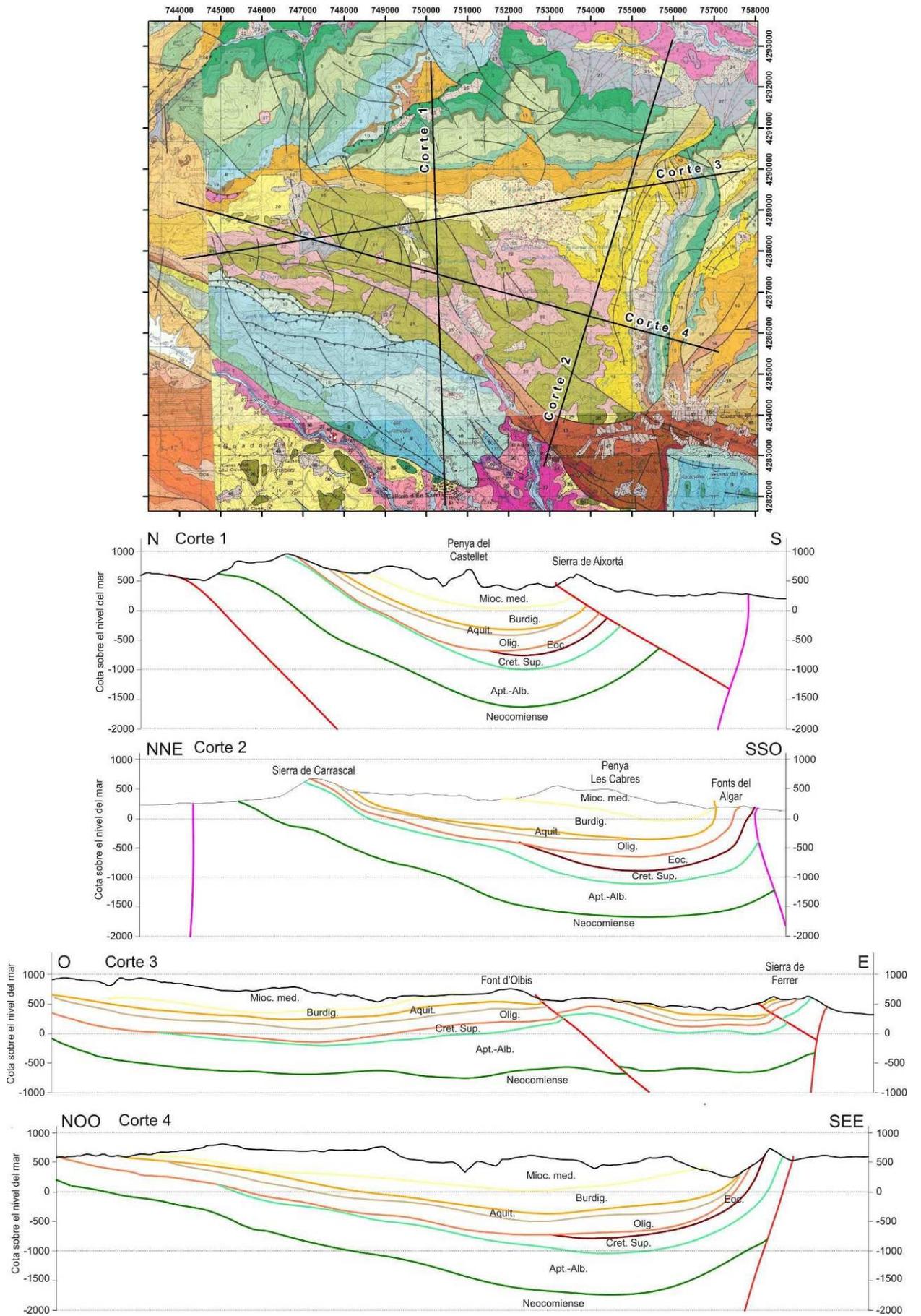


Figura 22. Cortes geológicos realizados al modelo 3D.

4.2 Sistema poroso

La distribución estadística de los valores de porosidad abierta determinados por inmersión de las muestras de agua en cámara de vacío se representa en la figura 23. La muestra estadística no se ajusta a una distribución normal y el valor medio de la porosidad abierta y la desviación estándar asociada es $1,35 \pm 1,50\%$. En la figura 23 se observa la presencia de varias muestras con porosidades anómalas ($>5\%$) que se deben a la existencia de algunas fracturas abiertas en las probetas. La mediana y los percentiles 25 y 75 de la porosidad abierta son de 0,80, 0,35 y 1,9 %, respectivamente.

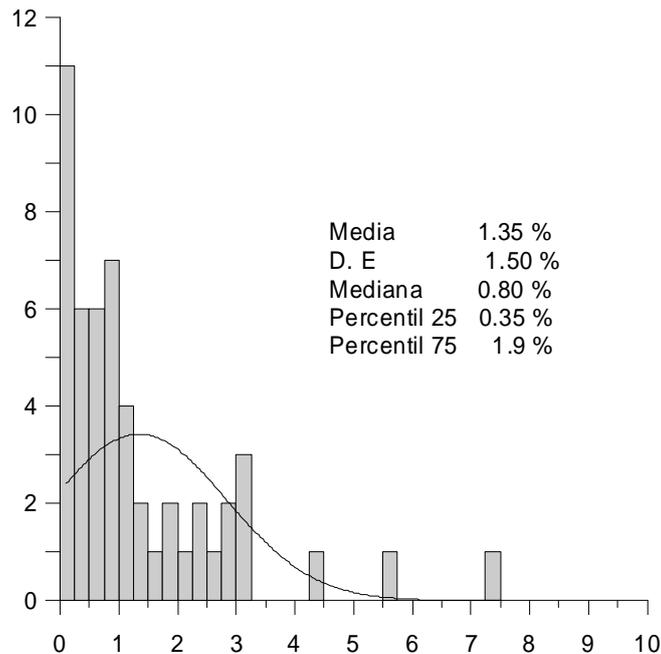


Figura 23. Histograma de los valores de porosidad abierta de las muestras tomadas en el acuífero de Carrascal-Ferrer.

El valor de la mediana de la muestra estadística de la porosidad es inferior al 1%, un valor de porosidad algo reducido, pero que coincide con el valor del 1% aportado por la DPA.

En la figura 24 se representan los valores de la mediana y los percentiles 25 y 75 de las muestras de las principales formaciones del acuífero. El limitado número de muestras empleado en este trabajo no permite fijar un valor medio por formación, pero a grandes rasgos, se puede observar que son las calizas del Oligoceno (3%), junto con las de las de la unidad Aptiense-Albiense (Fm. Seguili) (1,25%) las que presentan mayores valores de porosidad abierta.

En la figura 25 se comparan los valores de porosidad agrupados según la clasificación petrofísica de Lucia (1995). Se comprueba que las muestras con mayores tamaños de grano y menor proporción de lodo (Clase 1) presentan una mayor porosidad interpartícula. Por su parte, las muestras pertenecientes a las Clase 2 y 3 presentan porosidades medianas de 0.6 y 0.95 % respectivamente. En todo caso, la mayoría de las muestras (59%) pertenecen a la Clase 3 de la clasificación de Lucia, frente a un 14% que pertenecen a la Clase 1. La mayor proporción de muestras lodo dominadas+ explicaría en cierto modo el reducido valor mediano de porosidad de la muestra estadística disponible, y apunta a que estas muestras presentan una baja permeabilidad intrínseca, según los criterios de Lucia (1995).

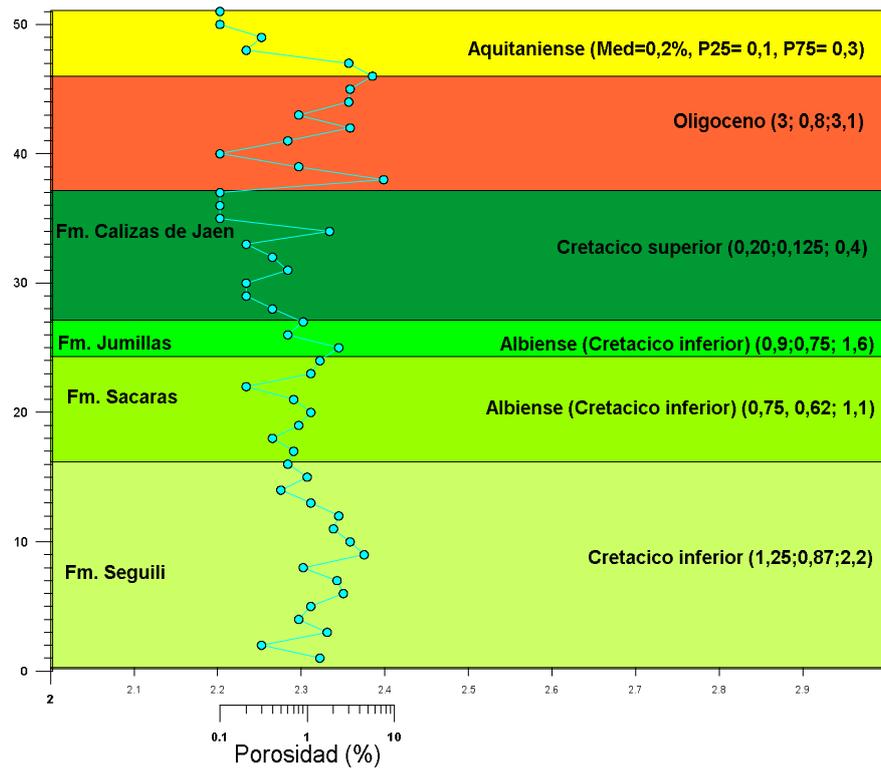


Figura 24. Distribución de porosidades abiertas por formaciones.

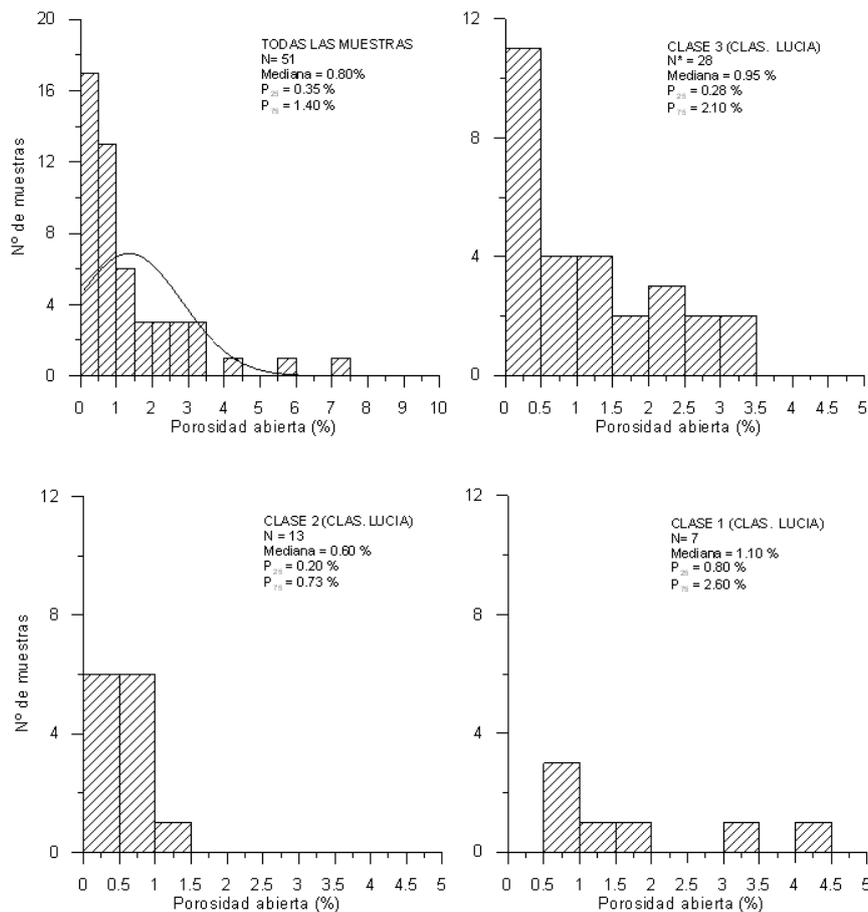


Figura 25. Histograma de los valores de porosidad abierta agrupados según la clasificación de Lucia (1995).

4.3 Capacidad total de almacenamiento. Curva de reservas

Los valores de reservas de agua subterránea calculados se resumen en la gráfica de la figura 26, en la que se ha representado la curva de reservas del acuífero de Carrascal-Ferrer.

Las reservas dinámicas, entendiendo por reserva dinámica como aquella que se almacena en un acuífero por encima de la cota de drenaje de los principales puntos de surgencia, se han calculado superponiendo la piezometría de aguas altas al modelo 3D. Se ha considerado que el nivel piezométrico en esta situación quedaría entorno a los 180 m.s.n.m. en el sondeo Picaserías y que el punto de menor potencial coincide con el de las surgencias de las Fuente del Algar, a 150 m.s.n.m. Las reservas dinámicas que resultan en la situación más desfavorable ($p_0 = 0,35\%$ y $S = 10^{-6}$) son de 6 hm^3 . Con la porosidad correspondiente al percentil 75 de la muestra estadística ($p_0 = 1,9\%$) y un coeficiente de almacenamiento de 10^{-5} resultan unas reservas dinámicas de $19,4 \text{ hm}^3$. El valor medio entre ambos extremos sería de $12,7 \text{ hm}^3$. En relación con lo anterior, debe ser destacada la importante similitud de los valores de porosidad eficaz media que se consiguen tanto con el análisis de las porosidades de la roca (con un valor mediano de $0,80\%$) como con el análisis de la variación de almacenamiento y de los ensayos de bombeo (1%), realizado en DPA (2009).

El volumen total de acuífero saturado, en esas condiciones ($81,51 \text{ km}^3$), se ha multiplicado por las dos porosidades eficaces consideradas (percentiles 25 y 75) y por un S de 10^{-6} , en el caso de la menor porosidad ($0,35\%$) y de 10^{-5} , en el correspondiente a la mayor ($1,9\%$). 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. Los resultados se indican en la figura 26. Siempre ha sido considerada la componente elástica de almacenamiento. Las reservas máximas que resultan, según los cálculos realizados, están comprendidas entre 224 y 1218 hm^3 .

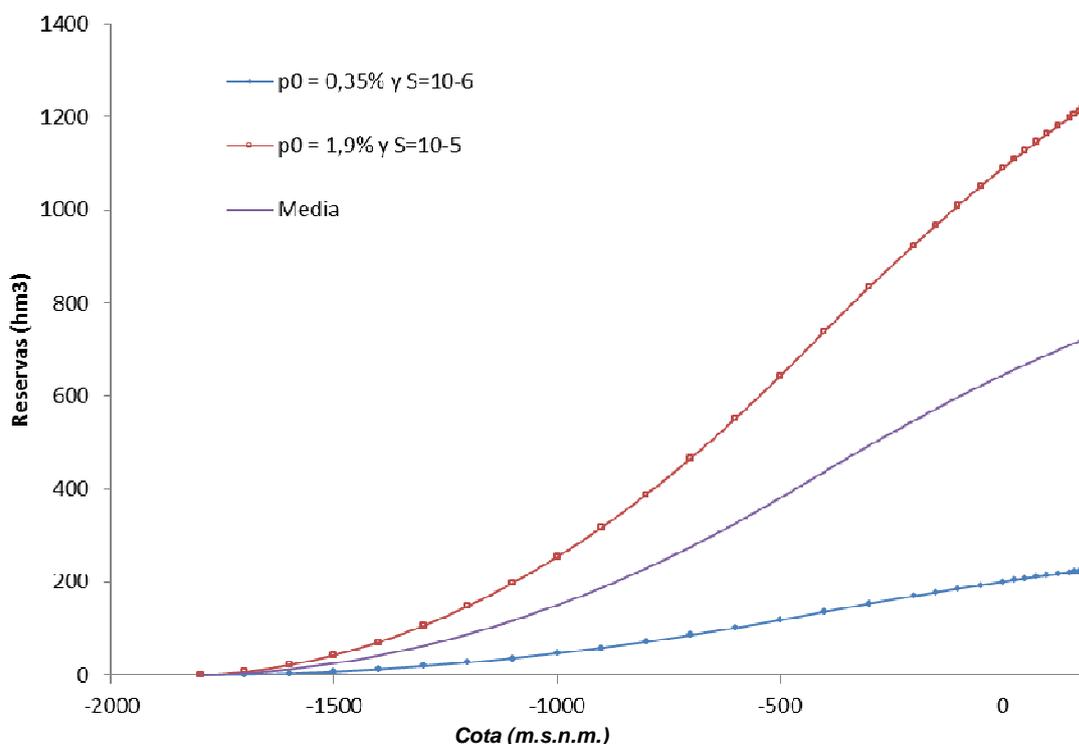


Figura 26. Curvas de reservas del Acuífero Carrascal-Ferrer obtenidas a partir del modelo 3D.

El ajuste polinomial de las curvas de reservas representadas en la Figura 26 es el que se indica a continuación:

Reservas correspondientes al percentil 25 de porosidad ($P_0 = 1.9\%$ $S = 10^{-5}$)

$$\text{Reservas (hm}^3\text{)} = -1 \cdot 10^{-10}x^4 - 5 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0004x^2 + 0,7861x + 1092$$

Reservas correspondientes al percentil 75 de porosidad ($P_0 = 0.35\%$ $S = 10^{-6}$)

$$\text{Reservas (hm}^3\text{)} = -3 \cdot 10^{-8}x^3 - 3 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,1534x + 199,59$$

Reservas medias

$$\text{Reservas (hm}^3\text{)} = -7 \cdot 10^{-11}x^4 - 3 \cdot 10^{-7}x^3 - 0,0003x^2 + 0,4654x + 646,6$$

Donde x es igual a la cota del nivel piezométrico.

La aplicación de los ajustes polinómicos anteriores al sondeo Picaserías (ubicado en figura 2), donde las cotas piezométricas se encuentran aproximadamente los 180 m s.n.m. y -80 m.s.n.m., proporciona las curvas de explotación de la figura 27.

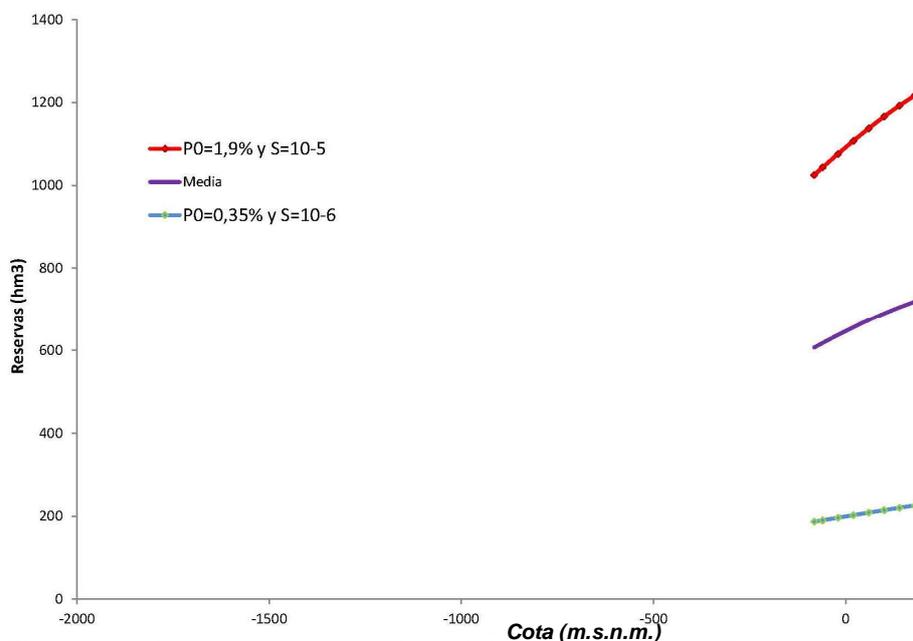


Figura 27. Curvas de explotación del Acuífero Carrascal-Ferrer desde el sondeo Picaserías obtenidas a partir del modelo 3D.

Resultan por tanto unas reservas explotables desde el sondeo Picaserías de:

- 193 hm³ ($P_0 = 1.9\%$ $S = 10^{-5}$)
- 39 hm³ ($P_0 = 0.35\%$ $S = 10^{-6}$)
- 112 hm³ Reservas medias

Se observa, por tanto, el gran volumen de reservas máximas, en principio explotables, que quedan en el Acuífero de Carrascal por debajo de -80 m.s.n.m., del orden de 1.000 hm³.

4.4 Implicaciones hidrogeológicas del modelo

Uno de los dos objetivos principales de este proyecto ha consistido en evaluar las reservas totales de agua subterránea en el acuífero de Carrascal-Ferrer. En este sentido, debe ser subrayado que el cálculo de las reservas recuperables, es decir, el del volumen de agua se puede extraer de un determinado acuífero atendiendo a distintas limitaciones (calidad química del agua, profundidad máxima y costes de extracción, entre otras) requiere un análisis diferente al que aquí se hace. En esos casos es necesario recurrir a la modelización y simulación del flujo subterráneo en distintos escenarios (Alley, 2007). No obstante, un buen modelo de flujo debe estar construido sobre un buen modelo geológico.

Además de la evaluación de reservas a diferente cota piezométrica, que se presenta en el apartado 4.3, se han conseguido tres conjuntos de resultados que deben tener una significativa implicación en la mejora de la gestión y la planificación de este acuífero.

a) En primer lugar, realizado el modelo geológico 3D, es posible exportar las superficies de referencia del mismo a modelos de flujo y transporte de agua subterránea. Será posible exportar cotas de techo y muro georeferenciadas de las formaciones de interés, así como toda la información volcada para la elaboración del modelo (columnas sondeos, perfiles, geofísica, etc.). Se dispondrá así de la información de base y esencial para poder armar modelos robustos de flujo y transporte. En este sentido, se debe indicar que el punto débil de la mayoría 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.

b) La explotación del modelo geológico 3D del acuífero permite que los técnicos de la DPA puedan hacer diseños más eficientes y productivos de sondeos de explotación y/o de investigación de aguas subterráneas. Además, la superposición de estas zonas favorables para la construcción de captaciones con otras capas de información, como las de zonas inundables, zonas de riesgo sísmico, vulnerabilidad a la contaminación, etc., permitirán, incluso, seleccionar emplazamientos idóneos para realizar sondeos que suministren agua de calidad a la población en situaciones de emergencia.

c) Los resultados del modelo deben contribuir a una mejora del conocimiento en lo que se refiere a las condiciones de borde del acuífero. No obstante, seguirán quedando por dilucidar ciertas incógnitas referentes a las posibles conexiones hidrogeológicas laterales con otros cuerpos de agua, que requieren de estudios más de detalle en el perímetro externo al acuífero. En este sentido, los resultados del modelo permiten dilucidar algunas dudas con respecto a la geometría de los límites del acuífero que ya fueron planteadas en IGME (1986). El modelo permite comprobar que lateralmente, los materiales permeables saturados del acuífero de Carrascal-Ferrer se enfrentan a diferentes tramos de los acuíferos Sierra de Aixorta, Cocoll y Depresión de Benissa.

Por último, se quiere poner de manifiesto que es necesario hacer entender que los acuíferos son estructuras tridimensionales que no pueden ser caracterizados de forma adecuada con los mapas hidrogeológicos 2D tradicionales. La integración en los modelos 3D de acuíferos de los datos procedentes de los sondeos mecánicos, de información geofísica y de la investigación petrofísica es absolutamente esencial para seguir avanzando en el conocimiento hidrogeológico de los mismos.

5 CONCLUSIONES

Las conclusiones finales obtenidas en este proyecto son las siguientes.

1.- El primer objetivo de este trabajo es el de establecer una **metodología para la modelización geológica 3D** y la consiguiente evaluación de las reservas hídricas del acuífero de Carrascal-Ferrer. Este tipo de acuífero corresponde a una tipología de acuífero complejo estructuralmente y localizado en el Prebético de la provincia de Alicante. Presenta una buena exposición y afloramiento de las estructuras y no demasiados datos de subsuelo. Para este acuífero se ha aplicado la metodología descrita en el apartado 3.1 que se caracteriza por hacer un esfuerzo importante en el estudio estructural de campo y en la fotointerpretación (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 relación a los datos de subsuelo, es una región donde los sondeos no son muy profundos y las líneas sísmicas no están apoyadas por sondeos de investigación con registro de velocidad. Esta circunstancia se produce en todas las campañas sísmicas localizadas en el Prebético de Alicante. Como conclusión, la metodología utilizada para la construcción del modelo 3D del acuífero de Carrascal-Ferrer es de gran interés por su aplicabilidad en los numerosos acuíferos del Prebético de Alicante con una tipología de datos similar.

2.- El segundo de los objetivos propuestos en este trabajo era la **construcción del modelo geológico 3D** del acuífero. El resultado ha sido satisfactorio ya que se han modelizado un total de 7 unidades geológicas de la región y 5 fallas principales que ha supuesto un avance en el conocimiento previo del acuífero. La mejora en el conocimiento consiste principalmente en la caracterización geométrica 3D de las unidades geológicas que forman el acuífero. A partir de esta mejora en el conocimiento del acuífero se pueden derivar implicaciones en relación a su modelo de funcionamiento y las relaciones laterales con otros acuíferos de la región (apartado 5.1).

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. Este modelo 3D es compatible con los datos geológico estructurales obtenidos en superficie. A partir del modelo 3D se pueden elaborar mapas de isobatas y cortes geológicos en cualquier dirección del espacio.

3.- En relación a la **calidad del modelo 3D** obtenido se puede concluir que es un modelo satisfactorio que se ajusta bien a los datos disponibles. En el apartado 4.1 se discutió sobre el número, distribución y calidad de estos datos. En general, la geometría de la sinforma de la Cuenca de Tárben, está bien determinada a partir de la interpretación de la sísmica de reflexión y los datos de buzamiento obtenidos en superficie. Los sondeos son en su mayoría poco profundos y no aportan mucha información a excepción del Pozo Picaseríes y el sondeo Coll de Rates. La región que muestra una mayor incertidumbre en el modelo es la occidental debido a la ausencia de sondeos y la pérdida de reflectividad de los horizontes sísmicos de la línea RV-71-V.

4. Los nuevos datos geológicos integrados en el modelo geológico del acuífero de Carrascal-Ferrer, además de proporcionar unos valores aproximados de reservas

totales de agua, permiten a los gestores y planificadores del agua disponer de un mejor conocimiento de la estructura del acuífero. El modelo 3D generado indica que es posible la conexión lateral con los acuíferos de Cocoll, de la Sierra de Aixorta y con el de la Depresión de Benissa. Por otro lado, las capas de información georeferenciadas de techo y muro de las distintas unidades acuíferas serán fundamentales para poder construir futuros modelos matemáticos de flujo y transporte, con los que evaluar las reservas potencialmente explotables, además de para conocer los sectores más favorables para la captación de reservas de agua en situaciones de emergencia.

6 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.
- Alley, W.M. 2007. Another water budget myth: the significance of recoverable ground water in storage. *Ground Water*, 45: 251.
- Bachu, S. 2008. Comparison between methodologies recommended for estimation of CO₂ storage capacity in geological media. Carbon Sequestration Leadership Forum (CLSF) and USDOE Capacity and Fairways Subgroup of the Regional Carbon Sequestration Partnerships Program, Canada. 17.
- Banks, C.J. and Warburton, J. 1991. Mid-crustal detachment in the Betic system of southeast Spain. *Tectonophysics* 191, 275. 289.
- Borczak, S., Motyka, J., 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.
- Carrell, J. 2010. X-Section Xacto.
<http://resources.arcgis.com/es/gallery/file//geoprocessing/details?entryID=C83CC388-1422-2418-7F10-B4D3DF5F1EE6>
- De Ruig, M.J. 1992. Tectono-sedimentary evolution of the prebetic fold belt of Alicante (SE Spain) a study of stress fluctuations and foreland basin deformation. PhD thesis, Structural geology and tectonics group. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- DPA. 2007. Mapa del Agua de la Provincia de Alicante. 2ª Edición. Escala 1/150.000. Diputación Provincial de Alicante, Alicante, 78 pp.
- DPA, 2009. Determinación del volumen de reservas útiles en los embalses subterráneos de abastecimiento público, para la información continua a los municipios.
- DPA-IGME, in prep., 2013. Atlas hidrogeológico de la Provincia de Alicante.
- Dulliem, F.A.L. 1992. Porous Media Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press. San Diego, 574 pp.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Am Assoc Petrol Geol Mem* 1: 108. 121.
- Dürrast, H. and Siegesmund, S. 1999. Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rocks. *Int Journ Earth Sciences*. 88: 392. 408.
- Eisinger, C. and 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.
- Farrán, M. 2007. IMAGE2SEGY: Una aplicación informática para la conversión de imágenes de perfiles sísmicos a fichero en formato SEG-Y.
<http://www.icm.csic.es/geo/gma/graf2seggy.html>
- Folk, R.L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *Am Assoc Petrol Geol Bull* 43: 1. 38.
- Folk, R.L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. *Am Assoc Petrol Geol Mem* 1:62. 84.
- García Lobón, J.L., Reguera García, M.I., Martín León, J., Rey Moral, C., Berrezueta

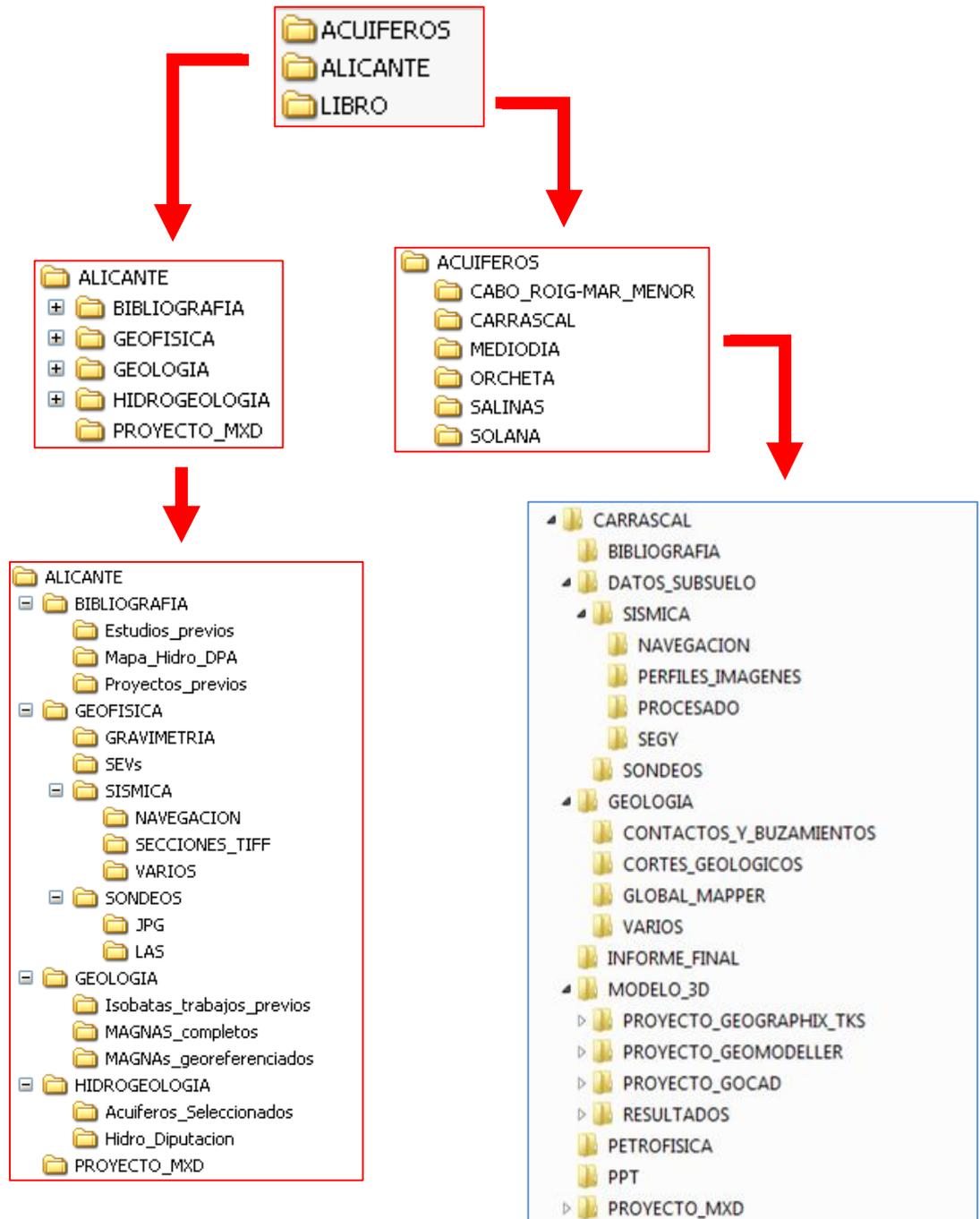
- Alvarado, E.R., Pérez Ortiz, I. 2011. Resumen Ejecutivo del Plan de Selección y Caracterización de áreas y estructuras favorables para el Almacenamiento Geológico de CO₂ en España. Fondo Documental del IGME. (Informe SID nº 64055). Madrid. http://www.igme.es/internet/sistemas_infor/Sid.htm
- Gill, 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.
- Herrmann, R., Pierce, M., Burgess, K., Priestley, A. 2004. Integrated aquifer characterization and numerical simulation for aquifer recharge and storage at Marco Lakes, Florida. *Hydrology Science & Practice for the 21st Century*, 1: 276-283.
- IGME. 1980. Mapa geológico de España 847 (Villajoyosa), escala 1:50.000.
- IGME. 1986. Proyecto para el establecimiento de norma para la explotación de los acuíferos en la zona de Gandía-Denia-Javea y Cabecera del Vinalopo (1984-1985). Instituto Geológico y Minero de España Madrid.
- IGME. 2008. Mapa geológico de España 822 (Benisa), escala 1:50.000.
- Lajaunie Ch., Courrioux G., Manuel L. 1997. Foliation fields and 3d cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology*, 29, 571-584.
- López-Geta, J.A. 2004. Análisis metrológico 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. Universidad Politécnica de Madrid. 615 pp.
- Lowry, C.S. and Anderson, M.P. 2006. An assessment of aquifers storage recovery using ground water flow models *Ground Water*, 44: 661-667.
- Lucia, F.J. 1995. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *Am Assoc Petrol Geol Bull* 79: 1275. 1300.
- Lucia, F.J. 1999. Carbonate reservoir characterization. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 1. 226.
- Martín-Chivelet, J., Berasategui, X., Rosales, I., Vilas, L., Vera, J.A., Caus, E., Gräfe, K.-U., Mas, R., Puig, C., Segura, M., Robles, S., Floquet, M., Quesada, S., Ruiz-Ortiz, P., Fregenal-Martínez, M.A., Salas, R., Arias, C., García, A., Martín-Algarra, A., Meléndez, N., Chacón, B., Molina, J.A., Sanz, J.L., Castro, J.M., García-Hernández, M., Carenas, B., García-Hidalgo, J., Gil, J., Ortega, F. 2002. Cretaceous. In: Gibbons, W., Moreno, T. (Eds.), *The Geology of Spain*. Geological Society, London, 255. 292.
- Martos-Rosillo, S., Rodríguez-Rodríguez, M., Pedrera, A., Cruz-San Julián, 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.
- Murillo Diaz, J.M., Lopez Geta, J.A., Rodriguez Hernández, L. 2010. Desarrollo sostenible, uso conjunto y gestión integral de recursos hídricos: estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante. ISBN. 978-84-96979-40-6.
- Nelson, R.A. 2001. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*. 2nd ed Editorial, Houston. 322 pp.
- Pedrera, A., Marín-Lechado, C., Galindo-Zaldívar, J., García-Lobón, J.L. 2013. Control of preexisting faults and near-surface diapirs on geometry and kinematics of

- fold-and-thrust belts (Internal Prebetic, Eastern Betic Cordillera). *Journal of Geodinamics*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2013.09.007>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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>
- UNESCO. 1979. Map of the world distribution of arid regions. Editorial, UNESCO, Paris. 54 pp.
- Vacher, H.L., Hutchings, W.C., 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.
- Worthington, S.R.H., Davies, G.J., Ford, D.C. 2000. Matrix, fracture and channel components of storage and flow in a Paleozoic limestone aquifer In: Wicks C. M. y and Sasowsky, I. D. (eds) *Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers*: 113-128.
- Wu, Q., Xu, H., Zhon, W. 2008. Development of a 3D GIS and its applications to karst areas *Environmental Geology*, 54: 1037-1045.

ANEXOS

ANEXO I. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DIGITAL ENTREGADA

1. ESTRUCTURA DEL DIRECTORIO PRINCIPAL HIDROPROAL



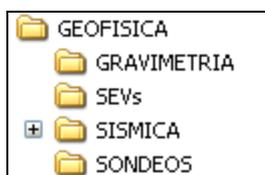
2. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ALICANTE

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

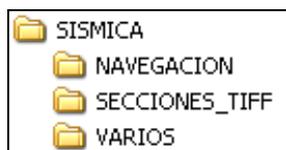
La carpeta **GEOFISICA** contiene las carpetas: **SEVs, GRAVIMETRIA, SISMICA Y SONDEOS**, con la información geofísica regional recopilada para el proyecto y que se ha utilizado en la modelización.



 **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.

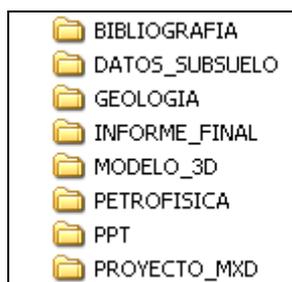
3. ESTRUCTURA DEL SUBDIRECTORIO ACUIFERO CARRASCAL

La información digital del acuífero Carrascal 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 Carrascal en estudio.

PPT

Presentaciones realizadas en las reuniones con la Diputación de Alicante sobre el avance en el proyecto del acuífero estudiado Carrascal.

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 (JPG y .shp).

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

 **VARIOS** Esta carpeta contiene fotografías de campo.

 **GLOBAL_MAPPER** Contiene el proyecto en Global Mapper del acuífero Carrascal.

PROYECTO_MXD

Proyecto MXD %carrascal_ferrer.mxd+ generado durante el estudio junto con sus archivos (MDT, MAGNAs, cortes, sondeos, geofísica, etc.). Todos los archivos del proyecto MXD cuelgan de esta carpeta para facilitar la copia de la información a otros ordenadores.

DATOS_SUBSUELO

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

SISMICA

 **NAVEGACION** En esta carpeta está el archivo shapefile con la navegacion de las líneas sísmicas.

 **SEG-Y** Esta carpeta contiene archivos seg-y.

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

 **PROCESADO** Archivos Excel del cálculo de la ley de velocidad, archivos .dat, etc.

 **SONDEOS** Archivo Excel con información sobre los sondeos de la zona.

PETROFISICA

Esta carpeta contiene información sobre el muestreo y análisis de la petrofísica: Informe de petrofísica, shape de las muestras, etc.

MODELO_3D

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

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

 **PROYECTO_GEOGRAPHIX_TKS** Proyecto de Kingdom Suite del acuífero Carrascal.

 **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 formato PDF y JPG.

 **CORTES** Cortes geológicos realizados al modelo 3D en formato JPG.

 **SUPERFICIES** Contornos y límites de las superficies modelizadas en formato shape.



INFORME_FINAL

Informe final del acuífero Carrascal.

4. LISTADO DE FICHEROS

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

ANEXO II. ESTUDIO PETROGRÁFICO

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. MATERIALES Y MÉTODOS**
 - 2.1. Formaciones geológicas muestreadas; ubicación de las muestras analizadas**
 - 2.2. Técnicas de estudio de rocas carbonatadas: preparación de muestras y equipo petrográfico**
 - 2.3. Análisis de las muestras pertenecientes a la zona de estudio**
- 3. RESULTADOS**
 - 3.1. Estudios petrográficos**
 - 3.2. Tabla de resultados**
- 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. INTRODUCCIÓN

En el actual anexo se recogen los **estudios petrográficos** para la caracterización de las microfacies pertenecientes a los afloramientos carbonatados del acuífero Carrascal. Ferrer en el sector noreste de la provincia de Alicante (Hoja nº 822, Benissa). Tales estudios incluyen la determinación y caracterización de los elementos texturales y la clasificación de las microfacies según los esquemas propuestos por Dunham (1962), Folk (1959, 1962) y Lucía (1999). En este estudio se ha determinado igualmente la morfología y el tamaño de los poros, y la existencia y distribución de fisuras en las muestras estudiadas, lo que nos permitirá establecer la correlación entre la fábrica de las rocas carbonatadas y las propiedades físicas (Dürrast and Siegesmund, 1999). Para tales determinaciones se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Formaciones geológicas muestreadas; ubicación de las muestras analizadas

Las formaciones geológicas representadas en la sierra del Carrascal de Parcent (Alicante) y muestreadas en este estudio son las siguientes:

- Formación Seguilí (Cretácico Inferior)
- Formación Sácaras (Cretácico Inferior, Albiense)
- Formación Jumilla (Cretácico Inferior, Albiense)
- Formación Caliza de Jaén (Cretácico Superior)
- Calizas del Oligoceno
- Calizas del Mioceno (Aquitaniense)

En los listados que a continuación se proporcionan se recogen las muestras tomadas en las diferentes formaciones, con las coordenadas UTM de cada punto y el tipo de material muestreado (descripción a *visu* en el momento de la toma).

FORMACIÓN SEGUILÍ

X_UTM	Y_UTM	MUESTRA	Litología
754815	4290725	CA-S1-1	Caliza
753151	4292142	CA-S1-18	Caliza
753149	4292154	CA-S1-19	Caliza
753182	4292150	CA-S1-20	Caliza
753229	4292218	CA-S1-21	Caliza
751512	4291593	CA-S1-31	Caliza
751512	4291593	CA-S1-32	Caliza
749060	4290727	CA-S1-33	Caliza
749060	4290727	CA-S1-34	Caliza
749060	4290727	CA-S1-35	Caliza
749060	4290727	CA-S1-36	Caliza
749060	4290727	CA-S1-37	Caliza

749060	4290727	CA-S1-38	Caliza
			Caliza
754725	4290846	CA-S1-39	nodulosa
754794	4290782	CA-S1-40	Caliza
754808	4290734	CA-S1-41	Caliza

FORMACIÓN SÁCARAS

X_UTM	Y_UTM	MUESTRA	Litología
754870	4290728	CA-S1-2	Caliza micrítica
754973	4290678	CA-S1-3	Caliza
755068	4290621	CA-S1-4	Caliza bioclástica
754829	4290714	CA-S1-42	Caliza nodulosa
754924	4290726	CA-S1-43	Caliza
754974	4290680	CA-S1-44	Caliza
755005	4290639	CA-S1-45	Caliza nodulosa
755020	4290628	CA-S1-46	Caliza

FORMACIÓN JUMILLA

X_UTM	Y-UTM	MUESTRA	Litología
755120	4290632	CA-S1-5	Caliza nodulosa
755225	4290584	CA-S1-6	Caliza bioclástica
755228	4290584	CA-S1-47	Caliza bioclástica

FORMACIÓN CALIZA DE JAÉN

X_UTM	Y-UTM	MUESTRA	Litología
755310	4290492	CA-S1-7	Caliza
755441	4290562	CA-S1-8	Caliza
755549	4290512	CA-S1-9	Caliza
755666	4290582	CA-S1-10	Caliza
755698	4290578	CA-S1-11	Caliza
755853	4290547	CA-S1-12	Caliza
755270	4290527	CA-S1-48	Caliza
755360	4290504	CA-S1-49	Caliza
755532	4290515	CA-S1-50	Caliza
755601	4290522	CA-S1-51	Caliza

MIOCENO/AQUITANIENSE

X_UTM	Y-UTM	MUESTRA	Litología
753481	4289320	CA-S1-17	Caliza
750088	4289368	CA-S1-22	Caliza
750084	4289353	CA-S1-23	Caliza
750088	4289333	CA-S1-24	Caliza
750088	4289333	CA-S1-25	Caliza

PALEÓGENO/OLIGOCENO

X_UTM	Y-UTM	MUESTRA	Litología
755853	4290547	CA-S1-13	Caliza
755380	4290260	CA-S1-14	Caliza proveniente de brecha

755052	4289960	CA-S1-15	Caliza
754663	4289822	CA-S1-16	Caliza
750072	4289419	CA-S1-26	Caliza
750179	4289397	CA-S1-27	Brecha caliza
750355	4289356	CA-S1-28	Caliza arenosa
750486	4289305	CA-S1-29	Caliza
755743	4290432	CA-S1-30	Caliza

2.2. Técnicas de estudio de rocas carbonatadas: preparación de muestras y equipo petrográfico

El estudio petrológico de las rocas carbonatadas se basa fundamentalmente en el análisis de láminas delgadas mediante microscopía óptica de polarización. En este estudio se ha utilizado un equipo LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada, perteneciente a la Unidad de Granada del Instituto Geológico y Minero de España. El análisis petrográfico de las muestras tomadas consiste en la determinación de los componentes y la mineralogía, así como la proporción relativa de los elementos texturales y diagenéticos en la roca (partículas, cemento, matriz y poros). A partir de esta información hemos clasificado las muestras que hemos tomado según los esquemas propuestos por *Dunham* (1962) y *Folk* (1959, 1962). Estos estudios igualmente incluyen la descripción de la morfología y el tamaño de los poros, necesaria para clasificar las muestras en las *Clases Petrofísicas de Lucia* (1999). La observación se ha realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión de acuerdo con la naturaleza y la preparación de las muestras. Respecto a esta última cuestión, hay que señalar que las láminas delgadas han sido parcialmente teñidas con rojo de alizarina a fin de discriminar la naturaleza del carbonato (calcita o dolomita): el rojo de alizarina tiñe de rojo el calcio de la calcita.

2.3. Análisis de las muestras pertenecientes a la zona de estudio

Existen ciertos parámetros petrográficos que resultan fundamentales para establecer las relaciones entre las características petrográficas y las propiedades físicas de las rocas. En cada una de las muestras estudiadas se han determinado los cuatro componentes principales de la fábrica propuestos por Dürrast and Siegesmund (1999) (Figura 1) que permite establecer la correlación entre la fábrica y las propiedades físicas de las rocas (Figura 2):

- (a) Constituyentes principales: aloquímicos/ortoquímicos
- (b) Espacio poroso y tipo de poros
- (c) Fracturas

(d) Estilolitos

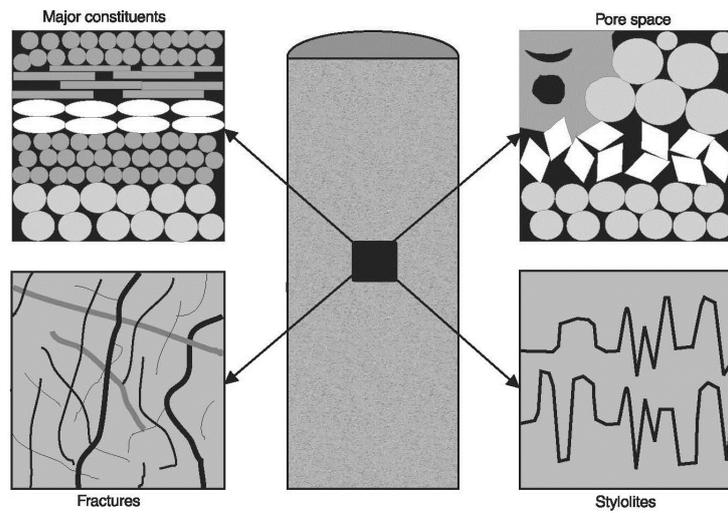


Figura 1. Elementos de la microfábrica en rocas carbonatadas según Dürrast and Siegesmund (1999).

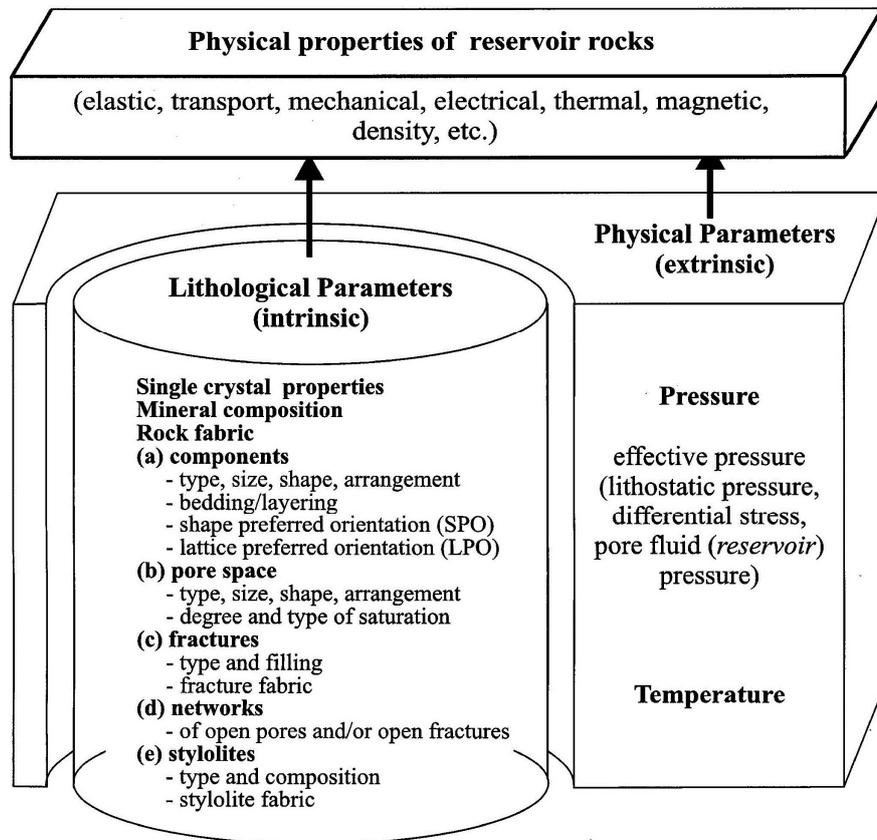


Figura 2. Factores que controlan las propiedades físicas de las rocas carbonatadas reservorio (Dürrast and Siegesmund, 1999).

Previo al análisis de los diferentes componentes texturales, definiremos los tipos de fábrica que existen en este tipo de rocas:

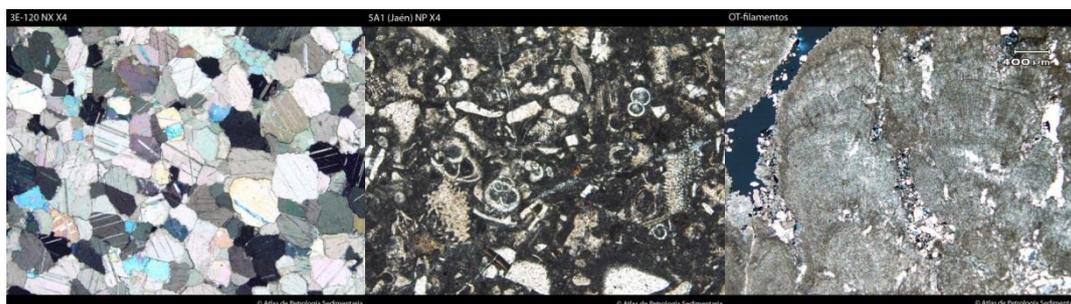
TIPOS DE FÁBRICA

Tres son los tipos de fábrica *que existen en este tipo de rocas (Figura 3)*:

Fábrica cristalina: constituida por cristales generados por procesos de precipitación directa, recristalización o reemplazamiento (calizas esparíticas, pseudoesparitas, dolomías cristalinas, etc.).

Fábrica clástica: Es la constituida por clastos carbonáticos, tanto intracuencales como extracuencales. Este tipo de fábrica es la común de las calcarenitas, donde los clastos son granos carbonáticos intracuencales (IC). Las rocas detríticas integradas por granos carbonáticos extracuencales (EC) corresponden a sedarenitas calcilita (Folk, 1963)

Fábrica organógena: Es la constituida por bioconstrucciones desarrolladas por organismos coloniales (arrecifes de coral, estromatolitos, etc.)



Fábrica cristalina
organógena

Fábrica clástica

Fábrica

Figura 3. Tipo de fábricas en rocas carbonatadas.

COMPONENTES PRINCIPALES DE LA FÁBRICA

(a) CONSTITUYENTES PRINCIPALES

Los constituyentes principales en las rocas carbonatadas se agrupan en aloquímicos (intraclastos, ooides, granos esqueléticos y peloides) y ortoquímicos (matriz y cemento).

La asociación y distribución de los componentes en determinados lechos está controlado básicamente por la deposición y la sedimentación. Estos rasgos están

caracterizados por su estructura y textura: variación en composición, tamaño, forma y orientación de las partículas y componentes, así como su empaquetamiento.

Además, las asociaciones y la distribución de los componentes pueden ser modificadas por procesos secundarios.

En este estudio se ha realizado la determinación y caracterización de los elementos texturales en las diferentes muestras y se ha procedido a la clasificación de las mismas según los esquemas propuestos por *Dunham (1962)*, *Folk (1959, 1962)*. Ambas clasificaciones se basan en la proporción relativa de los elementos texturales y diagenéticos en la roca (partículas, cemento, matriz y poros) así como las características de las partículas versus la matriz.

Folk (1962) establece la clasificación de calizas (Figura 4) teniendo en cuenta las proporciones relativas de los tres constituyentes básicos: granos (aloquímicos), matriz micrítica y cemento esparítico (ortoquímicos). Diferencia tres tipos básicos de calizas: aloquímicas (con >10% de granos), micríticas (con <10% de granos) y biolilitas. Dentro de las calizas aloquímicas distingue entre: calizas esparíticas (espacio intergranular ocupado por esparita) y calizas micríticas (espacio intergranular ocupado por micrita).

Clasificación de Folk (1962)		Más del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO I y II		Menos del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO III		DOLOMIÁS ROCAS TIPO V		
		Cemento esparítico		Matriz micrítica		Con "fantasmas" de aloquímicos		
		TIPO I		TIPO II		Sin fantasmas		
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE ALOQUÍMICOS	Más del 25% de INTRACLASTOS	INTRAESPARITA Intraesparrudita	INTRAMICRITA Intramicrorrudita	Según el aloquímico dominante	MICRITA con Intraclastos	MICRITA	Dolomía con Intraclastos	
	Más del 25% de OOIDES	OOESPARITA Ooesparrudita	OOMICRITA Oomicrorrudita		MICRITA con Ooides		Dolomía con Ooides	
	Menos del 25% de OOIDES (relación de volúmenes de peloides y bioclastos b/p)	>3	BIOESPARITA Bioesparrudita		BIOMICRITA Biomicrorrudita		MICRITA con Bioclastos	Dolomía con Bioclastos
		3 - 1/3	BIOPELESPARITA		BIOPELMICRITA		MICRITA con Peloides	Dolomía con Peloides
		<1/3	PELESPARITA		PELMICRITA			
					BIOLITITO (ROCAS TIPO IV)		DOLOMIÁS	

Figura 4. Clasificación de rocas carbonatadas según esquema propuesto por Folk (1962).

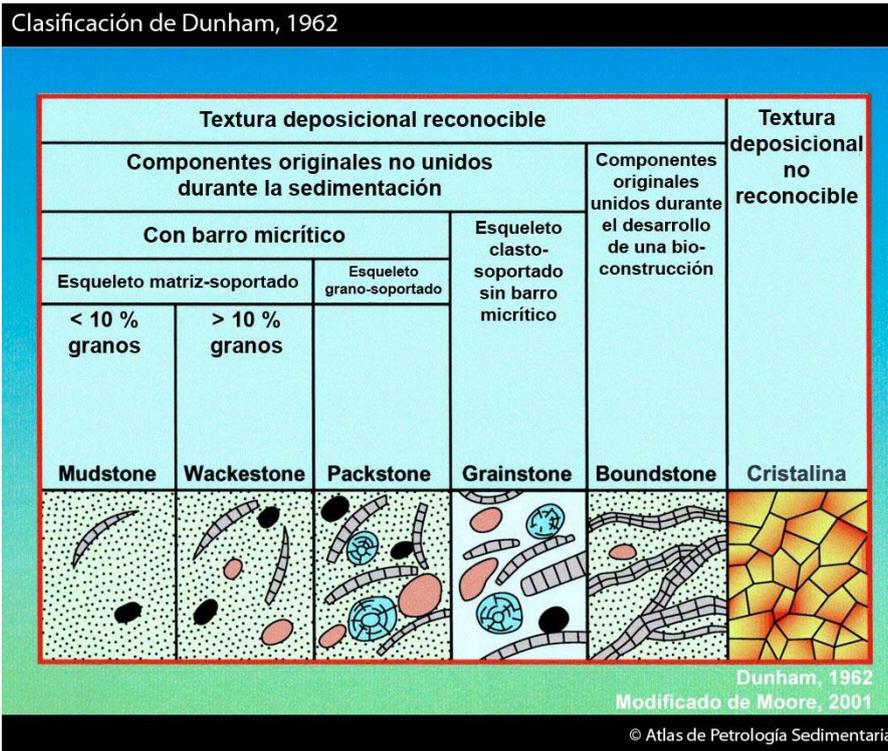


Figura 5. Clasificación de rocas carbonatadas según esquema propuesto por Dunham (1962).

Dunham (1962) distingue dos tipos generales de carbonatos (rocas y sedimentos carbonáticos): (1) los que presentan textura deposicional reconocible, y (2) los que presentan textura cristalina, no siendo posible reconocer la textura deposicional (Figura 5).

En este estudio se ha determinado igualmente la morfología y el tamaño de los poros, y la existencia y distribución de fisuras en las muestras estudiadas. Esto nos permitirá establecer la correlación entre la fábrica de las rocas carbonatadas y las propiedades físicas (Dürrast and Siegesmund, 1999). Como apuntábamos anteriormente, para tales determinaciones se ha utilizado un Microscopio Óptico de Polarización LEICA DM2500P con cámara fotográfica digital LEICA DFC450 acoplada. La observación se ha realizado con luz natural y polarizada mediante la técnica microscópica de transmisión.

(b) ESPACIO POROSO Y TIPO DE POROSO

Se denomina *porosidad* al conjunto de los espacios vacíos que posee una roca y, en su sentido más amplio, la porosidad puede ser contemplada bajo dos puntos de vista: como un componente petrográfico o textural, o como una propiedad física de la roca.

Las calizas y las dolomías presentan un sistema poroso notablemente complejo, tanto desde el punto de vista físico como genético. La indicada complejidad física-relativa a la geometría de los poros-es consecuencia fundamentalmente de su complicada génesis. Así, la porosidad de estas rocas es típicamente poligénica, consecuencia tanto de las distintas etapas en que pueden desarrollarse los poros, como de los diversos procesos implicados en su formación.

Desde el punto de vista petrográfico se trata de un componente más de la roca que posee unas características texturales: forma, tamaño, distribución (orientación, homogeneidad...). Su estudio se realiza normalmente por métodos directos a distintas escalas. En este estudio se ha procedido a una observación de visu y la microscopía óptica de polarización. La microscopía óptica de polarización es un método indicado para vacíos superiores a 10 μm (la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5 μm). Por tanto, es importante destacar la baja capacidad de resolución de esta técnica para poros por debajo de 1 μm . En este sentido, la determinación de la porosidad más fina, que requiere la utilización de técnicas complementarias (Microscopía Electrónica de Barrido y Análisis Digital de Imagen), por ahora no será estimada en este estudio.

Según varios autores (Archie, 1950; Bertrand, 1969; Elf-Aquitaine, 1977; Selley, 1982; Bourbie et al, 1987) la porosidad constituye el parámetro petrográfico fundamental cuando se trata de establecer relaciones entre las características petrográficas y las propiedades físicas de la roca, lo que se conoce como *análisis petrofísico*.

Lucia (1983, 1995, 1999) añade un nuevo punto de vista petrofísico a la clasificación del espacio poroso: la distribución de los tamaños de poro que controla la porosidad, permeabilidad y saturación, y está relacionado con la fábrica de la roca. Para relacionar la fábrica con la distribución del tamaño de poro es importante determinar si el espacio poroso pertenece a una de las tres clases principales de tipo de poro, que se basan en distinguir si el el poro está entre las partículas o dentro de las mismas: (a) *Espacio poroso interpartícula*; (b) *Vuggy pore space: separate vug pores y touching-vug pores*.

(a) *Espacio poroso interpartícula*

Se define también como porosidad abierta, conectada o efectiva de la roca y representa el volumen de poros con cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. En ausencia de vuggy porosity, la distribución de tamaños de poro en rocas carbonatadas puede ser descrita en términos de tamaño de partícula, clasificación y porosidad interpartícula (Figura 6).

En vez de dividir la fábrica en grano-soportada o lodo-soportada según la clasificación de Dunham (1962) se divide en fábrica grano-dominada y lodo-dominada. Los atributos más importantes de la fábrica grano-dominada son la presencia de la porosidad interpartícula abierta o cerrada y una textura grano-soportada. El atributo más importante de la fábrica lodo-dominada es que las áreas entre los granos están rellenas con lodo incluso si los granos parecen formar una estructura de soporte.

Lucía (1999) determinó tres clases petrofísicas definidas por la permeabilidad y la saturación en agua.

(b) Vuggy pore space: *separate vug pores* y *touching-vug pores*.

La adición del vuggy pore space al espacio poroso interpartícula altera las características petrofísicas por la alteración en la manera en que el espacio poroso está conectado. *Separate vug pore space* se define como el espacio poroso dentro de las partículas o que es significativamente más grande que el tamaño de partícula (generalmente dos veces el tamaño de partícula) e interconectado sólo a través del espacio poroso interpartícula. *Touching-Vug Pore Space* es el espacio poroso que es significativamente mayor que el tamaño de partícula y forma un sistema poroso interconectado de significativa extensión (Figura 7).

Para relacionar la fábrica de las rocas carbonatadas con la distribución del tamaño de poros es importante determinar si el espacio poroso pertenece a uno de los tres tipos principales de poros según Lucia (1983, 1999): interpartícula, *separate-vug* and *touching vug*. Para el primer grupo Lucia (1995) determinó tres clases petrofísicas (Clase 1, Clase 2, Clase 3) definidos por ciertos campos según la permeabilidad y la porosidad interpartícula (Figura 8).

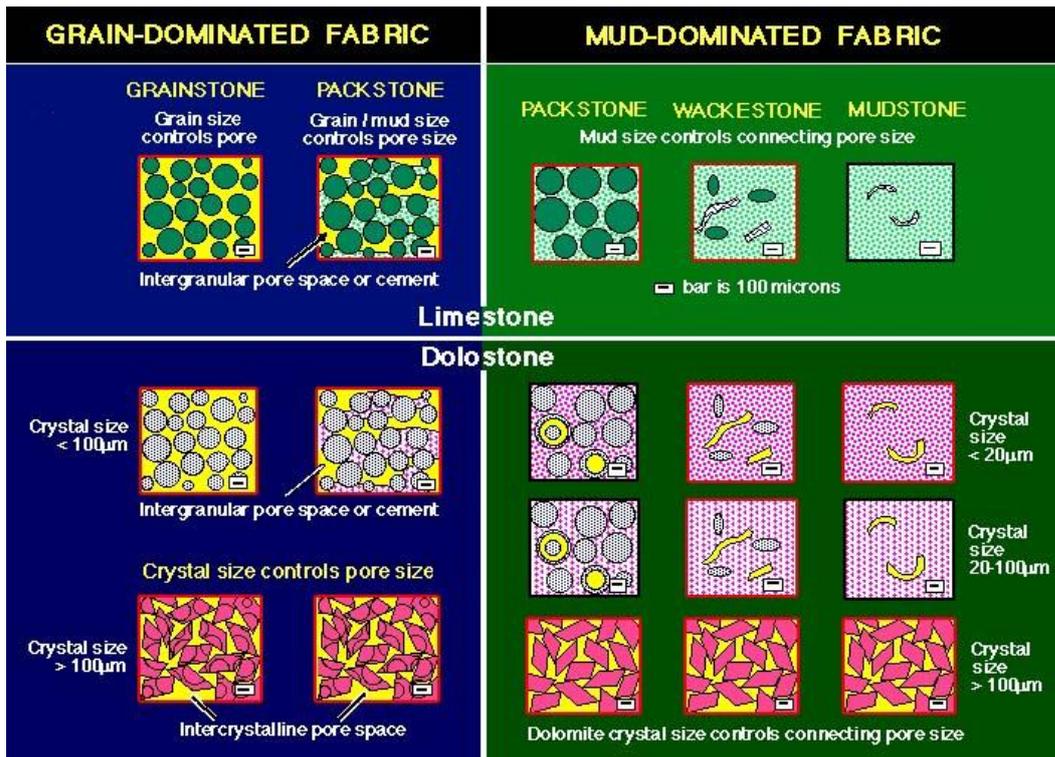


Figura 6. Clasificación geológica/petrofísica del espacio poroso interpartícula en rocas carbonatadas basada en el tamaño y clasificación de granos y cristales. El volumen del espacio poroso interpartícula es importante porque se relaciona con la distribución tamaño-poro

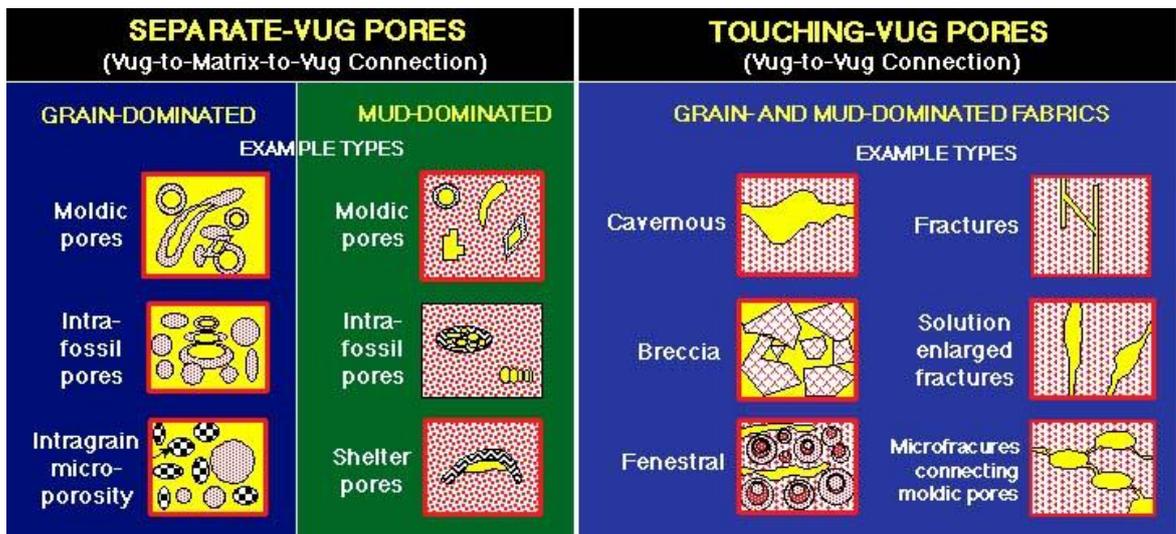


Figura 7. Clasificación geológica/petrofísica del vuggy pore space vasado en la interconexión vug espacio.

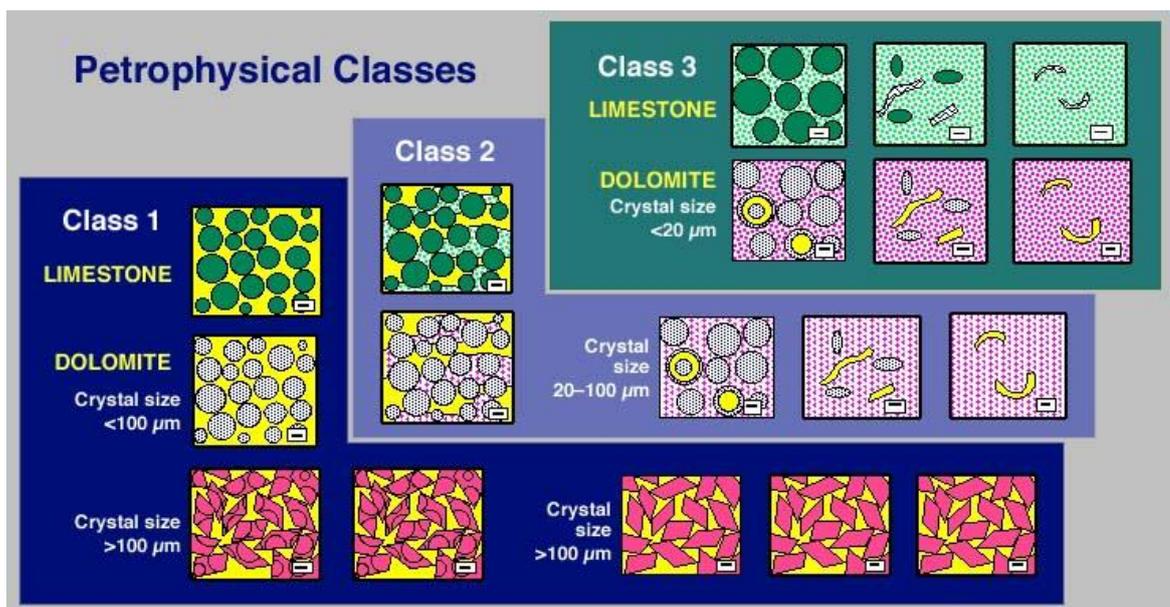


Figura 8. Bloque diagrama que ilustra la relación entre la fábrica de la roca y las clases petrofísicas.

(a) FRACTURAS

En la clasificación de Lucia (1995) las fracturas son un tipo de touching-vug pores puesto que contribuye notablemente a la permeabilidad en muchos reservorios carbonatados y, por tanto, en la clasificación petrofísica del espacio poroso. Golf-Racht (1996) presenta una clasificación descriptiva de las fracturas en las siguientes

categorías: (a) fracturas abiertas/cerradas; (b) micro-/macro- fracturas; y (c) facturas inducidas/naturales. En este estudio se sacan de la porosidad porque pueden igualmente contribuir a la anisotropía como a la porosidad y la permeabilidad.

(b) ESTIOLITOS

En rocas carbonatadas los estilolitos son rasgos diagenéticos comunes, y su origen es independiente de la facies y de la edad geológica (Nelson 1985; van Golf-Racht 1996). Generalmente son planos irregulares de discontinuidad con una orientación de la vertical a la horizontal. Está aceptado de forma general que los estilolitos son el resultado de los procesos de presión-concentración o de presión-disolución. Ambos procesos están controlados principalmente por la solubilidad de los componentes y partículas en la roca, y por los campos regionales de stress (Nelson, 1985).

Existe una clasificación de estilolitos de Logan and Semeniuk (1976) respecto a la configuración, paragénesis, fábrica y estructura de los fenómenos de disolución.

3. RESULTADOS

A continuación se expondrán los resultados que han derivado del estudio de las muestras en lámina delgada por la técnica de microscópica de luz transmitida con microscopio de polarización: (a) estudios petrográficos de las muestras más representativas de las diferentes formaciones en el acuífero estudiado; (b) tablas resultado

(a) Estudios petrográficos

A continuación se recogen los estudios petrográficos de las muestras más representativas de las diferentes formaciones en el acuífero de Carrascal-Ferrer. En cada uno de estos estudios se ha incluido el tipo de microfábrica, los componentes de la misma y su clasificación según los esquemas de Dunham y Folk (1962), así como las clases petrofísicas descritas por Lucia (1988). En algunos casos también se han incluido comentarios en el campo de observaciones cuando ha sido necesario aclarar ciertas cuestiones referentes a la naturaleza de las muestras estudiadas.

Lamina CA-S1-1		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica dominante formada por clastos esqueletales y no esqueletales en proporciones similares. Se distinguen algunas fracturas con fábrica cristalina generada por procesos de precipitación directa de carbonato.		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: bioclastos (foraminíferos, gasterópodos,, fragmentos de conchas de bivalvos) Componentes no esqueléticos: peloides, tan abundantes como los bioclastos. Se trata de granos micríticos no estructurados, de tamaño medio comprendido entre 0.2-0.4 mm. Presentan formas de esféricas a elípticas sin estructura interna. Oolitos superficiales (con una única lamina en torno al núcleo de tipo calcítico (en menor proporción que los peloides) 	Se observan dos tipos de espacios porosos diferentes dentro de lo que Lucia define como espacio poroso intrapartícula (vuggy pore space): separate-vug pore space (Fig. 1) y touching-vug pore space (Fig. 2):
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Biopelmicrita</i>	CLASE 3

Observaciones: la lámina pertenece a un packstone en el que se observan fracturas de dimensiones considerables (anchas) en las que hay tanto material micrítico como esparítico. Entre dicho material aparecen a veces fragmentos del propio packstone (Fig. 3)

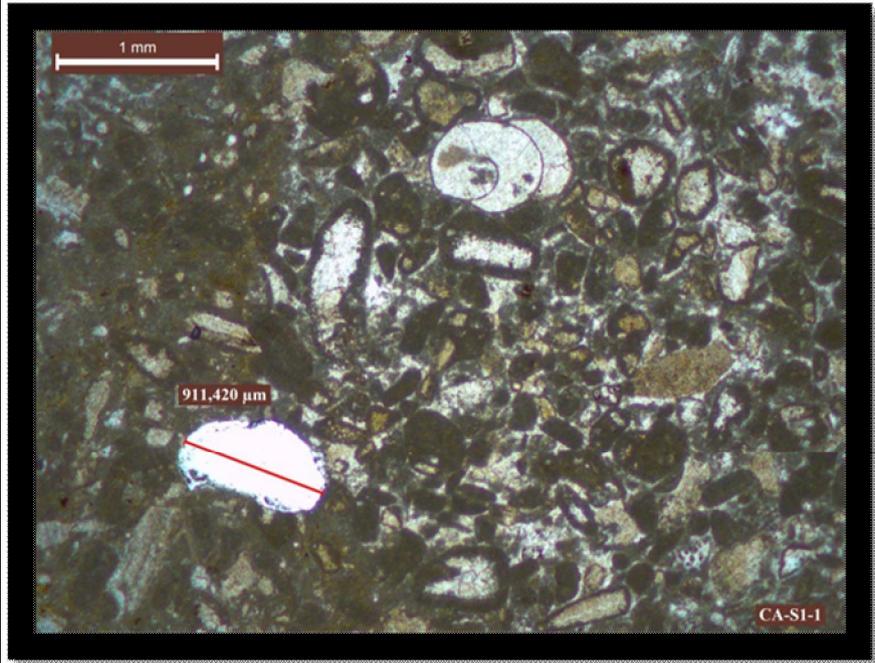


Figura 1:Detalle de la lámina donde se observa un mesoporo tipo separate-vug pore (moldic o intrafossil)

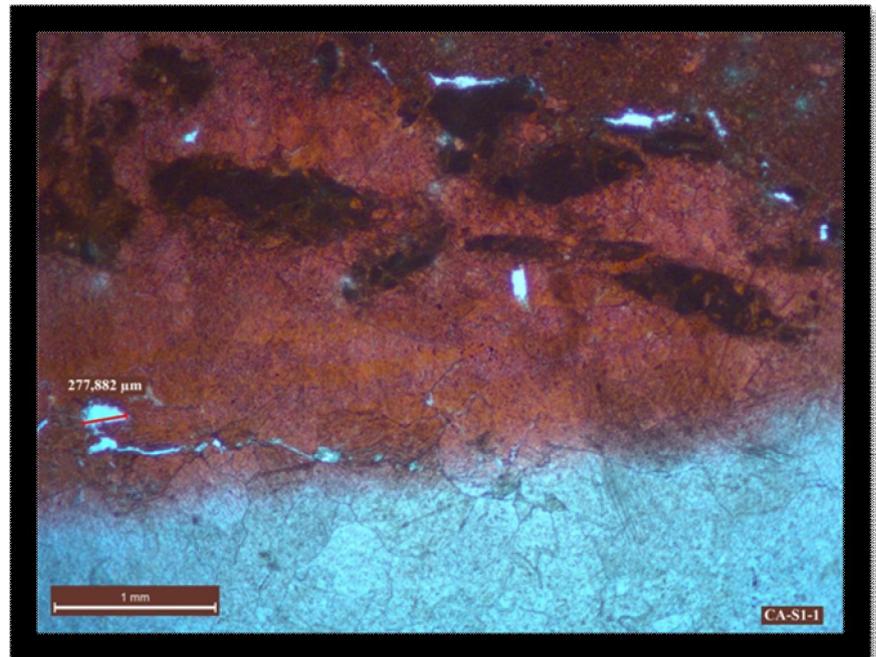


Figura 2: Detalle de la lámina en una zona de fractura recristalizada por calcita esparítico en la que observamos el tipo touching-vug pores (microfracturas conectadas por poros móldicos)

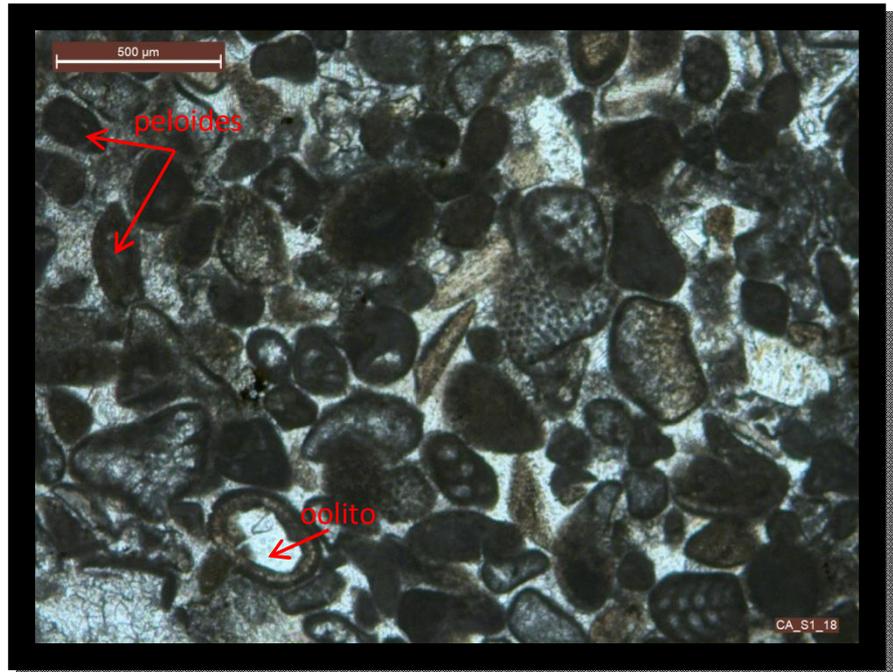
Figura 3.: Detalle de un fragmento del propio packstone en una fractura rellena de lodo micrito y en las paredes de dicha fractura a precipitado esparita.

Autora:

Dr. Concepción
Fernández Leyva

Lamina CA-S1-18		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por clastos esqueletales y no esqueletales en proporciones similares.		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: los restos bioclásticos corresponden a fragmentos de algas (con la estructura típica del panal de abeja), foraminíferos, braquiópodos y bivalvos. • Componentes no esqueléticos: peloides, seguidos de oolitos y litoclastos micríticos. Se observan dos tipos de oolitos: con núcleo de cuarzo generalmente con corteza poco desarrollada y aquellos con un núcleo calcítico con envueltas concéntricas y radiales bien desarrolladas. Algún grano de cuarzo (Fig. 1). 	No observado
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Biopelmicrita</i>	CLASE 3

Figura 1: Aspecto textural y composicional de la muestra donde se observa la presencia de oolitos y peloides y fragmentos de foraminíferos.



Autora:

Dr. Concepción
Fernández Leyva

Lamina CA-S1-19

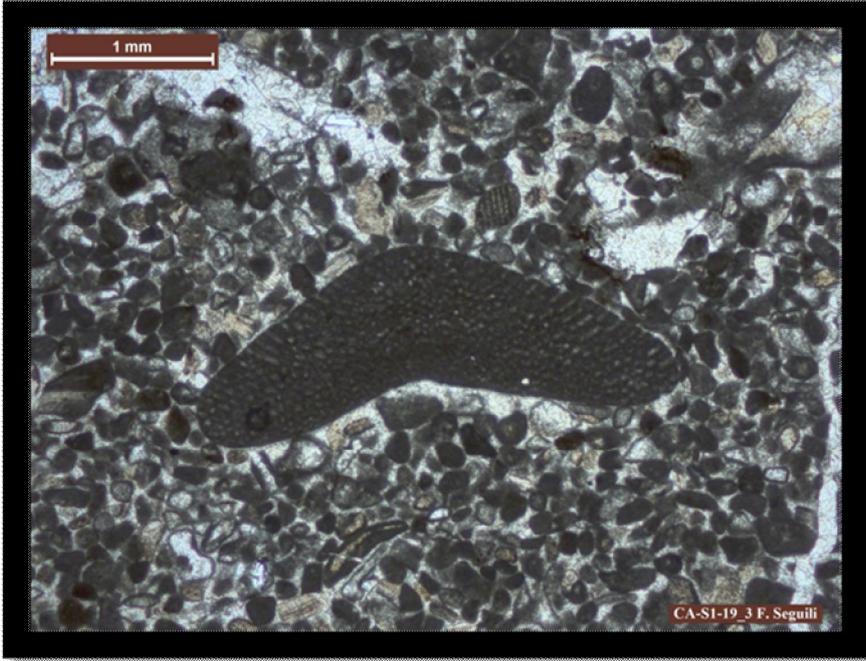
TIPO DE MICROFÁBRICA

Microfábrica clástica formada por clastos esqueletales y no esqueletales en proporciones similares.

COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA

(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico por transformación de micrita	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: los restos bioclásticos corresponden a fragmentos de algas, foraminíferos (orbitolinas con la clásica sección cónica en %sombrero de segador+; Fig.1) y lamelibranquios. Componentes no esqueléticos: Los granos no esqueletales más abundantes son peloides y oolitos con núcleos de cuarzo y corteza poco desarrollada. 	Se observan dos tipos de espacios porosos diferentes dentro de lo que Lucia (1999) define como espacio poroso intrapartícula (vuggy pore space): separate-vug pore space (Fig. 4) y touching-vug pore space (Fig. 2). No aparecen de forma generalizada en la lámina.

CLASIFICACIÓN

Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Grainstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Biopelosparita</i>	CLASE 1
<p>Fig. 1: Textura y composición general de la muestra .Detalle de la microfacies donde se observa una orbitolina con la clásica sección cónica en %sombrero de segador+. En el entorno de la misma peloides y otros restos bioclásticos de tamaño más pequeño. Justo encima de la orbitolina, ligeramente hacia la izquierda, se observa una recristalización de la esparita.</p>		
		
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva		

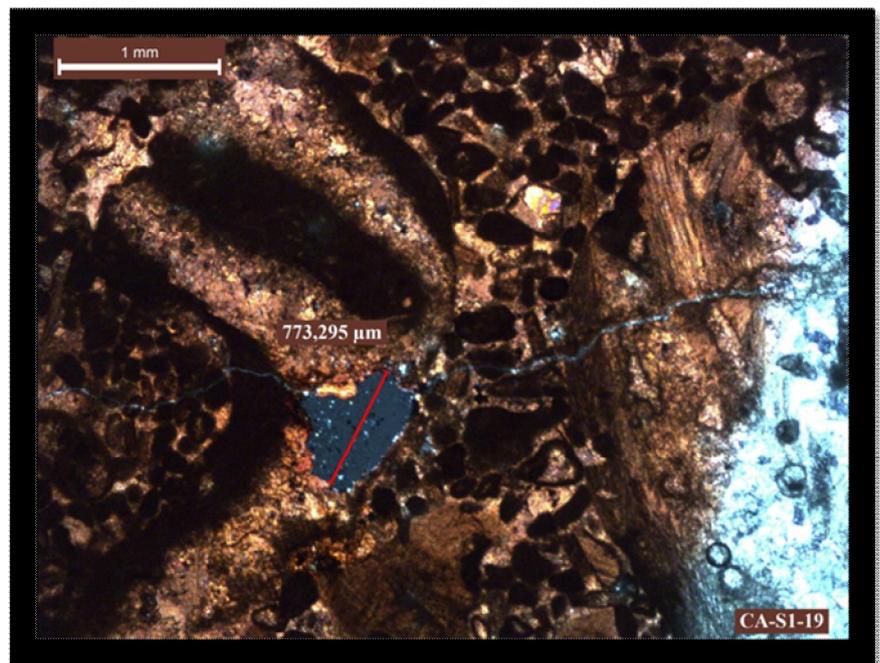
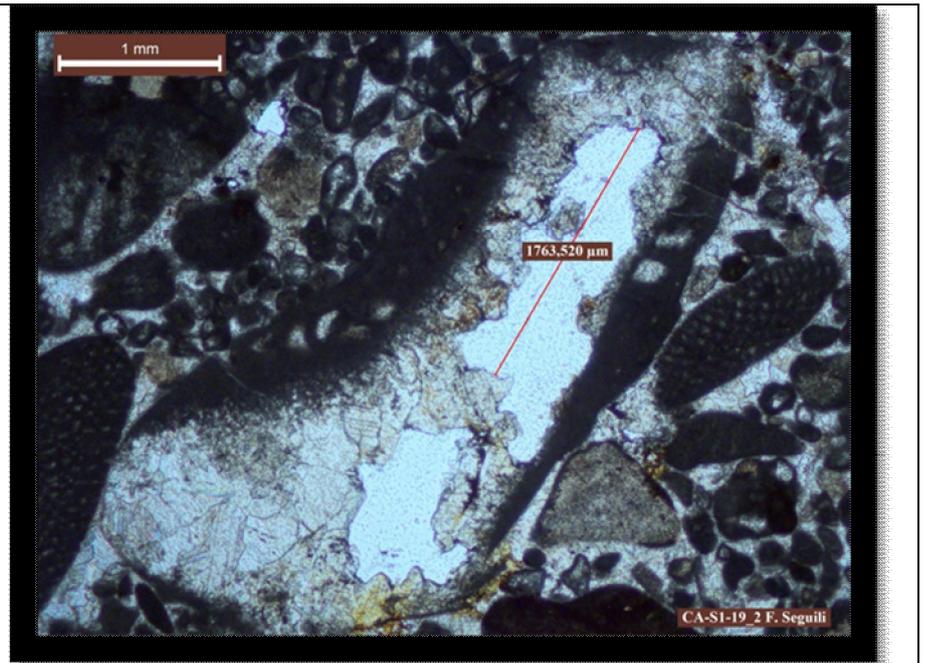
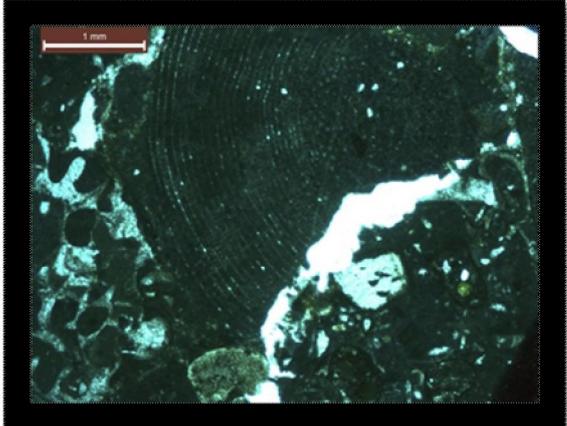


Fig. 2. Detalle de la anterior lámina en el que se observa la porosidad localizada dentro de un molde de bioclasto. Parcialmente está relleno por esparita y, como se observa en la fotografía, hay dos huecos bien localizados, uno de los cuales ha sido medido (más de 1 mm).

Fig. 3. Detalle de la lámina en la zona de límite de tinción de la misma, en la que se muestra porosidad tipo touching-vug pores (microfracturas conectadas por poros móldicos). En el centro se muestra el poro donde lateralmente se ven las fracturas irregulares que conectan otros poros de tamaños similares y que no son recogidos en la lámina.

Lamina CA-S1-20		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica dominante formada por clastos esqueletales dominantes.		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucía, 1999)
Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: bioclastos dominantes frente a los componentes no esqueléticos. (foraminíferos, gasterópodos,, fragmentos de conchas de bivalvos) Componentes no esqueléticos: litoclastos ocasionales 	Se observan dos tipos de espacios porosos diferentes dentro de lo que Lucía (1999) define como espacio poroso intrapartícula (vuggy pore space): dentro de un fósil o poro intrafósil (Fig. 1) y poros de tipo cavernoso de tamaños variados, llegando a varios mm (Fig.1)
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Biomicrita</i>	CLASE 3
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva		

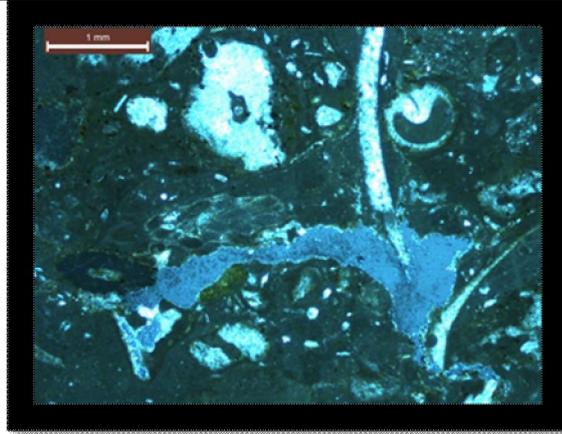


Fig. 1: Orbitolina atravesada por una fractura de gran tamaño (más de 1 mm)

Fig. 2: Espacio poroso cavernoso con una extensión de varios mm

Lamina CA-S1-21		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica dominante formada por clastos esqueletales dominantes.		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucía, 1999)
Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: bioclastos dominantes frente a los componentes no esqueléticos. (braquiopodos y foraminíferos predominantemente). Componentes no esqueléticos: litoclastos ocasionales 	Se observa algún poro de tipo cavernoso, pero no es un fenómeno generalizado en la lámina
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>wackestone/packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Biomicrita</i>	CLASE 3

<p>Autora:</p> <p>Dr. Concepción Fernández Leyva</p>	 <p>Fig. 1: Aspecto textural y composicional de la muestra con orbitolinas</p>
---	---

<p>Lamina CA-S1-34</p>		
<p>TIPO DE MICROFÁBRICA</p>		
<p>Microfábrica clástica dominante formada por granos no esqueletales predominantemente (peloides)</p>		
<p>COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA</p>		
<p>(a) Componentes ortoquímicos</p>	<p>(b) Componentes aloquímicos:</p>	<p>(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)</p>
<p>Cemento esparítico por transformación de micrita</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: bioclastos (moluscos, foraminíferos, gasterópodos, bivalvos, crinoides) • Componentes no esqueléticos: peloides, intraclastos micrítico, granos compuestos. tan abundantes como los bioclastos. Se trata de granos micríticos no estructurados, de tamaño medio comprendido entre 0.2-0.4 mm. Presentan formas de esféricas a elípticas sin estructura interna. Oolitos superficiales (con una única lamina en torno al núcleo de tipo calcífico (en menor proporción que los peloides) 	<p>Los poros, como vemos en las fotografías, se localizan dentro de algunos intraclastos y granos compuestos lo que Lucia (1999) define como espacio poroso intrapartícula (vuggy pore space)</p>

CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Grainstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Bioesparita</i>	CLASE 1

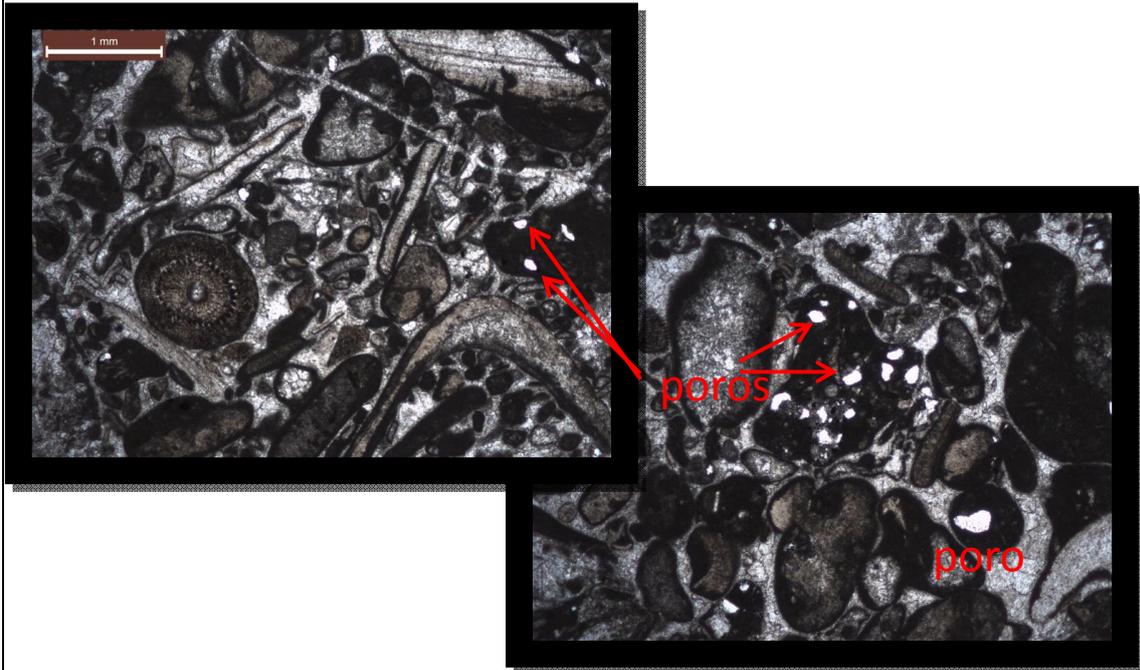


Fig. 1: Dentro de algunos intraclastos y granos compuestos (espacio poroso intrapartícula)

Autora:

Dr. Concepción Fernández Leyva

Lamina CA-S1-35
TIPO DE MICROFÁBRICA
Microfabrica clástica dominante formada por clastos esqueletales en proporción mayor que

los no esqueléticos

COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA

(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucía, 1999)
Cemento esparítico	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: bioclastos (gasterópodos, lamelibranquios) • Componentes no esqueléticos: peloides, muy abundantes e intraclastos micríticos, y granos compuestos. En mucha menor proporción oolitos superficiales. 	Los poros, como vemos en la fotografía, se localizan dentro de algunos granos compuestos e intraclastos lo que Lucía (1999) define como espacio poroso intrapartícula (vuggy pore space)

CLASIFICACIÓN

Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
<p>Clasificación de Dunham (1962)</p> <p><i>Grainstone</i></p>	<p>Clasificación de Folk (1959,1962)</p> <p>Pelesparita</p>	CLASE 1

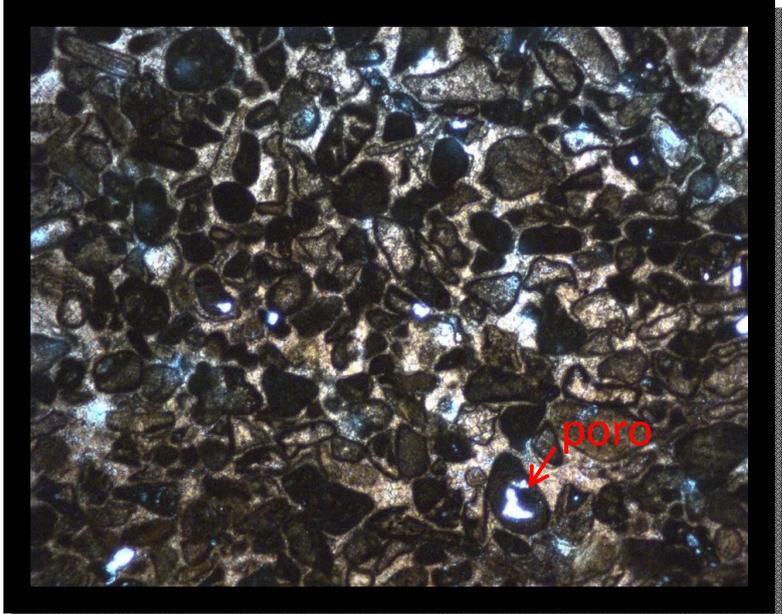
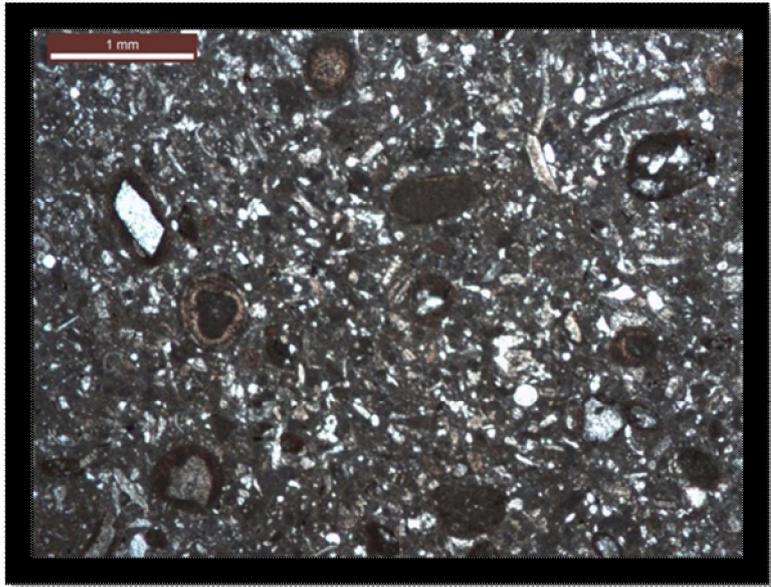


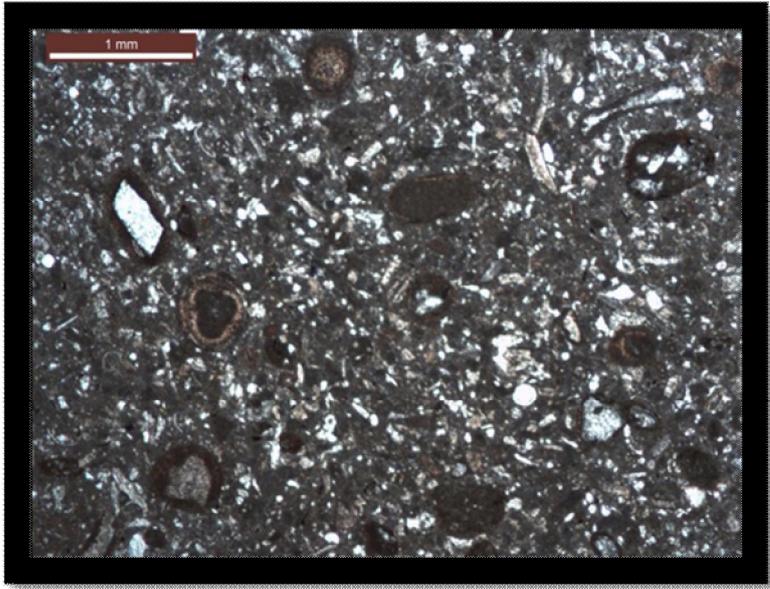
Fig. 1: Dentro de algunos intraclastos y granos compuestos (espacio poroso intrapartícula)

Autora:
 Dr. Concepción Fernández Leyva

Lamina CA-S1-31		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfabrica clástica dominante formada por clastos esqueletales y no esqueletales en proporciones similares. Se distinguen algunas fracturas con fabrica cristalina generada por procesos de precipitación directa de carbonato.		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Matriz micrítica, cementaciones de sílex	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: bioclastos (foraminíferos y restos de conchas de bivalvos) • Componentes no esqueléticos: Oolitos con envueltas bien desarrolladas, formas esféricas a subsféricas y núcleos de cuarzo así como litoclastos de textura mudstone. En la matriz micrítica también son observados granos de cuarzo, peloides y litoclastos 	Ausencia aparente de porosidad
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Biomicrita	CLASE 3

<p>Autora:</p> <p>Dr. Concepción Fernández Leyva</p>	 <p>Fig. 1: Dentro de algunos intraclastos y granos compuestos (espacio poroso intrapartícula)</p>
---	---

Lamina CA-S1-33		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfabrica clástica dominante formada predominantemente por granos no esqueléticos (peloides)		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico por transformación de micrita.	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: bioclastos (foraminíferos, lamelibranquios) • Componentes no esqueléticos: peloides muy abundantes, intraclastos micríticos, granos compuestos. Algún que otro grano de cuarzo. 	Ausencia aparente de porosidad

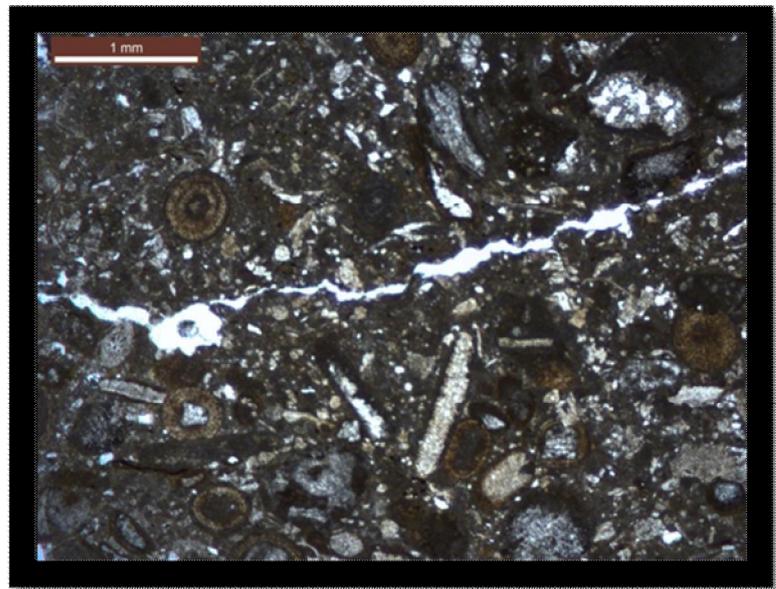
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Biomicrita	CLASE 3
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva		 <p>Fig. 1: Detalle de la pelesparita con componentes no esqueléticos dominantes</p>

Lamina CA-S1-32		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica dominante formada por clastos esqueléticos y no esqueléticos en proporciones similares.		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucía, 1999)

Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: bioclastos (foraminíferos y restos de conchas de bivalvos) • Componentes no esqueléticos: Oolitos con envueltas bien desarrolladas, formas esféricas a subesféricas y núcleos de cuarzo así como litoclastos de textura mudstone. En la matriz micrítica también son observados granos de cuarzo, peloides y litoclastos. 	Fractura irregular abierta, touching vug pore (cavernous)
------------------	---	---

CLASIFICACIÓN

Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Biomicrita	CLASE 3



Autora:

Dr. Concepción Fernández Leyva

Fig. 1: Detalle de fractura irregular que cruza la imagen

Lamina CA-S1-2		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por clastos no esqueléticos (peloides) predominantemente		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico, en algunas zonas matriz micrítica minoritaria	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: foraminíferos y lamelibranchios • Componentes no esqueléticos: los aloquemos son mayoritariamente peloides. Tamaños variables, tamaño medio aproximado 0,1 mm, formar irregulares con tendencia a la esfericidad; granos agregados muy ocasionales. 	El espacio poroso observado en la lamina corresponde al tipo espacios porosos que Lucia (1999) define <i>touching-vug pores</i> , siendo dentro de este grupo de tipo cavernoso y/o fenestral
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Grainstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Biopelosparita	CLASE 3

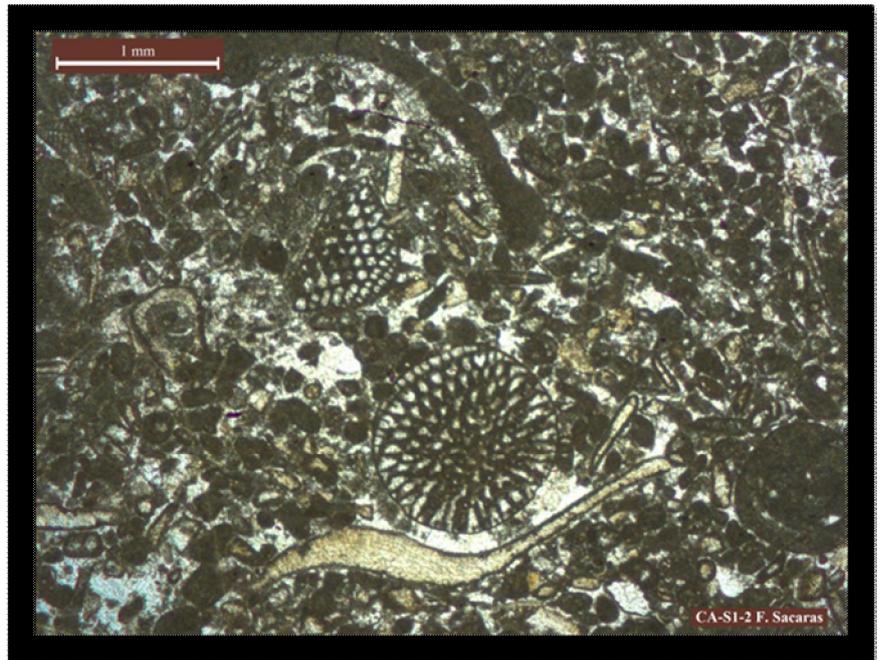


Fig. 1: La microfacies es un *grainstone* (Dunham, 1962) pobremente seleccionado, con una proporción muy alta de granos no esqueléticos, fundamentalmente peloides. Los bioclastos son foraminíferos y lamelibranquios, ambos en el centro de la lámina.

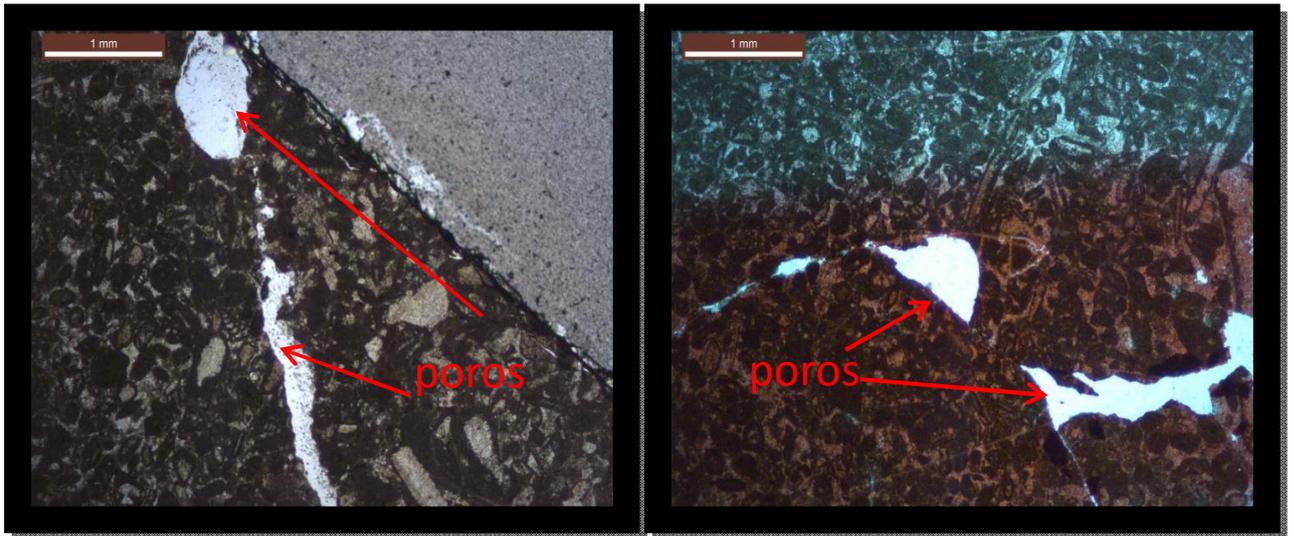


Fig. 2: Ejemplos de los espacios porosos tipo touching-vug pores según el esquema de Lucia (1999). Por el tamaño y forma de los poros se denominan mesoporos irregulares.

Autora:

Dr. Concepción Fernández Leyva

Lamina CA-S1-3		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por cuarzo abundante y clastos esqueléticos		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Matriz micrítica con cemento esparítico minoritario según zonas	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: foraminíferos (orbitolinas de gran tamaño), crinoides y briozoos. Componentes no esqueléticos: los aloquemos son granos angulosos de cuarzo tanto en la matriz como en las orbitolinas (Fig.), llegando la proporción de cuarzo incluso a un 20%; menor proporción de peloides; litoclastos muy minoritarios. 	El espacio poroso observado en la lamina corresponde al tipo espacios porosos que Lucia (1999) define <i>touching-vug pores</i> , siendo dentro de este grupo de tipo cavernoso y/o fenestral (Fig. 2)

CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Wackstone/packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Intramicrita	CLASE 3
<p>Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva</p>		<div data-bbox="662 645 1374 1182" data-label="Image"> </div> <p>Fig. 1: Aspecto general de la microfacies donde se observan los abundantes granos de cuarzo en la matriz (todos los granos blancos con formas angulosas son cuarzo)</p>

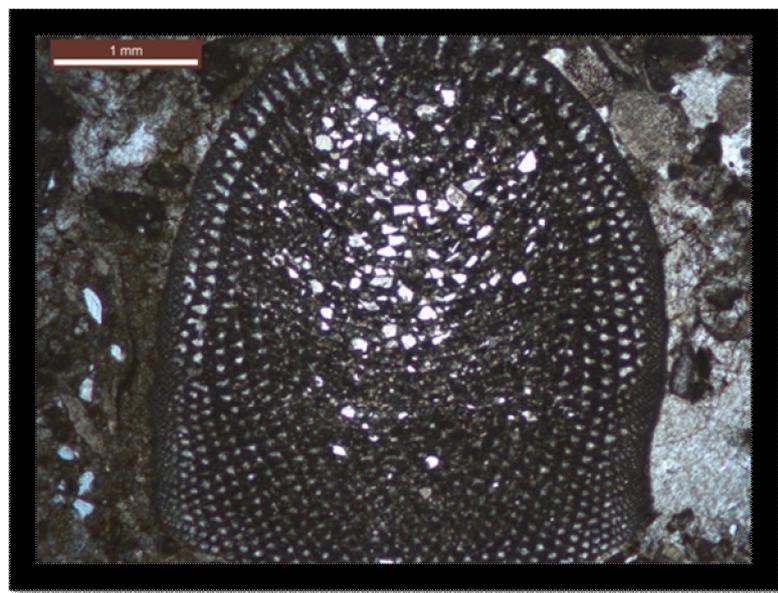
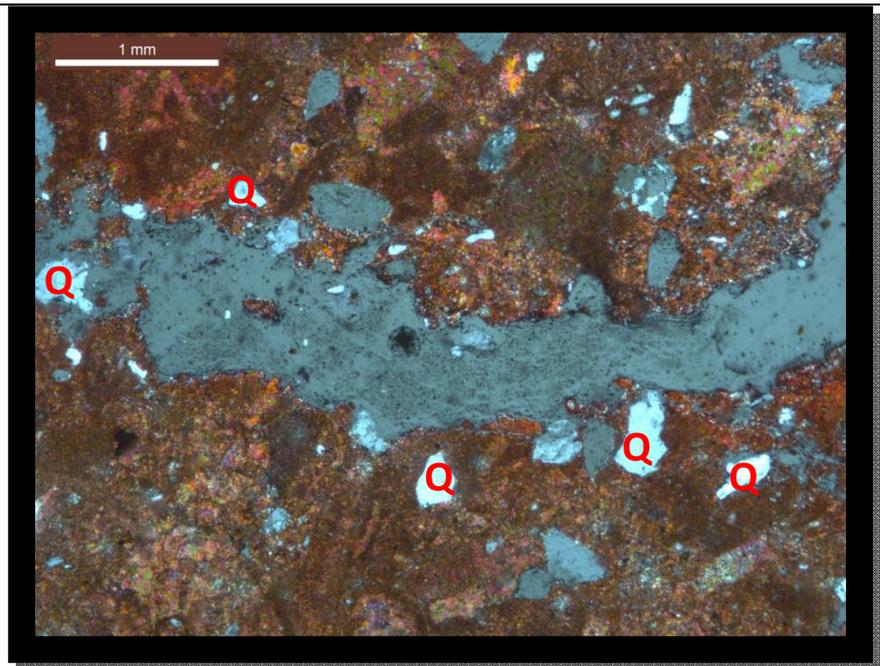


Fig. 2: Detalle del espacio poroso localizado en la lamina. Q son granos de cuarzo en color gris claro. Los que aparecen en gris oscuro son poros.

Fig. 3: Orbitolina gigante con cuarzo

Lamina CA-S1-4		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por cuarzo abundante y clastos esqueletales		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico mayoritario; algunas zonas matriz micrítica minoritaria	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: foraminíferos (orbitolinas grandes), crinoides y briozoos. Componentes no esqueléticos: los aloquemos son granos angulosos de cuarzo tanto en la matriz como en las orbitolinas, litoclastos y peloides 	No observado
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Intramicrita	CLASE 2

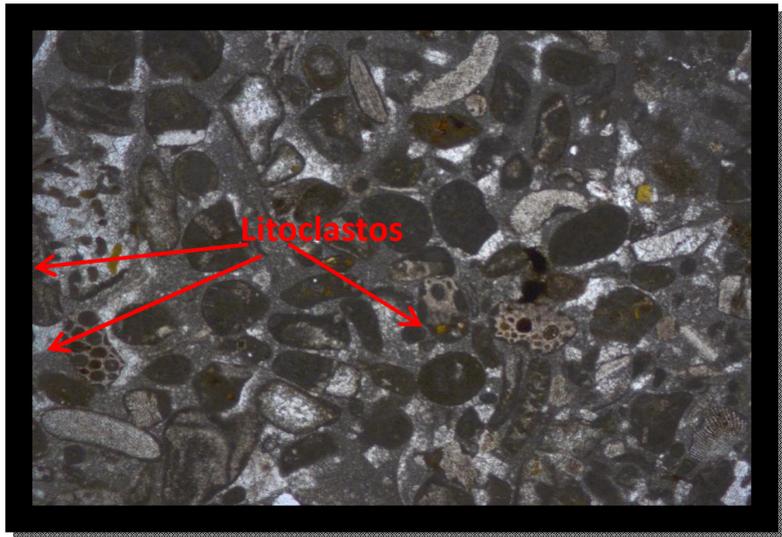


Fig. 1: Aspecto general de la microfácies donde se observan los litoclastos en la matriz, peloides y litoclastos. También cuarzo anguloso.

Autora:

Dr. Concepción
Fernández Leyva

Lamina CA-S1-44

TIPO DE MICROFÁBRICA

Microfábrica clástica formada por clastos esqueléticos (orbitolinas predominantemente)

COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA

(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: foraminíferos (orbitolinas grandes), menor proporción de crinoides y briozoos. Componentes no esqueléticos: los aloquemos son peloides, granos angulosos de cuarzo casi exclusivamente en las orbitolinas (algo en la matriz) orientadas, lo que nos indica la dirección de flujo (talud con cierta energía) y litoclastos de lodo micrítico 	No observado

CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Bioesparita	CLASE 1
<p>Autora:</p> <p>Dr. Concepción Fernández Leyva</p>		 <p>Fig. 1: Aspecto general de la microfacies donde se observan las orbitolinas y los componentes no esqueléticos</p>
Lamina CA-S1-46		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por clastos esqueletales y no esqueletales		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucía, 1999)

Cemento esparítico	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: foraminíferos, menor proporción de crinoides y briozoos, algunos fragmentos de posibles braquiópodos. • Componentes no esqueléticos: los aloquemos son peloides y litoclastos mayoritariamente. 	No observado
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Bioesparita	CLASE 3
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva	<div data-bbox="576 871 1445 1532" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="568 1576 1321 1659">Fig. 1: Características texturales y composicionales de la microfacies.</p>	

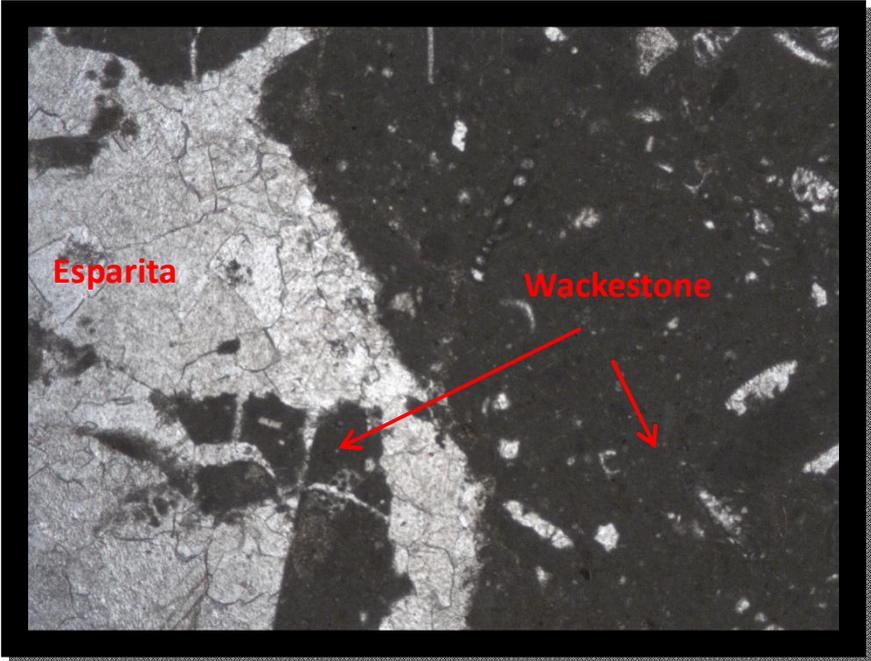
Lamina CA-S1-5		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica cristalina: caliza con nódulos de roca margosa Los nódulos son de <i>mudstone</i> en una caliza formada por esparita.		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
	Los nódulos son de <i>mudstone</i> en una caliza formada por esparita.	El espacio poroso observado en la lamina corresponde al tipo espacios porosos que Lucia (1999) define <i>touching-vug pores</i> , siendo dentro de este grupo de tipo cavernoso y/o fenestral (Fig. 2). Se observa que dicha porosidad tiende a alojarse en la zona de contacto de la esparita con el <i>mudstone</i>
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Bioesparita	CLASE 3
Observaciones: Fisuras con cemento en mosaico. Porosidad cementada.	 <p>La imagen es una microfotografía en escala de grises que muestra un contacto entre dos tipos de calizas. A la izquierda, se encuentra la Esparita, caracterizada por una estructura cristalina formada por nódulos de roca margosa. A la derecha, se encuentra el Wackestone, formado por esparita. Se observan fisuras con cemento en mosaico y porosidad cementada en la zona de contacto.</p>	

Fig. 1: Zona de contacto de el wackestone (derecha) con la esparita. Se observa fragmento del wackestone dentro de la esparita.

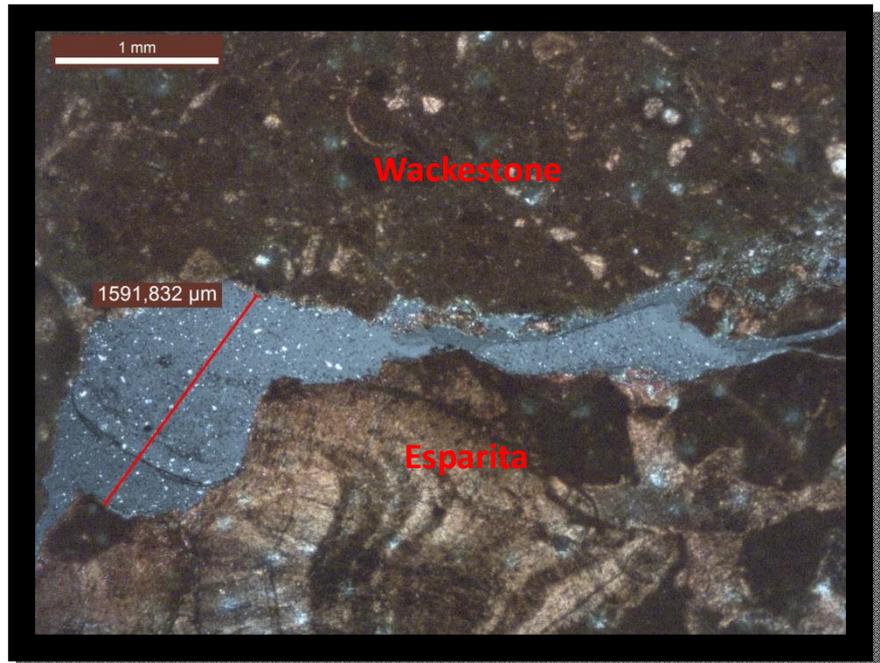


Fig. 2: Lamina teñida con representación de la porosidad en contacto con la zona de wackestone y la esparita

Autora:

Dr. Concepción
Fernández Leyva

Lamina CA-S1-6		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por clastos esqueléticos (orbitolinas predominantemente)		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: foraminíferos (orbitolinas grandes), fragmentos de conchas de bivalvos. Componentes no esqueléticos: los aloquemos son litoclastos de lodo micrítico de gran tamaño, peloides, granos angulosos de cuarzo escasos en la matriz. 	El espacio poroso observado en la lamina corresponde al tipo que Lucia (1999) define <i>touching-vug pores</i> , siendo dentro de este grupo de tipo cavernoso y/o fenestral (Fig.1).
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Wackestone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Bioesparita	CLASE 3
<p>Observaciones: parte de las fisuras están cementadas</p> <p>Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva</p>		
<p>Fig. 1: Aspecto general de la microfacies donde se observan litoclastos de gran tamaño de lodo micrítico. También algunos granos esqueléticos. Igualmente detalle del espacio poroso localizado en la lámina con sus dimensiones.</p>		

Lamina CA-S1-47		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por clastos esqueletales (orbitolinas predominantemente)		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: algas, foraminíferos, lamelibranquios y braquiópodos Componentes no esqueléticos: los aloquemos son peloides, y oolitos con núcleos de cuarzo y corteza poco desarrollada. 	El espacio poroso observado en la lámina corresponde al tipo que Lucia (1999) define <i>touching-vug pores</i> , siendo dentro de este grupo de tipo cavernoso y/o fenestral (Fig.1).
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Grainstones bioclástico</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Bioesparita	CLASE 1
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva	 <p>Fig. 1: La microfacies es un grainstone bioclástico con buena selección y compuesto bioclastos mayoritariamente. Los granos no esqueletales más abundantes son peloides y oolitos con núcleos de cuarzo y corteza poco desarrollada.</p>	

Lamina CA-S1-7		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
<p>Microfabrica clástica / cristalina En la lamina aproximadamente el 50% de la misma es un grainstone con microfábrica clástica en contacto con una calcita bien cristaliza. <i>La descripción de los componentes que a continuación se expone está referida a la microfacies con microfábrica clástica (Fig. 1)</i></p>		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: foraminíferos (bastante transformados) • Componentes no esqueléticos: los aloquemos escasos; se trata posiblemente de peloides. Los foraminíferos están tan transformados que a veces es difícil discernir si se trata de peloides, litoclastos o restos de foraminíferos. 	El espacio poroso observado en la lámina corresponde a la parte de la calcita cristalizada en contacto con la microfacies grainstone. El tipo de porosidad parece ser que es la que Lucia (1999) define <i>touching-vug pores</i> , siendo dentro de este grupo de tipo cavernoso y/o fenestral (Fig.2)
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Bioesparita	CLASE 2

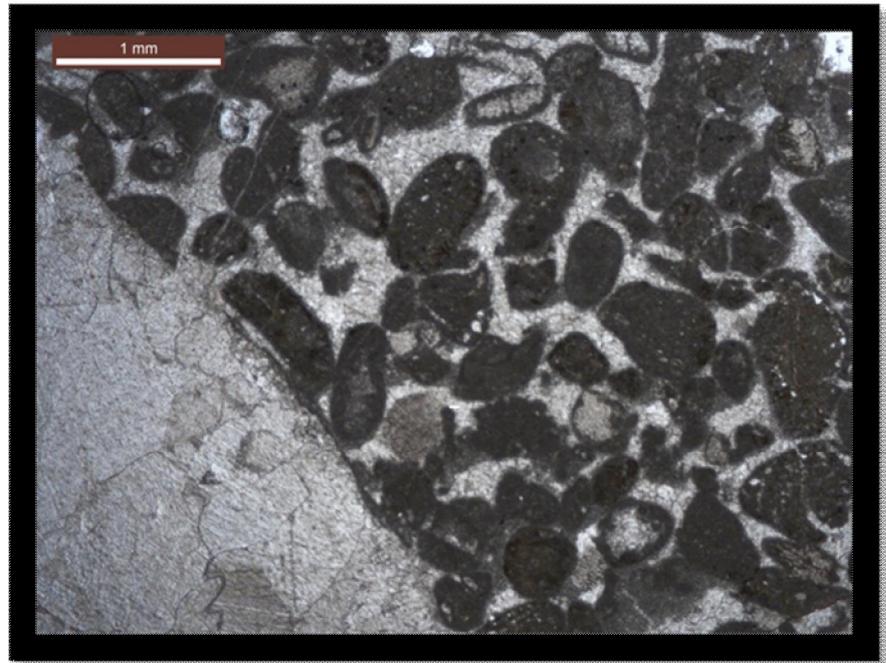


Fig. 1: Zona de contacto de las dos microfacies con microfábrica cristalina (izquierda) y clástica (derecha)

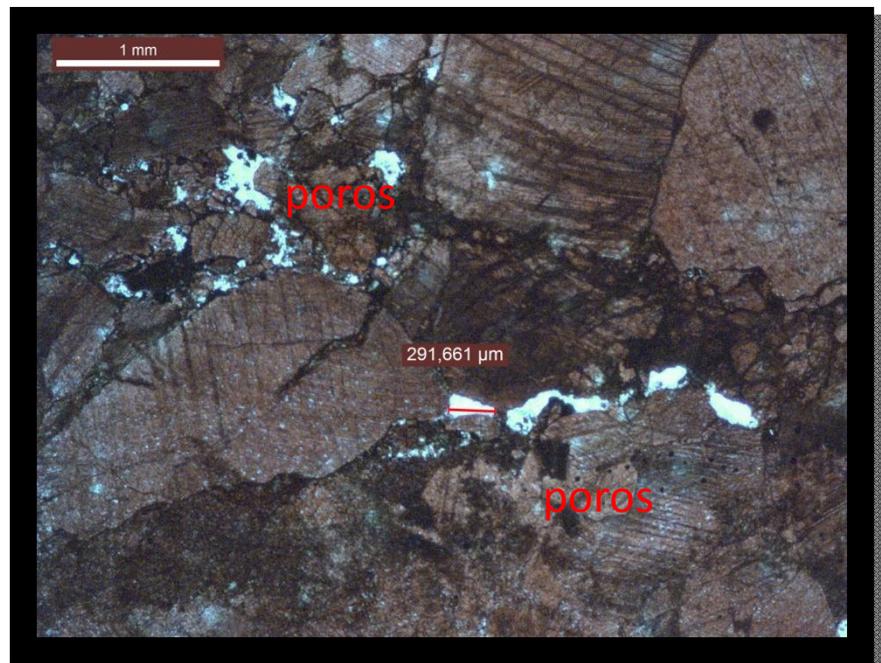
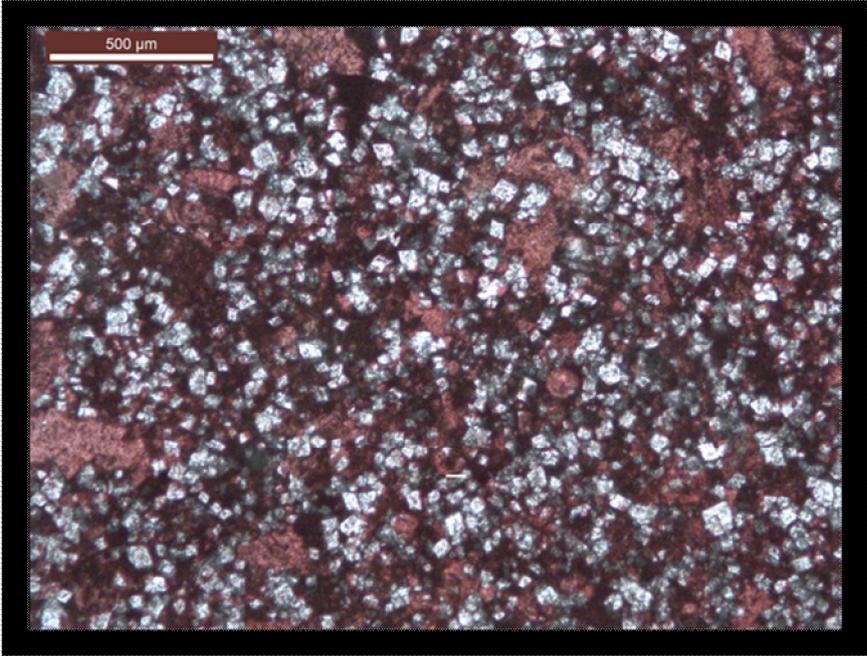


Fig. 2: Lamina teñida con representación de la porosidad en la microfacies con microfabrica clastica

Autora:

Dr. Concepción
Fernández Leyva

Lamina CA-S1-10	
Roca en la que se observa con dificultad la textura deposicional, debido a un proceso de reemplazamiento parcial de calcita a dolomita, proceso conocido como dolomitización	
DESCRIPCIÓN TEXTURAL DE LA LÁMINA Y CLASIFICACIÓN DE LA MICROFACIES	
En este caso vamos a utilizar la clasificación de <i>Friedman (1965)</i> : Esta clasificación es útil para calizas y dolomías cristalinas, en las que no se aprecia bien la textura deposicional. En ella se considera la textura cristalina (forma de los cristales) y la fábrica cristalina (dimensión y relaciones mutuas entre cristales). La muestra CA-S1-10 pertenece a una <i>caliza dolomítica</i> que contiene en torno al 30-40% de dolomita. Si observamos la lamina, los cristales que aparecen sin teñir, suhédricos a euhédricos, son los de dolomita, que exhiben tamaños menores de 100 µm. El resto de material sin teñir es material no alterado de microesparita. Por tanto, textura inequigranular y porfirotopica. Es una fábrica de neoformación.	
CLASIFICACIÓN	
Clasificación de la microfacies	Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Friedman (1965) <i>Caliza dolomítica</i>	CLASE 2
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva	 <p>Fig. 1: Cristales de dolomita en una matriz de microesparita (rosada)</p>

Lamina CA-S1-26		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfabrica clástica formada por clastos esqueletales dominantes		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> Componentes esqueléticos: bioclastos dominantes frente a los componentes no esqueléticos. (foraminíferos fundamentalmente, gasterópodos) Componentes no esqueléticos: litoclastos y granos de cuarzo muy ocasionales 	El tipo de espacio poroso que aquí observamos es el que esta dentro de lo que Lucia (1999) define como espacio poroso intrapartícula (vuggy pore space): concretamente de fractura. Esta se aloja en la matriz micrítica y es posteriormente rellenada con cemento esparítico que deja algunos huecos sin rellenar generando este tipo de porosidad.
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) <i>Bioesparita</i>	CLASE 3

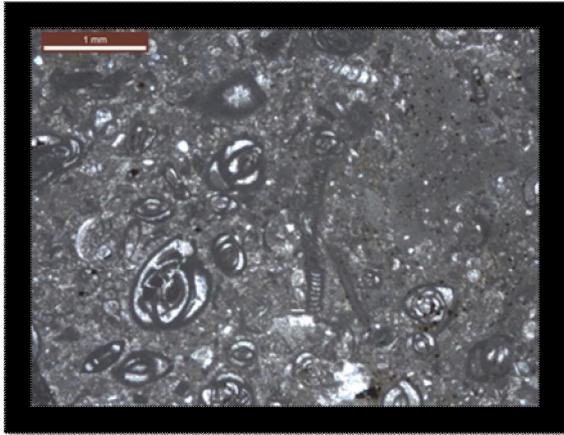


Fig. 1: Secciones de foraminíferos en matriz micrítica parcialmente esparítico.

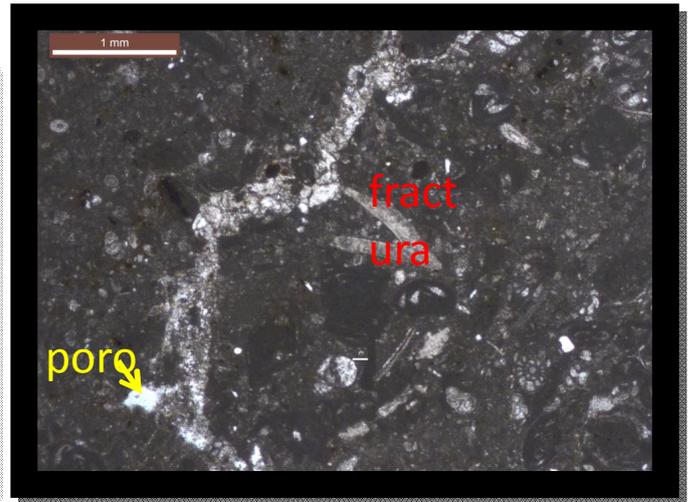
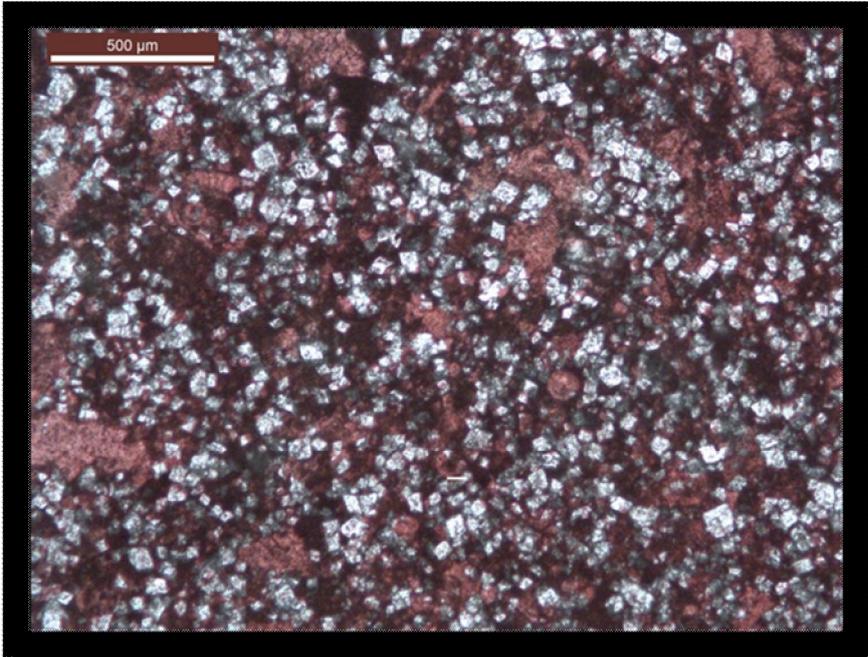
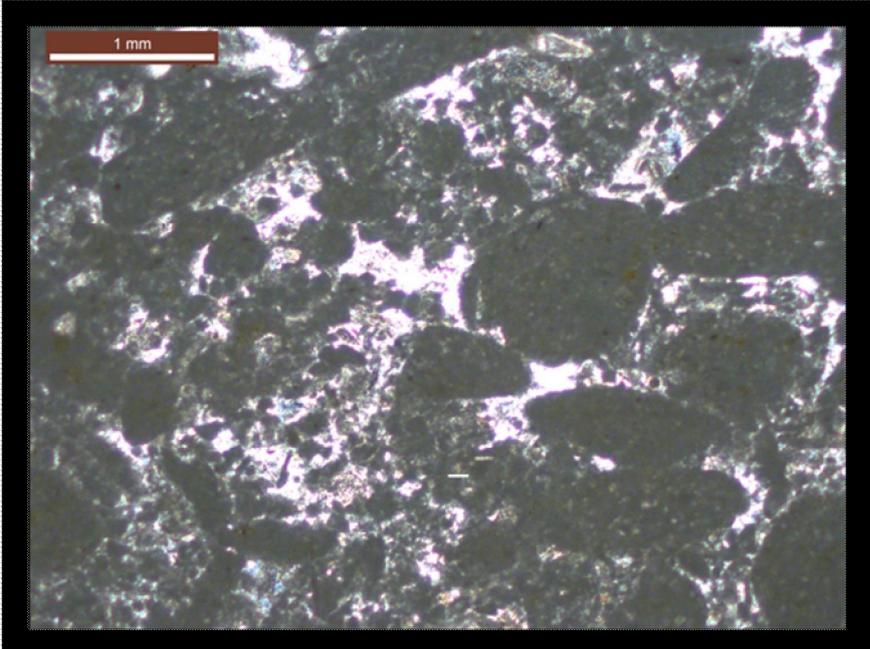


Fig. 2: Fractura alojada en la matriz micrítica sellada con cemento

Autora:

Dr. Concepción Fernández Leyva

Lamina CA-S1-15	
Roca en la que se observa con dificultad la textura deposicional, debido a un proceso de reemplazamiento parcial de calcita a dolomita, proceso conocido como dolomitización	
DESCRIPCIÓN TEXTURAL DE LA LÁMINA Y CLASIFICACIÓN DE LA MICROFACIES	
En este caso vamos a utilizar la clasificación de <i>Friedman (1965)</i> : Esta clasificación es útil para calizas y dolomías cristalinas, en las que no se aprecia bien la textura deposicional. En ella se considera la textura cristalina (forma de los cristales) y la fábrica cristalina (dimensión y relaciones mutuas entre cristales). La muestra CA-S1-15 pertenece a una <i>caliza dolomítica</i> que contiene en torno al 20% de dolomita. Si observamos la lamina, los cristales que aparecen sin teñir, suhédricos a euhédricos, son los de dolomita, que exhiben tamaños menores de 100 µm. El resto de material sin teñir es material no alterado de microesparita. Por tanto, textura inequigranular y porfirotópica. Es una fábrica de neoformación.	
CLASIFICACIÓN	
Clasificación de la microfacies	Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Friedman (1965) <i>Caliza dolomítica</i>	CLASE 2
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva	 <p>Fig. 1: Cristales de dolomita en una matriz de microesparita (rosada)</p>

Lamina CA-S1-17		
TIPO DE MICROFÁBRICA		
Microfábrica clástica formada por clastos esqueletales mayoritariamente		
COMPONENTES DE LA MICROFÁBRICA		
(a) Componentes ortoquímicos	(b) Componentes aloquímicos:	(c) Espacio poroso y tipos de poros (Según Lucia, 1999)
Cemento esparítico y matriz micrítica	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes esqueléticos: foraminíferos muy transformados • Componentes no esqueléticos: peloides 	Hay una parte de la lámina en la que la porosidad es muy alta. Podría ser de tipo cavernoso, lo que Lucia incluye dentro del espacio poroso intrapartícula (vuggy pore space).
CLASIFICACIÓN		
Clasificación de la microfacies		Clasificación Petrofísica (Lucía, 1999)
Clasificación de Dunham (1962) <i>Wackestone/packstone</i>	Clasificación de Folk (1959,1962) Bioesparita	CLASE 3
Autora: Dr. Concepción Fernández Leyva		
	Fig. 1: Secciones de foraminíferos bastante transformados en matriz micrítica y cemento esparítico.	

(a) Tabla de resultados

En la **tabla 1** se recoge cada una de las muestras clasificadas según el esquema de Dunham (1962) y las clases petrofísicas a las que pertenecen según Lucía (1998), espacio poroso y fracturas y estilolitos

MUESTRA	DESCRIPCIÓN DE LAS MICROFACIES	CLASIFICACIÓN PETROFÍSICA	ESPACIO POROSO Y TIPOS	FRACTURAS Y ESTILOLITOS
CA-S1-17	WACKESTONE/PACKSTONE	CLASE 3	Espacio poroso intrapartícula	
CA-S1-22	WACKESTONE	CLASE 3		Microfracturas irregulares
CA-S1-23	MUDSTONE	CLASE 3		
CA-S1-24	MUDSTONE/WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-25	MUDSTONE/WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-13	MUDSTONE/WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-14	PACKSTONE	CLASE 2		
CA-S1-15	DOLOMICRITA	CLASE 2		
CA-S1-16	MUDSTONE	CLASE 3		
CA-S1-26	PACKSTONE	CLASE 2	Espacio poroso intrapartícula	Fractura rellena con cemento
CA-S1-27	MUDSTONE/WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-28	BOUNDSTONES	CLASE 3		
CA-S1-29	WACKESTONE/PACKSTONE	CLASE 3		
CA-S1-30	WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-7	PACKSTONE	CLASE 2	Touching vug porosity	
CA-S1-8	MUDSTONE	CLASE 3		
CA-S1-9	PACKSTONE	CLASE 3		
CA-S1-10	DOLOMICRITA	CLASE 2		
CA-S1-11	WACKESTONE	CLASE 3		Microfracturación
CA-S1-12	WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-48	WACKESTONE/PACKSTONE	CLASE 3		
CA-S1-49	MUDSTONE	CLASE 3		
CA-S1-50	PACKSTONE	CLASE 2		
CA-S1-51	PACKSTONE	CLASE 2		Fisuras cementadas
CA-S1-5	MUDSTONE	CLASE 3	Touching vug porosity	Fracturas cementadas
CA-S1-6	WACKESTONE	CLASE 3	Touching vug porosity	
CA-S1-47	GRAINSTONE	CLASE 1	Touching vug porosity	
CA-S1-2	PACKSTONE	CLASE 2	Touching vug porosity	

CA-S1-3	WACKESTONE/PACKSTONE	CLASE 3	Touching vug porosity	
CA-S1-4	PACKSTONE	CLASE 2		
CA-S1-42	PACKSTONE	CLASE 2		
CA-S1-43	GRAINSTONE	CLASE 1		Microfracturas locales
CA-S1-44	PACKSTONE	CLASE 2		
CA-S1-45	GRAINSTONE	CLASE 1		
CA-S1-46	PACKSTONE	CLASE 3		
CA-S1-1	PACKSTONE	CLASE 3	Espacio poroso intrapartícula	
CA-S1-18	PACKSTONE	CLASE 2		
CA-S1-19	GRAINSTONE	CLASE 1	Espacio poroso intrapartícula	
CA-S1-20	PACKSTONE	CLASE 3	Espacio poroso intrapartícula	
CA-S1-21	WACKESTONE/PACKSTONE	CLASE 3	Algo de porosidad no generalizada	
CA-S1-31	PACKSTONE	CLASE 3		
CA-S1-32	PACKSTONE	CLASE 3		
CA-S1-33	GRAINSTONE	CLASE 1	Touching vug porosity	
CA-S1-34	GRAINSTONE	CLASE 1	Espacio poroso intrapartícula	
CA-S1-35	GRAINSTONE	CLASE 1	Espacio poroso intrapartícula	
CA-S1-36	MUDSTONE DOLOMITIZADO	CLASE 3		
CA-S1-37	MUDSTONE/WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-38	WACKESTONE	CLASE 3		Microfracturas selladas
CA-S1-39	MUDSTONE/WACKESTONE	CLASE 3		
CA-S1-40	PACKSTONE	CLASE 3		
CA-S1-41	PACKSTONE	CLASE 2		

Tabla1. Clasificación de microfacies y clase petrofísicas de las muestras del acuífero Carrascal-Ferrer.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las calizas que han sido estudiadas del acuífero de Carrascal-Ferrer, en general, conservan la textura deposicional, lo que nos permite clasificarlas según los esquemas propuestos por Folk o Dunham. Hay algunos casos en los que están presentes ciertos reemplazamientos, es decir, dolomitizaciones parciales que destruyen parcialmente la textura original (CA-S1-10 y CA-S1-15).

Generalmente estamos ante muestras de porosidad muy baja; así se deduce de las observaciones utilizando la técnica de la microscopía de transmisión, y los datos obtenidos en el laboratorio de la porosidad abierta (0,1m(%) n5,6). Esta porosidad abierta es la determinante desde el punto de vista de la roca como almacén de fluidos. Las microfracturas son la porosidad abierta que se identifica más fácilmente en estas láminas estudiadas, si bien generalmente aparecen muy localizadas y generalmente selladas con cemento y/o matriz. La porosidad abierta interpartícula es prácticamente inexistente con la técnica utilizada en este estudio. Como comentamos al principio de este anexo, la microscopía óptica de polarización es un método indicado para vacíos superiores a 10 μm (la máxima resolución del microscopio óptico se sitúa alrededor de 5 μm). Por tanto, es importante resaltar la baja capacidad de resolución de la esta técnica para poros por debajo de 1 μm . Como consecuencia de esto la determinación de la porosidad más fina, requiere la utilización de técnicas complementarias (Microscopía Electrónica de Barrido y Análisis Digital de Imagen), que recomendamos hacer en futuros estudios.

Por formaciones o edades, obtenemos los siguientes datos:

- **Mioceno/Aquitaniense:** se trata básicamente de microfacies que conservan su textura deposicional, del tipo Mudstone/Wackestone, Clase petrofísica 3 de Lucia. Facies en general poco fracturadas, porosidad muy baja.
- **Paleógeno/Oligoceno:** predominan las microfacies Wackestone/Packstone, Clase petrofísica 2 y 3 de Lucia. Algo de fracturación sellada con cemento en buen número de muestras.
- **Caliza de Jaén:** predominan las microfacies Wackestone/Packstone; CLASE 2 y 3 de Lucia
- **Formación Jumilla:** Microfacies variadas y clase petrofísica 1 y 3.
- **Formación Sácaras:** la microfacies predominante es el Packstone y la clase petrofísica la Clase 2.
- **Formación Seguilí:** predominan las microfacies Wackestone/Packstone, Clase petrofísica 3 de Lucia.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archie, G.E., 1950. Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *Am. Assoc. Petrol. Geol*, 36: 278-298.
- Bertrand, J.P., 1969. Cours de petrography, appliquee a l.étude des problemas petroliers. Tome 1: Etude des roches. Technip, Paris, 130 p.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Am. Assoc. Petrol. Geol Mem* 1: 108-121.
- Dürrast, H. and Siegesmund, S., 1999. Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rocks. *Int. Journ. Earth Sciences*, 88: 392-408.
- Elf-Aquitaine, 1977. Essai de caracterisation sedimentologique: des depats carbonates. 2. Elements d'interpretation. Elf-Aquitaine, Bousens et Pau, 230 p.
- Folk, R. L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *Am. Assoc. Petrol.Geol. Bull*, 43: 1-38.
- Folk, R. L., 1969. Spectral subdivision of limenstone types. *Am. Assoc. Petrol. Geol Mem* 1: 62-84.
- Logan, B. W and Semeniuk, V. (1976). Dynamic metamorphism, processes and products in Devonian carbonate rocks, Canning Basin, Western Australia. *Geol. Soc. Austral. Spec Publ.* 6: 1-183.
- Lucia, F. J., 1983. Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space. *J. Petrol Tech.*, 35: 626-637.
- Lucia, F. J., 1995. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 79: 1275-1300.
- Lucia, F. J., 1999. Carbonate reservoir characterization. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 1-226.
- Nelson, R. A., 1985. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. Gulf Publishing, Houston, pp 1-320.
- Selley, R. C., 1982. An introduction to sedimentology. Academic Press, London, 417 pp.
- Van Golf-Racht, TD., 1996. Naturally fractured carbonate reservoirs. In: Chilingarian GV, Mazullo SJ; Rieke HH (eds) Carbonate reservoir characterization: a geologic-engineering analysis, part II. Elsevier, Amsterdam, pp 683-771.

ANEXO III. ANÁLISIS DE LABORATORIO

INFORME DE LABORATORIO Nº 12/0235

1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.

Se han recepcionado en el centro de laboratorios del IGME 51 muestras identificadas por el solicitante con la siguiente referencia.

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO
CA-S1-1	3925-01
CA-S1-2	3925-02
CA-S1-3	3925-03
CA-S1-4	3925-04
CA-S1-5	3925-05
CA-S1-6	3925-06
CA-S1-7	3925-07
CA-S1-8	3925-08
CA-S1-9	3925-09
CA-S1-10	3925-10
CA-S1-11	3925-11
CA-S1-12	3925-12
CA-S1-13	3925-13
CA-S1-14	3925-14
CA-S1-15	3925-15
CA-S1-16	3925-16
CA-S1-17	3925-17
CA-S1-18	3925-18
CA-S1-19	3925-19
CA-S1-20	3925-20
CA-S1-21	3925-21
CA-S1-22	3925-22
CA-S1-23	3925-23
CA-S1-24	3925-24
CA-S1-25	3925-25
CA-S1-26	3925-26
CA-S1-27	3925-27

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO
CA-S1-28	3925-28
CA-S1-29	3925-29
CA-S1-30	3925-30
CA-S1-31	3925-31
CA-S1-32	3925-32
CA-S1-33	3925-33
CA-S1-34	3925-34
CA-S1-35	3925-35
CA-S1-36	3925-36
CA-S1-37	3925-37
CA-S1-38	3925-38
CA-S1-39	3925-39
CA-S1-40	3925-40
CA-S1-41	3925-41
CA-S1-42	3925-42
CA-S1-43	3925-43
CA-S1-44	3925-44
CA-S1-45	3925-45
CA-S1-46	3925-46
CA-S1-47	3925-47
CA-S1-48	3925-48
CA-S1-49	3925-49
CA-S1-50	3925-50
CA-S1-51	3925-51

2. DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (GEOTEK).

La susceptibilidad magnética se determina con el Multi-sensor core-logger MSCL Geotek, utilizando el sistema de medición de susceptibilidad magnética MS2, con el sensor de contacto puntual MS2E incorporado en el equipo.

El sensor MS2E está diseñado para realizar medidas de alta resolución de susceptibilidad magnética a lo largo de superficies lisas con una rugosidad inferior a un 1mm. Tiene un área de respuesta de 3.8 mm de profundidad * 10.5 mm de longitud, disminuyendo la respuesta un 50% a una profundidad de medida de 1 mm y al 10% a 3.5 mm.

Los datos obtenidos por este sistema, realizando la media entre tres medidas en distintas posiciones diferentes de la muestra, son de susceptibilidad magnética volumétrica específica % \pm de la muestra, en unidades del SI (*10⁻⁵ SI).

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Valor medio (SI)	Valor medio (cgs)
CA-S1-1	3925-01	-1,5	-0,119
CA-S1-2	3925-02	-2,0	-0,159
CA-S1-3	3925-03	-2,0	-0,159
CA-S1-4	3925-04	-0,5	-0,040
CA-S1-5	3925-05	-1,5	-0,119
CA-S1-6	3925-06	-1,5	-0,119
CA-S1-7	3925-07	-2,0	-0,159
CA-S1-8	3925-08	-2,0	-0,159
CA-S1-9	3925-09	-2,5	-0,199
CA-S1-10	3925-10	-4,0	-0,318
CA-S1-11	3925-11	-3,0	-0,239
CA-S1-12	3925-12	-2,5	-0,199
CA-S1-13	3925-13	0,0	0,000
CA-S1-14	3925-14	-2,5	-0,199
CA-S1-15	3925-15	1,0	0,080
CA-S1-16	3925-16	-1,5	-0,119
CA-S1-17	3925-17	-1,5	-0,119
CA-S1-18	3925-18	-1,5	-0,119
CA-S1-19	3925-19	-2,0	-0,159
CA-S1-20	3925-20	0,0	0,000
CA-S1-21	3925-21	-1,5	-0,119
CA-S1-22	3925-22	-1,5	-0,119
REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Valor medio (SI)	Valor medio (cgs)

CA-S1-23	3925-23	-2,0	-0,159
CA-S1-24	3925-24	-2,0	-0,159
CA-S1-25	3925-25	-2,5	-0,199
CA-S1-26	3925-26	0,0	0,000
CA-S1-27	3925-27	-2,5	-0,199
CA-S1-28	3925-28	-1,5	-0,119
CA-S1-29	3925-29	-0,5	-0,040
CA-S1-30	3925-30	0,5	0,040
CA-S1-31	3925-31	-1,0	-0,080
CA-S1-32	3925-32	-1,5	-0,119
CA-S1-33	3925-33	-2,0	-0,159
CA-S1-34	3925-34	-1,5	-0,119
CA-S1-35	3925-35	-2,0	-0,159
CA-S1-36	3925-36	-2,0	-0,159
CA-S1-37	3925-37	-2,5	-0,199
CA-S1-38	3925-38	-2,0	-0,159
CA-S1-39	3925-39	-2,5	-0,199
CA-S1-40	3925-40	-0,5	-0,040
CA-S1-41	3925-41	-2,0	-0,159
CA-S1-42	3925-42	-1,0	-0,080
CA-S1-43	3925-43	0,0	0,000
CA-S1-44	3925-44	-0,5	-0,040
CA-S1-45	3925-45	-1,0	-0,080
CA-S1-46	3925-46	-0,5	-0,040
CA-S1-47	3925-47	0,0	0,000
CA-S1-48	3925-48	-2,0	-0,159
CA-S1-49	3925-49	-1,5	-0,119
CA-S1-50	3925-50	-1,5	-0,119
CA-S1-51	3925-51	-1,5	-0,119

3. MÉTODOS DE ENSAYO PARA PIEDRA NATURAL. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE Y LA POROSIDAD ABIERTA. UNE-EN 1936:2007
Apartado 8.1. (PTE-ET-041 ED.8 y PTE-ET-041-A ED.0)¹

Tipo de probeta	Irregular²
Tamaño de grano	No aplica
Acabado superficial	Corte con sierra
Acondicionamiento antes de ensayar	Secado en estufa

REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m ³)	Incertidumbre (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
CA-S1-1	3925-01	2663	0,77	1,4	<0,1
CA-S1-2	3925-02	2689	0,93	0,7	<0,1
CA-S1-3	3925-03	2681	0,57	0,4	<0,1
CA-S1-4	3925-04	2682	1,03	0,8	<0,1
CA-S1-5	3925-05	2652	0,73	2,3	<0,1
CA-S1-6	3925-06	2674	0,68	0,9	<0,1
CA-S1-7	3925-07	2694	0,57	0,4	<0,1
CA-S1-8	3925-08	2698	0,63	0,2	<0,1
CA-S1-9	3925-09	2704	0,77	0,2	<0,1
CA-S1-10	3925-10	2726	0,47	0,6	<0,1
CA-S1-11	3925-11	2704	0,35	0,4	<0,1
CA-S1-12	3925-12	2682	0,65	0,2	<0,1
CA-S1-13	3925-13	2483	0,51	7,5	<0,1
CA-S1-14	3925-14	2692	0,56	0,8	<0,1
CA-S1-15	3925-15	2720	0,52	0,1	<0,1
CA-S1-16	3925-16	2681	0,55	0,6	<0,1
CA-S1-17	3925-17	2623	0,75	3,0	<0,1
CA-S1-18	3925-18	2690	0,55	0,3	<0,1
CA-S1-19	3925-19	2636	0,29	1,7	<0,1
CA-S1-20	3925-20	2666	0,71	0,8	<0,1
CA-S1-21	3925-21	2685	0,65	1,1	<0,1

¹ No incluido en el alcance de la acreditación de ENAC nº 62/LE 127 rev.10 por no cumplir la norma correspondiente en todos sus apartados.

² Debido a las características de las muestras suministradas, se han cortado probetas irregulares de similar relación superficie/volumen.

CA-S1-22	3925-22	2698	0,44	0,2	<0,1
CA-S1-23	3925-23	2705	0,43	0,3	<0,1
REFERENCIA SOLICITANTE	REFERENCIA LABORATORIO	Densidad aparente (kg/m³)	Incertidumbre (kg/m³)	Porosidad abierta (%)	Incertidumbre (%)
CA-S1-24	3925-24	2705	0,41	0,1	<0,1
CA-S1-25	3925-25	2700	0,35	0,1	<0,1
CA-S1-26	3925-26	2611	0,36	3,1	<0,1
CA-S1-27	3925-27	2690	0,45	0,8	<0,1
CA-S1-28	3925-28	2630	0,43	3,0	<0,1
CA-S1-29	3925-29	2618	0,46	3,1	<0,1
CA-S1-30	3925-30	2457	0,44	5,6	<0,1
CA-S1-31	3925-31	2620	0,64	2,6	<0,1
CA-S1-32	3925-32	2626	0,36	2,2	<0,1
CA-S1-33	3925-33	2682	0,49	0,9	<0,1
CA-S1-34	3925-34	2588	0,45	4,5	<0,1
CA-S1-35	3925-35	2626	0,54	3,1	<0,1
CA-S1-36	3925-36	2670	0,56	2,0	<0,1
CA-S1-37	3925-37	2587	0,49	2,3	<0,1
CA-S1-38	3925-38	2649	0,70	1,1	<0,1
CA-S1-39	3925-39	2687	0,58	0,5	<0,1
CA-S1-40	3925-40	2673	0,69	1,0	<0,1
CA-S1-41	3925-41	2685	0,71	0,6	<0,1
CA-S1-42	3925-42	2679	0,61	1,1	<0,1
CA-S1-43	3925-43	2682	0,57	0,7	<0,1
CA-S1-44	3925-44	2690	0,56	0,2	<0,1
CA-S1-45	3925-45	2694	0,63	1,1	<0,1
CA-S1-46	3925-46	2669	0,48	1,4	<0,1
CA-S1-47	3925-47	2687	0,73	0,6	<0,1
CA-S1-48	3925-48	2638	0,62	1,8	<0,1
CA-S1-49	3925-49	2702	0,49	0,1	<0,1
CA-S1-50	3925-50	2699	0,99	0,1	<0,1
CA-S1-51	3925-51	2709	0,55	0,1	<0,1