

CIEMAT/DPE/CITA/AG/06/2007

**AGP DE CO₂: SELECCIÓN
DE FORMACIONES
FAVORABLES EN LA
CUENCA DEL EBRO.**

ROCÍO CAMPOS *
M^A ÁNGELES PERUCHA**
FERNANDO RECREO *

*** CIEMAT**
**** IGME**

OCTUBRE 2007

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto Singular Estratégico PS-120000-2005-2 del Programa Nacional de Energía del Ministerio de Educación y Ciencia, titulado: "Tecnologías avanzadas de generación, captura y almacenamiento de CO₂", subproyecto N° 3 "Almacenamiento Geológico de CO₂".

Agradecer al IGME el acceso a los datos a través del Fondo Documental del Archivo de Hidrocarburos para realizar este trabajo.

AGP de CO₂: Selección de Formaciones Favorables en la Cuenca del Ebro.

Campos, R.; Perucha, A.; Recreo, F.

124 p.p., 53 figs., 11 tablas., 68 refs.

RESUMEN:

El almacenamiento geológico profundo (AGP) es una de las iniciativas que, en el ámbito internacional, están cobrando mayor relevancia para eliminar o reducir las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera. En este contexto, el estudio de las posibilidades de AGP de CO₂ en territorio español se está canalizando a través del Proyecto Singular Estratégico PS-120000-2005-2 del Programa Nacional de Energía del Ministerio de Educación y Ciencia, denominado "Tecnologías avanzadas de generación, captura y almacenamiento de CO₂", subproyecto N° 3 "Almacenamiento Geológico de CO₂".

En este informe y como parte del mencionado proyecto, se estudian las posibilidades que ofrece, de cara al almacenamiento definitivo de CO₂, la cuenca del Ebro, la cual es una de las áreas seleccionadas en estudios previos.

Dentro de la cuenca, y mediante un estudio y reinterpretación de la información derivada de la investigación realizada para la exploración de hidrocarburos, se han seleccionado una serie de formaciones que por sus características relativas a disposición, extensión, profundidad y porosidad, entre otras, podrían constituir un futuro almacenamiento. Se estudian así mismo, las formaciones sello que garantizarían la estanqueidad de los diferentes almacenes y se proporciona una estimación de la capacidad de almacenamiento de cada formación, aportando datos en Megatoneladas de CO₂, que si bien son aproximados, si puede dar una idea clara de la capacidad de almacenamiento, y pueden ser útiles para la toma de decisiones futuras.

Underground CO₂ Storage: Approach for Favourable Formations in Ebro Basin.

Campos, R.; Perucha, A.; Recreo, F.

124 p.p., 53 figs., 11 tables., 68 refs.

ABSTRACT:

The study of the possibilities of conducting Deep Geological CO₂ Storage inside Spanish territory is being performed through the Strategic Singular Project PS-120000-2005-2 of the National Program of Energy from the Education and Science Ministry, and called "CO₂ generation, sequestration and storage advanced technologies", subproject N3 "CO₂ Geological Storage"

This report studies the possibilities the Ebro basin offers for definitive CO₂ storage as one of the Spanish selected areas from previous studies.

The study and reinterpretation of the information obtained from the hydrocarbon exploration accomplished in the area has lead to the selection of a series of geological formations. These formations have been chosen attending certain characteristics such as their disposition, extension, depth and porosity.

The study has also been conducted considering the characteristics of the geological formations above the CO₂ storage formations so as to guarantee the sealing of the storage. The study includes the approximate estimation of the storage capacity for each of the formations in Megatons of CO₂, which can be useful in future decision making.

Deep geological storage is one of the more relevant international initiatives in order to eliminate or reduce the antropogenic CO₂ emissions to the atmosphere.

ÍNDICE

RESUMEN – ABSTRACT	3
1.- INTRODUCCIÓN	9
2.- SITUACIÓN Y GEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL EBRO	11
3.- APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS A LA CUENCA DEL EBRO	21
4.- DOCUMENTACIÓN UTILIZADA	27
5.- DESCRIPCIÓN DE LOS SONDEOS	33
6.- SELECCIÓN DE FORMACIONES FAVORABLES	83
7.- ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS ALMACENES SELECCIONADOS	107
8.- RESUMEN Y CONCLUSIONES	115
REFERENCIAS	

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.- Cartografía geológica general de la cuenca del Ebro y áreas adyacentes*
- Figura 2.- Mapa de isobatas y cortes sintéticos de los tres sectores de la cuenca del Ebro*
- Figura 3. Cartografía de las Unidades Tectosedimentarias (T1 a T8) de la cuenca del Ebro.*
- Figura 4a .- Lineamientos de 1^{er} orden en la cuenca del Ebro y áreas adyacentes.*
- Figura 4b.- Lineamientos de 1^{er} y 2^o orden y distribución de epicentros de terremotos en la cuenca del Ebro y áreas adyacentes.*
- Figura 5.- Distribución de epicentros de terremotos en la Península Ibérica.*
- Figura 6- Plano de situación de los sondeos de prospección de hidrocarburos, de las centrales térmicas y de las poblaciones en la cuenca del Ebro.*
- Figura 7.- Leyenda común a los sondeos*
- Figura 8.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Rioja-1.*
- Figura 9.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Rioja-2.*
- Figura 10.- Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Rioja-3 y Rioja 4.*
- Figura 11.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Arnedo-1.*
- Figura 12.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Marcilla-1.*
- Figura 13.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Ballobar-1.*
- Figura 14.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Bujaraloz-1.*
- Figura 15.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Candanos-1.*
- Figura 16.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Caspe-1.*
- Figura 17.- Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Ebro-1 y Ebro-2.*
- Figura 18.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Ejea-1.*
- Figura 19.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Esplús-1.*
- Figura 20.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Fraga-1.*
- Figura 21.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Gelsa-1.*
- Figura 22.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo La Zaida-1.*
- Figura 23.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Lopín-1.*
- Figura 24.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Magallón-1.*
- Figura 25.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Mayals-1.*
- Figura 26.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Lérida-1.*
- Figura 27.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Monegrillo-1.*
- Figura 28.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Monzón-1.*
- Figura 29.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Sariñena-1.*
- Figura 30.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Tauste Este-1.*
- Figura 31.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Valpalmas-1.*
- Figura 32.- Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Zaragoza-1 y Zuera-1.*
- Figura 33.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Senant-1.*
- Figura 34.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Castellfullit-1.*
- Figura 35.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Guisona-1.*
- Figura 36.- Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Basella-1, Sanahuja-1 y Pinos-1.*
- Figura 37.- Columna estratigráfica "tipo" para el sector central de la cuenca del Ebro.*
- Figura 38.- Mapas 2D y 3D de isobatas de la base del Terciario.*
- Figura 39.- Mapas 2D y 3D de isobatas del techo del Paleozoico.*

- Figura 40.- Mapa de isobatas de la base del Terciario con profundidad inferior a 2000 m.
- Figura 41.- Mapa de isobatas del techo del Paleozoico con una profundidad inferior a 2500 m.
- Figura 42.- Plano de posición de las correlaciones realizadas entre sondeos.
- Figura 43.- Correlación 4 entre los sondeos Arnedo-1, Magallón1, La zaida- 1 y Caspe-1.
- Figura 44.- Correlación 5 entre los sondeos Caspe-1, Mayals-1, Senant-1 y Castellfullit-1.
- Figura 45.- Correlación 6, entre los sondeos Marcilla-1, Ejea-1, Tauste Este-1, Zuera-1, Monegrillo-1, Ballobar-1, Fraga-1 y Mayals-1.
- Figura 46.- Correlación 7, entre los sondeos Marcilla-1, Valpalmas-1, Monzón-1, Esplús-1, Lérida-1 y Senant-1.
- Figura 47.- Correlación 8, entre los sondeos Monegrillo-1, Ebro-2, Sariñena-1 y Monzón-1.
- Figura 48.- Correlación 9, entre los sondeos La Zaida-1, Ebro-1, Bujaraloz-1, Ballobar-1, Lérida-1, Guisona-1, Sanahuja-1 y Basella-1.
- Figura 49.- Columna estratigráfica con las posibles formaciones almacén y sello identificadas en el sector central de la cuenca del Ebro. El espesor de los niveles definidos corresponde a un valor medio obtenido a partir de los datos de los sondeos de exploración de hidrocarburos.
- Figura 50.- Mapas de isobatas del techo y muro del almacén A1 y estimación del volumen total de roca disponibles para almacenamiento.
- Figura 51.- Mapas de isobatas del techo y muro del almacén A2 y estimación del volumen total de roca disponibles para almacenamiento.
- Figura 52.- Mapas de isobatas del techo y muro del almacén A3 y estimación del volumen total de roca disponibles para almacenamiento.
- Figura 53.- Mapas de isobatas del techo y muro del almacén A4 y estimación del volumen total de roca disponibles para almacenamiento.

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.- Relación de sondeos para la exploración de hidrocarburos consultados en la realización de este trabajo.
- Tabla 2.- Unidades litoestratigráficas diferenciadas en el sondeo Rioja-1.
- Tabla 3.- Reflectores identificados en el perfil sísmico R1-10 correlacionados con el sondeo Rioja-1.
- Tabla 4.- Reflectores identificados en el perfil sísmico R1-33 correlacionados con el sondeo Rioja-2.
- Tabla 5.- Resumen de los posibles almacenes y sus características, intersectados en el sondeo Candasnos-1.
- Tabla 6.- Correlación de los tramos del Muschelkalk en los sondeos Ebro-1 y Ebro-2.
- Tabla 7.- Correlación de tramos del Buntsandstein entre los sondeos Ebro-1 y Ebro-2.
- Tabla 8.- Resumen de posibles niveles almacén en el sondeo Ebro-1 reflejados en la investigación realizada en exploración de hidrocarburos.
- Tabla 9.- Resumen de posibles niveles almacén en el Sondeo Ebro-2 reflejados en las investigación realizada en exploración de hidrocarburos.
- Tabla 10.- Posibles almacenes identificados en el sondeo Fraga-1.
- Tabla 11.- Profundidades de los diferentes niveles identificados en los sondeos seleccionados, en amarillo los niveles almacén y en verde los sellos.

1.- INTRODUCCIÓN

El Parlamento Español en el año 2002 aprobó por unanimidad la ratificación del Protocolo de Kyoto, lo que le compromete a *limitar el incremento de sus emisiones de gases de Efecto Invernadero hasta un máximo del 15% para el horizonte 2008–2012, con respecto a los niveles del año 1990*. Hoy en día, los combustibles fósiles continúan siendo la fuente dominante de la energía primaria demandada a escala global, y probablemente, lo seguirán siendo durante un largo periodo de tiempo.

Actualmente el gasto de combustibles fósiles suponen el 85% de toda la energía comercial y la transición hacia las energías renovables llevará un tiempo apreciable. De hecho, en el año 2001, las emisiones españolas netas de gases con efecto invernadero alcanzaron los 383 millones de toneladas (MTm) equivalentes de CO₂, y en el año 2005 las emisiones eran un 52% más que las de 1990, superando con creces el compromiso adquirido para 2012.

La necesidad de tomar iniciativas que traten de reducir o evitar que el CO₂ de las emisiones antropogénicas alcancen la atmósfera es urgente, e implicará nuevas aproximaciones tecnológicas, entre ellas, la captura de las emisiones de CO₂ de las grandes fuentes estáticas, tales como las centrales térmicas, cementeras e industrias de cerámica, entre otras, y su almacenamiento en formaciones geológicas, tales como campos de petróleo o yacimientos de gas, ya exhaustos, masas de agua salina profundas y/o yacimientos de carbón no explotables.

Actualmente el estudio de las posibilidades de almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas se está canalizando a través del Proyecto Singular Estratégico (PSE): "Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂", uno de cuyos objetivos inmediatos, es definir, en el territorio nacional, aquellas cuencas, formaciones o estructuras geológicas con capacidad potencial de almacenar CO₂ de forma permanente (entre 10³-10⁴ años), así como llevar a cabo una estimación preliminar de la capacidad total disponible de almacenamiento geológico de CO₂ en España.

El trabajo que se desarrolla a lo largo de este informe, viene a cubrir una de las fases del mencionado proyecto (PSE) y su objetivo parcial es el estudio de la posibilidad de hallar formaciones que puedan actuar como "almacén" en un

área seleccionada previamente, como es la cuenca del Ebro. Los criterios de favorabilidad tenidos en cuenta para la preselección de la cuenca del Ebro, como una posible zona a prospectar están reflejados en el informe técnico CIEMAT nº 1085, de agosto de 2006: “Almacenamiento Geológico de CO₂: Criterios de Selección de Emplazamientos”, al cual nos referimos también en el apartado 3 de este mismo informe, después de hacer un breve repaso del contexto geológico (Apartado 2).

En el apartado 4 se relacionan los trabajos consultados para el desarrollo de este estudio, dando paso a una descripción detallada de los sondeos consultados en el apartado 5, haciendo especial hincapié en las formaciones mesozoicas. Teniendo en cuenta la descripción detallada de los sondeos, se propone en el final del apartado 5, para el sector central de la cuenca del Ebro, una columna estratigráfica tipo.

En el apartado 6, se describen los trabajos realizados para la definición de formaciones almacén y sello favorables para finalmente llegar, en el apartado 7, a una estimación del volumen de roca disponible para un hipotético almacenamiento de CO₂.

Para finalizar este trabajo se realiza un breve resumen y se extraen las principales conclusiones.

2.- SITUACIÓN Y GEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL EBRO

El informe que se presenta, se centra en el área preseleccionada de la cuenca del Ebro (véase apartado 3), área que se restringe a la zona situada al Sur del cabalgamiento surpirenaico, en la que afloran exclusivamente materiales del Terciario y Cuaternario. Dentro de las cuencas terciarias con escasa deformación de la Península Ibérica, la del Ebro es la de mayor extensión. Geográficamente la cuenca del Ebro se localiza en la parte nororiental de la Península Ibérica y está surcada de E a O por el río Ebro, constituye un área de forma aproximadamente triangular enmarcada por cadenas montañosas alpinas: al Este por la Cadena Costero Catalana, al Sur por la Cordillera Ibérica

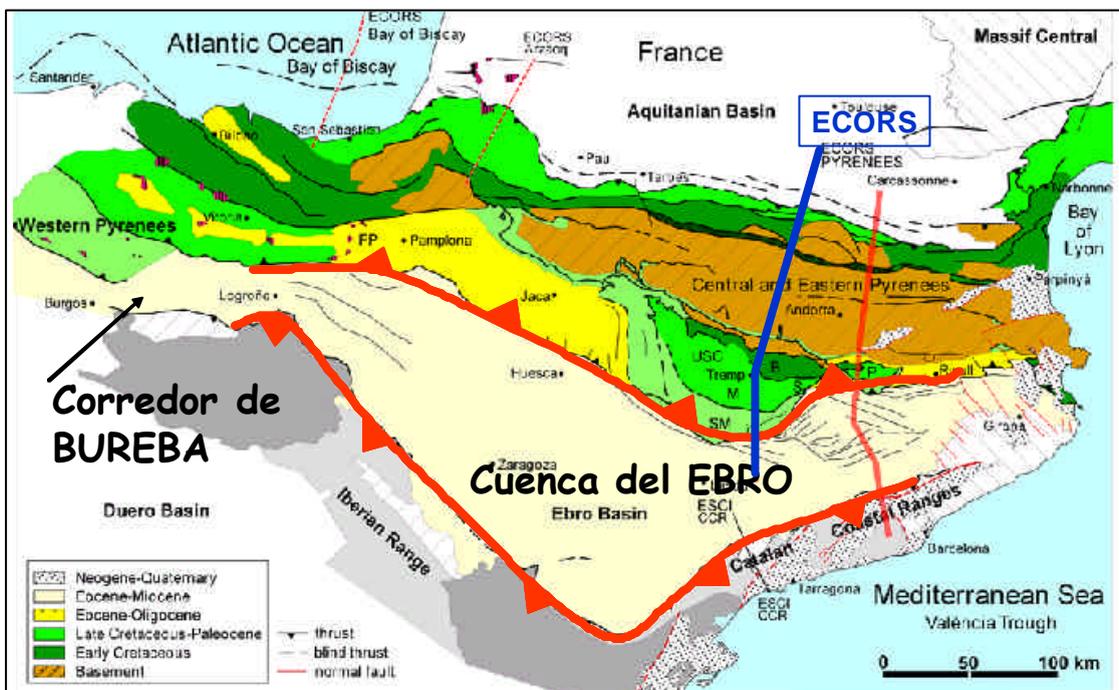


Figura 1.- Cartografía geológica general de la cuenca del Ebro y áreas adyacentes.

y al Norte por los Pirineos. Por su extremo occidental se comunica con la cuenca del Duero (Figura 1) a través del corredor de La Bureba (Burgos).

La cuenca del Ebro constituye la cuenca de antepaís del orógeno pirenaico y la mayoría de sus características estructurales están relacionadas con su evolución tectónica (Arlegui y Simón, 1998). En ella tuvo lugar una potente sedimentación durante el Terciario, con más de 5000 m de sedimentos terciarios en algunos puntos. La profundidad del sustrato pre-Terciario se

incrementa hacia el norte, alcanzando valores de 4000 m bajo el nivel del mar en los Pirineos (Riva et al., 1983). La cuenca del Ebro es también una región intraplaca de la Placa Ibérica y fue afectada por la evolución tectónica de la zona norte de la Península Ibérica durante el Neógeno (Simón-Gómez, 1989). Sus límites y estructura actual se establecieron entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, cuando los cabalgamientos surpirenaicos alcanzaron su emplazamiento definitivo (figuras 1 y 2).

En la zona de contacto con la cuenca del Ebro, el borde sur del orógeno pirenaico está representado por una franja de estructuras tectónicas que mayoritariamente constituyen pliegues y cabalgamientos, en donde la serie implicada abarca desde el Triásico medio hasta el Mioceno. La característica más destacada de la estructura del frente surpirenaico es la presencia de láminas de cabalgamiento desplazadas hacia el sur, sobre un sustrato prácticamente indeformado, y que tienen como nivel de despegue dominante los materiales de facies evaporíticas del Trías medio y superior (Seguret, 1972; Cámara, 1997; Cámara y Klimowitz, 1985; Klimowitz y Torrescusa, 1990). En los sectores central y occidental los cabalgamientos presentan una orientación dominante ONO-ESE, en donde la serie alóctona mesozoico-terciaria se superpone, a favor de las rocas incompetentes triásicas, sobre las molasas oligo-miocenas de la cuenca del Ebro (Puigdefábregas y Soler 1973; (Puigdefábregas y Souquet, 1986; Cámara y Klimowitz, 1985; Puigdefábregas et al., 1992).

La Cordillera Ibérica y la Costero Catalana constituyen los límites suroeste (cabalgante) y sureste respectivamente de la cuenca del Ebro, las cuales desde un punto de vista estructural ambas, parte de una única unidad tectónica, ya que comparten la edad de deformación y el estilo .

La geometría del relleno sedimentario consiste, salvo en el sector occidental, en un prisma con sección en forma de cuña abierta hacia el norte (figura 1), en la que los sedimentos terciarios presentan una tendencia al solapamiento expansivo hacia el sur, con los materiales más antiguos recubriendo el margen pirenaico y los más modernos hacia el margen ibérico (Riba *et al.*, 1983). Las sucesivas formaciones, en general, yacen horizontalmente excepto en donde existen fenómenos de diapirismo en evaporitas o bien, en donde existen fallas normales con anticlinales “roll-over” asociados. La principal macroestructura existente en el área es el sinclinal Logroño-Sástago (Quirantes, 1978; Arlegui et al., 1994) de tendencia NO-SE y localizado a lo largo del río Ebro.

Una parte del relleno de la cuenca del Ebro, en especial en su margen norte, está constituido por formaciones marinas y continentales que se reconocen igualmente en el orógeno pirenaico, donde actualmente forman parte de la cobertera despegada y cabalgante sobre la cuenca. En las zonas donde no emergen los cabalgamientos frontales, el límite entre la actual cuenca del Ebro y las cuencas terciarias pirenaicas de Jaca y Graus es difuso, con continuidad de los afloramientos oligocenos.

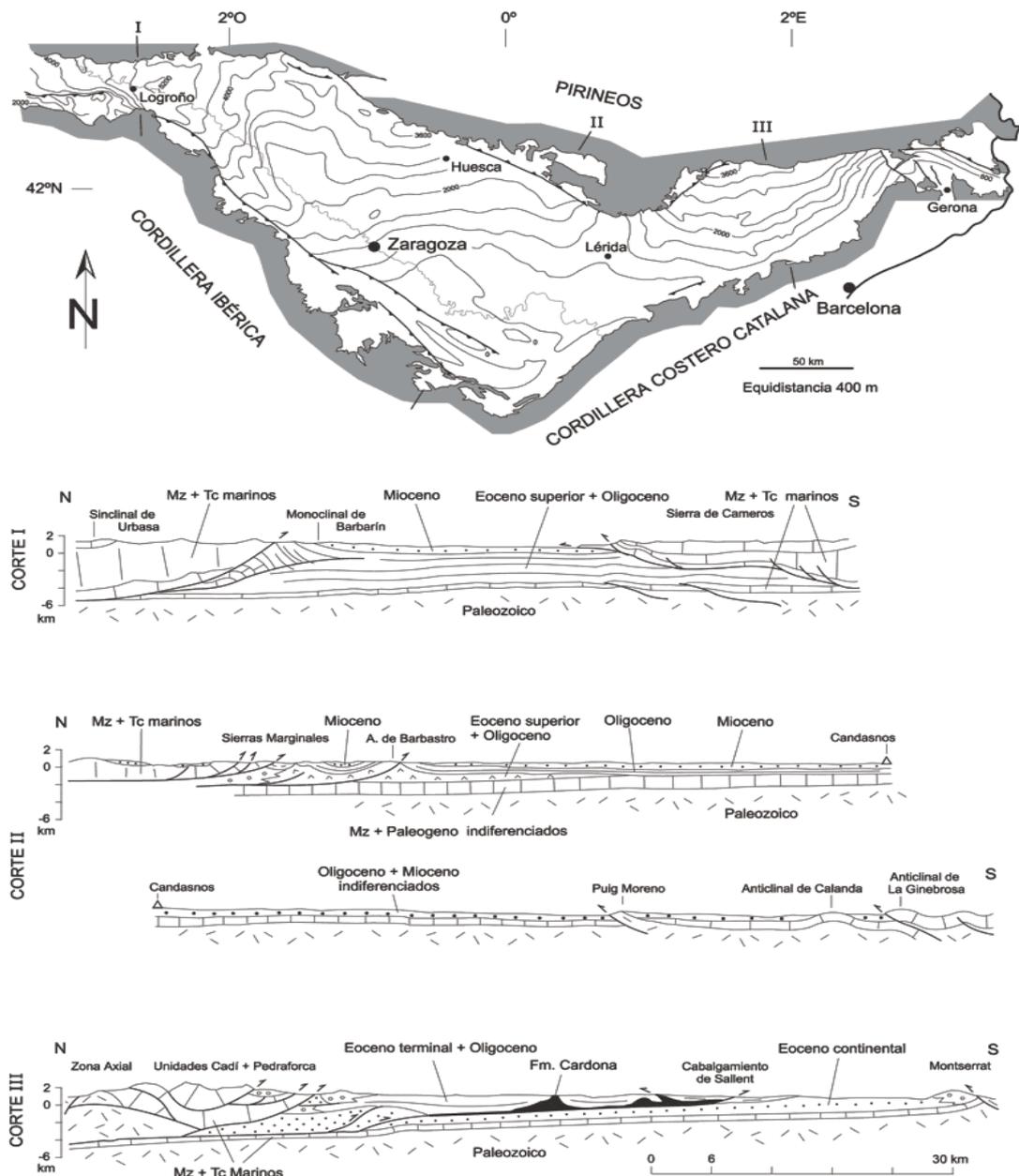


Figura 2.- Mapa de isobatas y cortes sintéticos de los tres sectores de la cuenca del Ebro. Mapa simplificado de ITGE (1990); Corte I simplificado de Muñoz-Jiménez y Casas-Sáinz (1997); Corte II simplificado a partir de Martínez-Peña y Pocovi (1988), Senz y Zamorano (1992) y González (1989); Corte III simplificado de Vergés et al. (1992). Mz: Mesozoico; Tc: Terciario (Tomado de Pardo et al., 2004)

En función de la estructura, la evolución de la subsidencia y la edad de los materiales aflorantes, la cuenca del Ebro puede dividirse en tres sectores (Pardo *et al.*, 2004):

- *Sector occidental* de orientación E-O correspondiente a una cuenca de antepaís simétrica (Muñoz-Jiménez y Casas-Sainz, 1997), afectada por cabalgamientos activos hasta el Mioceno superior, tanto en el margen ibérico (Macizo de Cameros-Demanda) como en el margen pirenaico (Sierra de Cantabria). El relleno terciario presenta además pliegues monoclinales vergentes al norte que son el reflejo de cabalgamientos que afectan a los materiales del basamento pre-Terciario (Figura 2, corte I), así como pliegues de despegue E-O a ONO-ESE con vergencia sur. La terminación oriental de estos pliegues al norte del río Ebro y del río Alhama al sur marcan el límite de este sector, que fue intensamente subsidente en el Paleógeno y el Neógeno, con espesores totales que superan los 5.000 m.

- *Sector central*, más amplio, menos subsidente que el anterior y con estructura prácticamente tabular (Figura 2, corte II). En este sector existe un desplazamiento progresivo de la sedimentación hacia el margen ibérico, el cual funciona finalmente como margen pasivo de la cuenca. El sustrato pre-Terciario próximo a este margen está afectado por cabalgamientos de dirección NO-SE y vergencia N que condicionan la sedimentación paleógena y afectan, incluso, al relleno neógeno (Klimowitz, 1992), provocando afloramientos locales del sustrato como paleorrelieves entre los materiales miocenos. El margen pirenaico lo constituyen las Sierras Exteriores y el anticlinal de Barbastro.

- *Sector oriental*, (Figura 2, corte III) aproximadamente al E de los ríos Noguera Ribagorzana y Guadalupe, donde no existe registro de relleno neógeno, pero que fue netamente subsidente durante el Paleógeno y en el que se reconocen los materiales plegados con direcciones E-O a ESE-ONO y NE-SO en las proximidades del frente surpirenaico, donde el espesor de Terciario llega a superar los 3.600 m. Dichos pliegues están ligados al despegue de horizontes evaporíticos, asociados con la estructuración del frente surpirenaico (Vergés 1993 y 2003; Vergés *et al.*, 1992 y 2002; Vergés y Martínez, 1988).

La evolución paleogeográfica de la cuenca del Ebro estuvo controlada esencialmente por la actividad tectónica que estructuró progresivamente las cadenas circundantes, condicionando la topografía y extensión de las áreas

fuente, la orientación de los márgenes de la cuenca y la variación de las tasas de subsidencia y aporte sedimentario durante el Terciario.

Para el relleno Terciario del conjunto de la cuenca, se han definido ocho unidades tectosedimentarias (Figura 3) a partir de los materiales autóctonos aflorantes (Pérez, 1989; Pérez et al., 1985; González, 1989; Muñoz, 1992 y 1993; Arenas, 1993; Arenas et al., 2001; Villena et al., 1996 a y b; Angulo et al., 2000, Luzón, 2001; Luzón y González, 2000; Luzón et al., 2002; Muñoz *et al.*, 2002). Estas unidades se encuentran separadas por rupturas sedimentarias que se manifiestan como discordancias en las zonas proximales (en los márgenes de la cuenca) que pasan a conformidades hacia el centro de la misma. Las tres primeras unidades son paleógenas, la cuarta se sitúa en la transición Paleógeno-Neógeno y las cuatro restantes son miocenas.

La unidad T1 aflora en el sector oriental y en el borde ibérico del sector central (Figura 3). Su límite inferior es una discordancia a escala cartográfica sobre el basamento pre-Terciario e incluye facies detríticas carbonatadas y evaporíticas continentales.

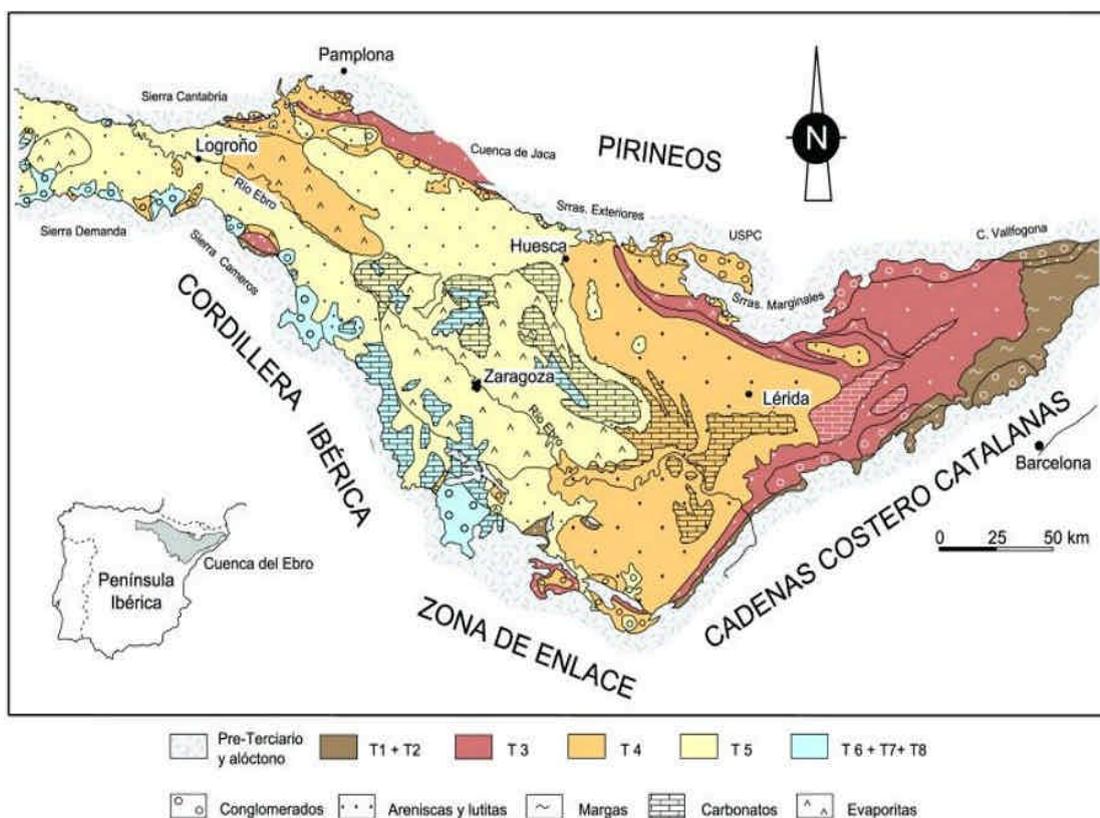


Figura 3. Cartografía de Las Unidades Tectosedimentarias (T1 a T8) de la cuenca del Ebro (tomado de Pardo et al., 2004 modificado de Alonso-Zarza et al., 2002).

La unidad T2 aflora en el SE del sector central, y está compuesta por facies detríticas continentales. En el sector oriental se incluyen facies carbonatadas continentales.

La unidad T3 (Figura 3) está formada por materiales detríticos continentales en los tres márgenes de la cuenca, el depocentro se sitúa próximo al margen pirenaico y alberga potentes y extensas formaciones evaporíticas.

La unidad T4 representa el final del registro sedimentario en el sector oriental de la cuenca, su evolución es compleja y puede presentar variaciones de detalle. La T4 presenta depósitos detríticos en los tres márgenes de la cuenca, al Este estas formaciones enmarcan unidades carbonatadas, mientras que en los sectores central y occidental presenta potentes sucesiones evaporíticas. La máxima subsidencia en esta unidad se alcanza en el sector occidental en un pronunciado surco en el que se superan los 3200 m de potencia.

La unidad T5 (Figura 3), de edad Mioceno, aflora extensamente en los sectores central y occidental. En este último es donde se sitúa de nuevo el depocentro de la cuenca y consiste en potentes sucesiones detríticas en los márgenes hacia el surco riojano, que gradan hacia el sector central a la formación evaporítica de los yesos de Zaragoza, a su vez orlada al N y O por formaciones carbonatadas. Las restantes unidades (T6, T7 y T8) miocenas poseen afloramientos limitados como consecuencia de la posterior erosión. Se encuentran hacia el borde Ibérico y consisten en depósitos detríticos y algunos afloramientos calcáreos. También se observan algunos afloramientos de las unidades T6 y T7 hacia el centro de la cuenca, conformando relieves estructurales labrados en formaciones carbonatadas.

La serie mesozoica que se dispone bajo los sedimentos terciarios, y por lo tanto no aflorante, la describimos en este apartado de una forma genérica por correlación con los afloramientos en áreas adyacentes, principalmente la zona surpirenaica y la Cadena Ibérica. Se presenta, como en otras zonas de la Península Ibérica, como una alternancia de secuencias siliciclásticas y carbonáticas y/o evaporíticas (Virgili et al., 1983, Sopeña et al., 1988).

El Buntsandstein está constituido por conglomerados, areniscas y lutitas que reposan en discordancia angular sobre el zócalo variscico o sobre el Pérmico. En la zona axial de los Pirineos presenta espesores entre 100 y 1000 m y presenta dos megasecuencias (Gisbert et al., 1985), la primera formada por un

conglomerado basal con espesores entre 15 y 40 m que grada verticalmente a areniscas y lutitas, con espesores de 40-220 m según la localización, y la segunda megasecuencia, que consiste, igualmente, en una unidad de conglomerados, areniscas y lutitas con espesores máximos de unos 100 m.

Las facies del Buntsandstein son interpretadas como depósitos fluviales en sistemas trenzados de proximales a distales, que evolucionan en la vertical hacia llanuras de inundación con influencia marina.

El contacto del Buntsandstein con el Muschelkalk es gradual a nivel de afloramiento. En general, presenta una unidad inferior constituida por dolomías margosas de edad Ladiniense Superior (Calvet, 1989, Calvet y Anglada, 1987; Calvet et al., 1987 y 1993), una unidad intermedia formada por calizas grises, y una unidad superior en la que dominan calizas y/o dolomías tableadas. Las tres unidades, en su conjunto presentan una potencia entre 50 y 80 m.

Las tres formaciones carbonatadas del Muschelkalk inferior, superior y la formación Imón, con edades Anisiense, Ladiniense y Rhaetiense respectivamente, están presentes en la parte oriental de la Cordillera Ibérica, Cadenas Costero Catalanas y en la parte oriental de la cuenca del Ebro. Mientras que en la parte occidental de la cuenca del Ebro, y de la Cordillera Ibérica, así como en Pirineos, solo están presentes dos secuencias carbonáticas que representan al Muschelkalk superior (Ladiniense) y a la Fm. Isábena (Rhaetiense) equivalente en edad a la Fm. Imón de la Cordillera Ibérica (Calvet et al., 1993).

El Keuper (Salvany, 1986, 1989 y 1990; Salvany y Bastida, 1994) de los Pirineos meridionales ha sido recientemente revisado por Salvany y Bastida (2004) y puede extrapolarse, al menos parcialmente, a los niveles no aflorantes de la cuenca del Ebro. Presenta evaporitas y depósitos arcillosos y carbonatados de gran desarrollo, en las sierras marginales presenta un espesor entre 300 y 400 m y es esencialmente evaporítico. En él los autores citados reconocen tres unidades litoestratigráficas. La unidad basal en contacto neto sobre el Muschelkalk con un espesor entre 30 y 40 m, presenta yesos, yesos laminados con arcillas y carbonatos y yesos nodulares. La unidad intermedia consiste en una potente acumulación de yesos y arcillas yesíferas sin ninguna ordenación secuencial y su espesor sobrepasa los 200 m, pero se ha estimado que puede llegar a los 400 m. La unidad superior, con un espesor

del orden de 60 m, está formada por un tramo inferior de arcillas con capas de dolomías y un tramo superior con arcillas y calizas laminadas.

El Retiense (Rahetiense) está representado en los Pirineos meridionales por calizas y localmente dolomías (Calvet y Anglada, 1987; Arnal et al., 1994 y 2002), con un espesor entre 20 y 35 m, presenta un límite inferior gradual con las facies lutítico carbonatadas del techo del Keuper y su límite superior está marcado, en esta zona, por una superficie de erosión sobre la que se disponen las facies siliciclásticas de la brecha ferruginosa que constituye la base del Lías (Garrido Megías, 1973; Garrido Megías y Ríos, 1972; Ramón et al., 1992), equivalente a la formación Imón de la Cordillera Ibérica.

Los materiales del Jurásico Surpirenaico reflejan el desarrollo de una amplia plataforma carbonatada epicontinental controlada por la tectónica extensional sinsedimentaria. Dentro del Jurásico se diferencian una serie de secuencias de depósito que se sitúan sobre las brechas ferruginosas anteriormente mencionadas y consideradas como la unidad basal del Jurásico en la región surpirenaica o bien como la sedimentación última triásica (Souquet, 1986). A partir de estos materiales se reconocen cuatro secuencias de depósito en el Jurásico Inferior, la primera constituida por dolomías masivas y brechas dolomíticas. Sobre ella, una secuencia integrada por margas con intercalaciones de calizas. La tercera secuencia está compuesta fundamentalmente por margas fosilíferas en su tramo inferior y calizas bioclásticas con amonites en su tramo superior; y por último, una potente secuencia (20-80 m según los sectores) predominantemente margosa.

El Jurásico medio comprende un conjunto carbonatado de 100 a 200 m de espesor, en su mayor parte dolomitizado. En él se diferencian también cuatro secuencias sedimentarias separadas por importantes lagunas.

El Jurásico superior comprende un conjunto carbonatado de más de 700 m de espesor. Su depósito, controlado por un basculamiento general de la plataforma hacia el Este, generó su erosión en la parte occidental y el desarrollo de un área subsidente en la parte oriental. Igualmente, los materiales se agrupan en cuatro secuencias sedimentarias, todas ellas de carácter carbonatado.

Finalmente, el Cretácico Inferior de los Pirineos centrales y orientales está formado por una sucesión carbonatada de más de 5000 m de espesor en algunos puntos (Robador y García-Senz en: Vera et al., 2004).

3.- APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS A LA CUENCA DEL EBRO

Como ya se ha comentado en este informe, la cuenca del Ebro fue una de las áreas de la Península Ibérica que a priori podría cumplir los criterios de favorabilidad descritos en CIEMAT (2006). En el citado informe, se realiza una descripción detallada de los criterios de favorabilidad según la escala de observación y según la opción de almacenamiento. Ahora en éste, se realiza un breve resumen de los criterios geológicos de selección de emplazamientos para el almacenamiento de CO₂ aplicados concretamente a la cuenca del Ebro.

La cuenca del Ebro en principio cumple con los criterios definidos a escala de cuenca (criterios regionales), que descartan, en principio, las zonas

cratónicas y los orógenos, para centrarse en las cuencas sedimentarias. Se trata de una cuenca sedimentaria terciaria, definida como una cuenca de antepaís del Orógeno pirenaico y tiene

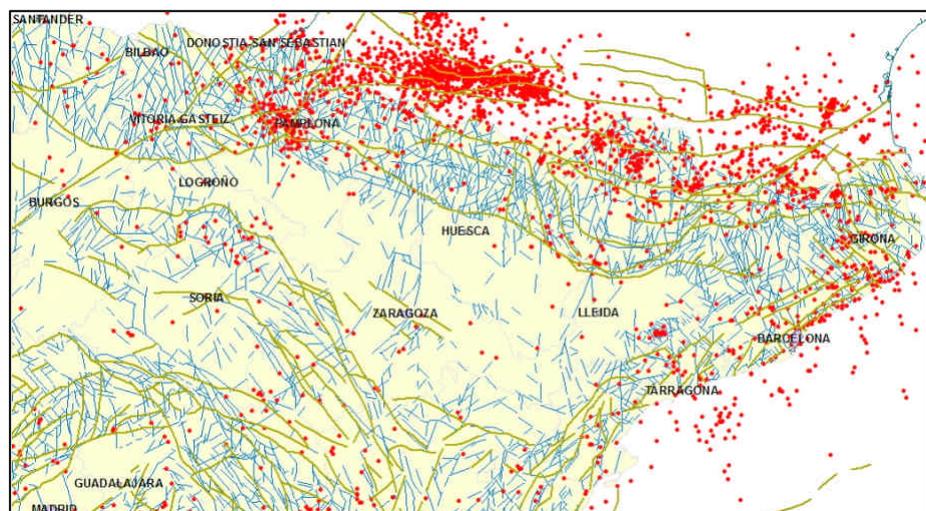


Figura 4a .- Lineamientos de 1^{er} orden en la cuenca del Ebro y áreas adyacentes (CSN – Proyecto PRIOR 2006).

Figura 4b. -.- Lineamientos de 1^{er} y 2^o orden y distribución de epicentros de terremotos en la cuenca del Ebro y áreas adyacentes (CSN – Proyecto PRIOR 2006).

como principal característica el contar con los mayores depocentros de toda la Península Ibérica, junto con la cuenca del Guadalquivir.

Presenta, por tanto, en determinadas zonas, un basamento muy profundo, llegándose a rellenos de 5000 m de potencia. Su génesis está relacionada con una subsidencia originada por un comportamiento flexural de la litosfera, ligada a la generación de cargas por apilamiento de láminas cabalgantes (García Castellanos et. al., 2003).

Respecto a los criterios relacionados con la *fracturación y sismicidad*, según los criterios establecidos, se requieren zonas de baja o nula fracturación y actividad sísmica. En la cuenca del Ebro la densidad de fracturación, en general, es muy baja (entre 0 y 10 fracturas /100 km² – CSN, 2006), aunque aumenta hacia los bordes de la cuenca (Seguret et al., 1984). Este aumento en la densidad de fracturación está relacionado con los lineamientos de primer orden que limitan la cuenca (Figura 4a) y que a su vez están relacionados con las estructuras cabalgantes de los Pirineos y de la Cordillera Ibérica (CSN, 2006). En relación con estas estructuras de primer orden aparecen definidos lineamientos de segundo orden (Figura 4b), los cuales se han obtenido a partir

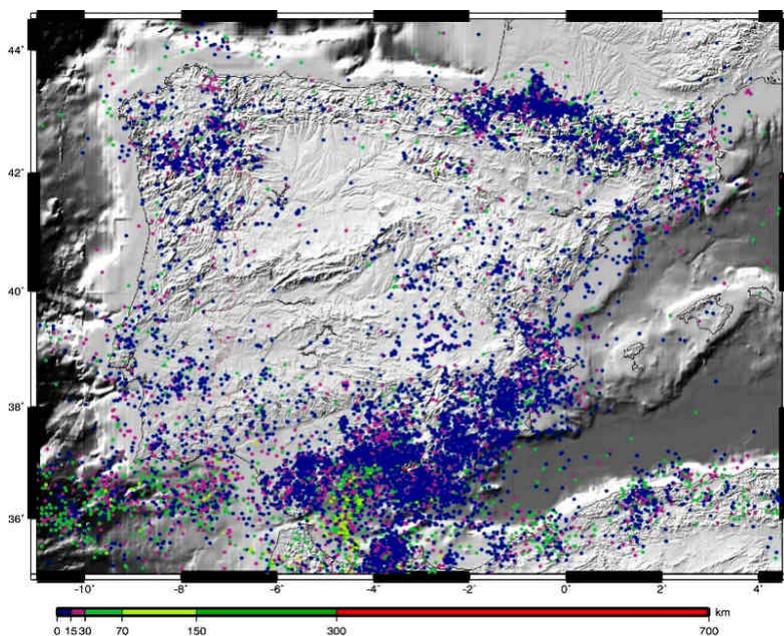


Figura 5.- Distribución de epicentros de terremotos en la Península Ibérica (Catálogo de Sismos Próximos del IGN, hasta diciembre del 2003). De Vicente et al., en: Vera Ed. (2004).

de la superposición de la cartografía geológica y la interpretación estructural del modelo digital del terreno (CSN, 2006). En las proximidades de Zaragoza se define un corredor de tendencia N-S en el que las fracturas de 2º orden, con tendencia principal N-S, parecen estar relacionadas con los lineamientos de 1º orden NE-SO (Figuras 4a y b).

En cuanto a la sismicidad la cuenca del Ebro (Figuras 4b y 5), no parece presentar eventos sísmicos importantes en los registros disponibles (Catálogo

de sismos IGN, hasta diciembre del 2003), aunque tampoco se trata de una zona de nula actividad. Se han registrado eventos sísmicos ligados a los bordes de la cuenca y a algunas estructuras de primer y segundo orden.

En el análisis del campo de esfuerzos actual, el CSN (1998) concluye que la Península Ibérica se encuentra sometida a una compresión NO-SE, excepto en los Pirineos, donde es N-S, y el Golfo de Cádiz, donde es E-O, y que el promedio de esfuerzos recientes pone de manifiesto una compresión N120-140E y otra N30-60E. La comparación entre el campo de esfuerzos calculado para el Mioceno Superior-Cuaternario y el actual, revela la continuidad de esfuerzos en los últimos 9 millones de años, lo que proporciona un fundamento muy sólido para la predicción de posible actividad sísmica y para la estimación del peligro sísmico de una determinada zona.

Otro de los criterios, a menor escala, al cual se intenta dar respuesta en este informe, es la existencia de formaciones almacén y sello, así como su adecuada disposición. Según los criterios establecidos, las posibles formaciones almacén y sello deben estar situadas a una profundidad mayor de 800 m, deben ser formaciones continuas, extensas, suficientemente potentes y con alta porosidad y una adecuada permeabilidad. Las formaciones almacén deben de estar además limitadas, a techo, por unidades confinantes que actúen como sello.

Ambos tipos de formaciones, almacén y sello, han de ser físicamente inalterables durante el proceso de inyección y deben de estar dispuestas constituyendo trampas estratigráficas o estructurales, que serán los emplazamientos que garanticen el confinamiento profundo permanente del CO₂.

En cuanto a la litología, como hemos visto en el epígrafe 2, la serie mesozoica está constituida, en términos genéricos, por una sucesión alternante de secuencias siliciclásticas y carbonáticas y/o evaporíticas (Virgili et al., 1983, Sopeña et al., 1988).

En las rocas carbonatadas, por no presentar minerales reactivos, no se favorecerá el atrapamiento mineral. Sin embargo se dará el atrapamiento iónico en forma de bicarbonato por la disolución de calcita u otros carbonatos. Según la reacción $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3\text{Ca} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$.

Las areniscas, conglomerados y microconglomerados suelen tener mayor porosidad primaria y permeabilidad, suelen presentar minerales reactivos (feldespatos, arcillas, anfíboles, piroxenos, ceolitas) que se disuelven en el agua acidificada por el CO₂ disuelto, aportando cationes que luego pueden precipitarse en carbonatos y otros minerales. Por otra parte, cuanto menor sea el tamaño de grano mayor será la reactividad de los minerales, lo que a la larga favorecerá el atrapamiento mineral en este tipo de rocas.

En cuanto a posibles rocas almacén, ya veremos en los capítulos sucesivos, como la serie mesozoica ofrece amplias posibilidades dentro de los términos siliciclásticos o carbonáticos. Los términos siliciclásticos presentes en los depósitos del Buntsandstein ofrecen la posibilidad de ser almacén por su considerable porosidad primaria y por contener una serie de minerales reactivos que pueden favorecer el atrapamiento mineral. Los términos carbonáticos, más abundantes en la serie mesozoica (Muschelkalk, Jurásico y Cretácico), ofrecen la posibilidad de almacenamiento en una roca con una porosidad principalmente secundaria, en la que se favorecerán los procesos de disolución del CO₂, produciéndose un atrapamiento iónico.

La roca que actúe como sello puede corresponder con litologías como pizarras, arcillas o rocas evaporíticas, dada su baja porosidad y práctica inexistencia de vías posibles de flujo según su disposición. Las pizarras y arcillas contienen además concentraciones altas de minerales (por ejemplo feldespatos y clorita) que aportan cationes para el atrapamiento mineral de CO₂ en forma de carbonatos neoformados. Dentro de la serie mesozoica, como se verá más adelante, existen potentes tramos de rocas evaporíticas y arcillosas en el Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper y Jurásico, que pueden actuar como sellos suprayacentes a las rocas almacén.

La porosidad es un factor fundamental ya que determina la capacidad de almacenamiento. Los valores habituales de porosidad varían entre el 11% y el 30% y lo más favorable es que se trate de una porosidad homogénea y de poros bien intercomunicados. Un buen almacén debe de presentar una porosidad >12% y permeabilidad efectiva >10 mdarcys (Nelms *et al.*, 2004). Este criterio de favorabilidad será estudiado en trabajos futuros, aunque la documentación consultada para el desarrollo de este trabajo nos proporciona, en algunos casos, alguna aproximación.

Para una porosidad determinada, la capacidad de almacenamiento aumenta al aumentar la densidad del CO₂ y, por lo tanto, la profundidad óptima de enterramiento será la que maximice esa propiedad con el menor coste económico. La profundidad óptima varía entre 800-2000 m dependiendo del régimen geotérmico.

Por último señalar, que habrá que realizar un esfuerzo en trabajos futuros para conocer el régimen hidrodinámico y los factores hidrogeoquímicos, puesto que el CO₂ puede ser almacenado en aguas salinas profundas y será necesario conocer la hidrodinámica de la cuenca sedimentaria para predecir el comportamiento futuro de los fluidos.

4.- DOCUMENTACIÓN UTILIZADA EN EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO

La cuenca del Ebro ha sido una zona intensamente investigada tanto desde una perspectiva académica, como por intereses económicos. Durante la década de los 90 y la primera década del 2000. Se estudiaron diferentes aspectos de la misma, como por ejemplo, los relacionados con la subsidencia y el relleno sedimentario (Vargas, 2002) y se realizaron análisis tectonosedimentarios de los materiales terciarios (Luzón, 2001). También se realizaron estudios tectónicos genéricos como los de Cortés, 1999 y Cortés y Casas, 2000, así como más específicos, entre los que destacan la determinación del campo de esfuerzos en el sector Central de la cuenca del Ebro de Arlegui, 1996; Arlegui y Simón, 2001 y Arlegui et al., 1994.

La investigación de los posibles recursos para explotación de hidrocarburos aportó una importante documentación geológica, que es la que se generó en las fases de exploración, principalmente en las décadas de los 60 a 80, y que actualmente resultan de gran utilidad para el trabajo que nos ocupa: la selección de formaciones favorables para el almacenamiento de CO₂. Gracias a la gran cantidad de sondeos de exploración de hidrocarburos realizados (Lanaja, 1987; ITGE, 1990) se posee una relativamente amplia información acerca de la geología del subsuelo.

Para la realización de este trabajo se ha utilizado tanto la información procedente de los trabajos de carácter académico, como la derivada de la exploración petrolífera, a la cual, se ha tenido acceso a través del Fondo Documental del Archivo de Hidrocarburos del Instituto Geológico y Minero de España.

La información derivada de los sondeos de exploración de hidrocarburos ha sido especialmente importante para la realización de este trabajo. Aunque con una aportación muy desigual. Casi siempre han proporcionado datos precisos sobre la profundidad de los niveles atravesados y las características litológicas de los mismos. Los datos relativos a la estructura son muy generales y a veces confusos y los datos específicos de porosidad, permeabilidad y salinidad de las formaciones atravesadas son escasos y, cuando existen, son de carácter cualitativo.

De cualquier forma, la columna litológica de los sondeos descrita en estos trabajos consultados de exploración petrolífera, ha servido como base imprescindible para la selección de las diferentes formaciones almacén y sello, que se relacionan en capítulos sucesivos y que deberán ser caracterizadas con detalle en fases posteriores del proyecto.

En la Tabla 1 se relacionan los sondeos consultados para la realización de este trabajo. En esta Tabla se describe cada sondeo por su nombre, compañía operadora, año en que fueron realizados, así como sus coordenadas UTM (m) para su correcta localización. En la figura 6 queda reflejada la posición de los sondeos utilizados.

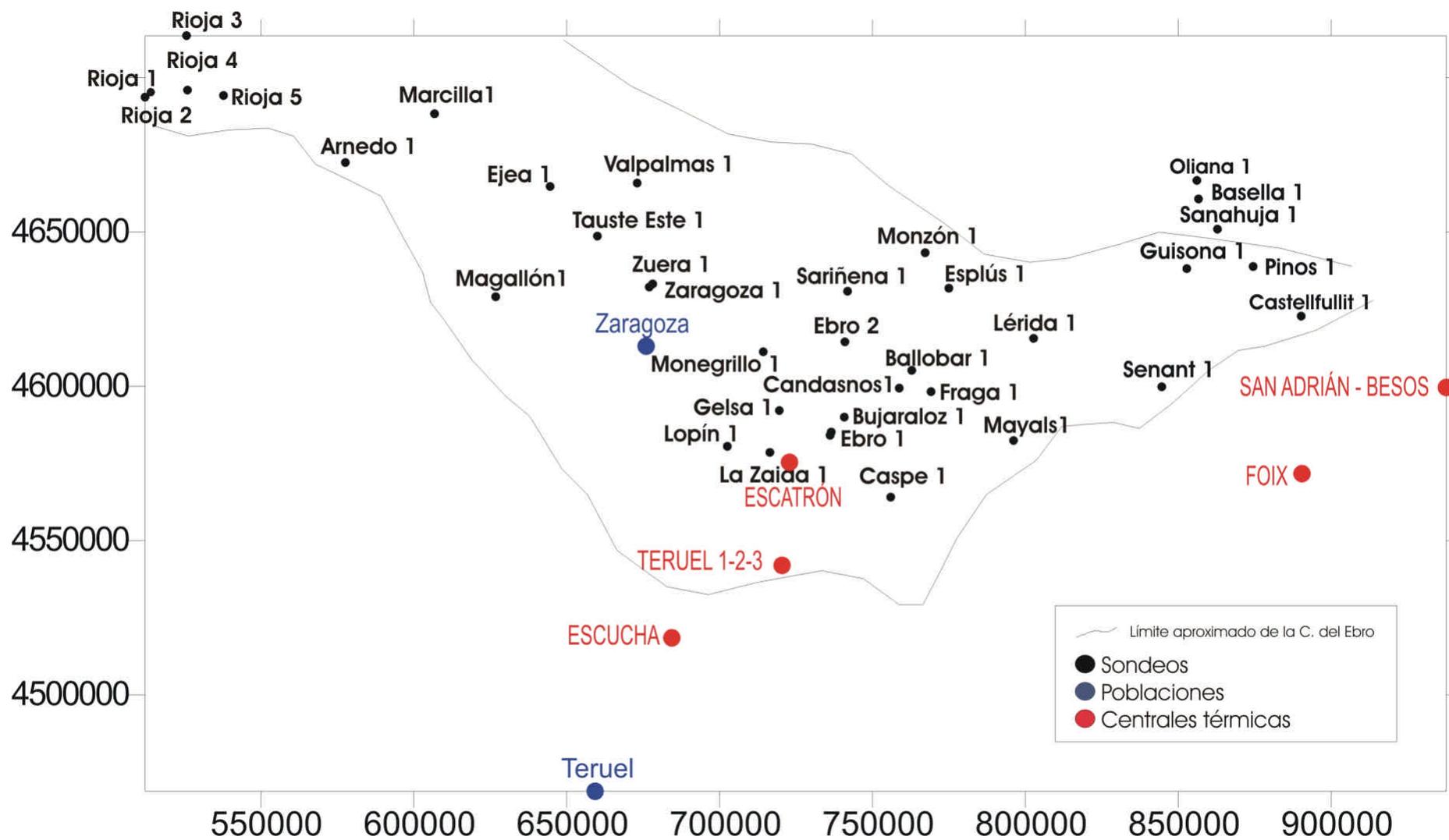


Figura 6.- Plano de situación de los sondeos de prospección de hidrocarburos, de las centrales térmicas y de las poblaciones en la cuenca del Ebro.

PROVINCIA	NOMBRE	Nº	X30	Y30	COTA Z (m)	PROF	OPERADOR	FECHA	HOJA 50.000
LA RIOJA	ARNEDO-1	107	577642.38	4672532.66	580	-1576	AMOSPAIN	1958	0243
HUESCA	BALLOBAR-1	097	762843.74	4605165.6	276	-3450	ENPASA	1957	0387
LERIDA	BASELLA-1	096	856589.72	4660718.17	437	-3851	CIEPSA	1957	0291
ZARAGOZA	BUJARALAZ-1	083	740777.3	4590002.79	340	-2825	VALDEBRO	1956	0414
HUESCA	CANDASNOS-1	124	758735.66	4599395.61	279	-1550	ENPASA	1959	0386
ZARAGOZA	CASPE-1	313	760904.32	4562906.59	280	-1810	AUXINI	1969	0442
BARCELONA	CASTELLFULLIT- 1	103	890161.03	4622730.62	724	-2450	ESSO	1958	0391
ZARAGOZA	EBRO-1	346	736509.68	4585149.58	328	-1970	CAMPSA	1972	0413
HUESCA	EBRO-2	386	740962.64	4614391.15	467	-2950	CAMPSA	1973	0385
ZARAGOZA	EJEA-1	121	644584.59	4664758	327	-3121	ESSO	1959	0283
HUESCA	ESPLUS-1	143	774964.67	4631802.46	242	-2087	ENPASA	1960	0358
HUESCA	FRAGA-1	113	769136.75	4598245.3	296	-2143	ENPASA	1958	0415
ZARAGOZA	GELSA-1	259	719528.44	4592127.83	245	-2593	SIPSA	1965	0413
LERIDA	GEOLLEIDA-1	GT08	802663.14	4615527.84	189	-1180	ADARO	1987	0388
LERIDA	GUISONA-1	112	852750.09	4638138.66	507	-3225	ESSO	1958	0361
ZARAGOZA	LA ZAIDA-1	058	716464.27	4578553.94	162	-1698	VALDEBRO	1954	0441
LERIDA	LERIDA-1	117	800966.49	4618860.73	202	-1410	ENPASA	1958	0388
ZARAGOZA	LOPIN-1	465	702543.28	4580521.62	224	-1652	CAMPSA	1977	0384
ZARAGOZA	MAGALLON-1	135	626799.42	4629012.47	426	-3420	ERAP	1959	0353
NAVARRA	MARCILLA-1	015	606809.34	4688339.85	295	-3415	VALDEBRO	1949	0206
LERIDA	MAYALS-1	424	796114.71	4582414.14	356	-1401	CAMPSA	1975	0415

PROVINCIA	NOMBRE	Nº	X30	Y30	COTA Z (m)	PROF	OPERADOR	FECHA	HOJA 50.000
ZARAGOZA	MONEGRILLO-1	056	714284.19	4611180.09	374	-1447	VALDEBRO	1954	0385
HUESCA	MONZON-1	122	767216.43	4643286.64	297	-3714	ENPASA	1959	0326
BARCELONA	MOP-3	A030	904431.82	4636435.24	303	-2053	E.N. Adaro	1968	0363
LERIDA	OLIANA-1	005	856056.2	4666727.55	435	-2323	CIEPSA	1943	0291
LERIDA	PINOS-1	118	874445	4638814.06	663	-1920	ESSO	1958	0362
BARCELONA	PUIGREIG-1	026	905096.68	4658782.99	431	-3191	VALDEBRO	1952	0331
LA RIOJA	RIOJA-1	357	513387.00	4694609.00	613	-4433	CAMPSA	1976	0170
LA RIOJA	RIOJA-2	376	512156.29	4693725.96	685	-3601	CAMPSA	1973	0170
LA RIOJA	RIOJA-3	408	525715.43	4713664.4	635	-5395	CAMPSA	1974	0170
LA RIOJA	RIOJA-4	434	526028.39	4696012.98	571	-3983	CAMPSA	1975	0170
LA RIOJA	RIOJA-5	542	537802.52	4694261.39	525	-4437	ENIEPSA	1979	0203
LERIDA	SANAHUJA-1	110	862788.03	4650923.63	627	-3510	CIEPSA	1958	0329
HUESCA	SARIÑENA-1	131	741842.1	4630797.87	349	-2893	ENPASA	1959	0357
HUESCA	SARIÑENA-2	AL05	741104.93	4629071.46	304	-2148	ENAGAS	1996	0357
HUESCA	SARIÑENA-3	AL18	742151.15	4630678.72	350	-2082	ENAGAS	1997	0357
LERIDA	SENANT-1	116	844569.96	4599831.98	719	-1652	ESSO	1958	0417
ZARAGOZA	TAUSTE ESTE-1	127	660049.04	4648679.26	419	-3329	ESSO	1959	0322
ZARAGOZA	VALPALMAS-1	123	673060.7	4665876.66	466	-4183	ERAP	1959	0284
ZARAGOZA	ZARAGOZA-1	084	677011.13	4632169.48	336	-2252	VALDEBRO	1956	0354
ZARAGOZA	ZUERA-1	486	678137.64	4633160.05	348	-3315	CAMPSA	1977	0322

Tabla 1.- Relación de sondeos para la exploración de hidrocarburos consultados para la realización de este trabajo.

5.- DESCRIPCIÓN DE LOS SONDEOS

Se presenta en este capítulo la descripción resumida de los sondeos utilizados para la realización de este trabajo, los cuales se han agrupado en tres sectores: el Sector Occidental (zona Rioja), con la descripción de 6 sondeos, (Rioja 1, 2, 3 y 4, Arnedo-1 y Marcilla-1); el Sector Central, con la descripción de 23 sondeos; y el Sector Oriental, con la descripción de 6 sondeos (Basella-1, Sanahuja-1, Guisona-1, Pinos-1, Castellfullit-1 y Senant-1 (Tabla 1).

La descripción de las columnas que se presenta a continuación y cuya leyenda común se refleja en la figura 7, está basada en los informes geológicos (de testificación geológica y geofísica) de los sondeos realizados por las propias compañías de exploración de hidrocarburos. Se han consultado también los informes de perforación y algunos informes de pruebas mecánicas realizadas



Figura 7.- Leyenda común a los sondeos analizados.

en los testigos de los sondeos. Desgraciadamente, estos informes, que fueron realizados entre 1956 y 1979, no siempre han estado disponibles por lo que la descripción de los materiales de la columna litológica se ha realizado apoyándose en la descripción de sondeos próximos. En otros casos ni siquiera se profundiza en la descripción del sondeo, por el poco interés que suponen para el objetivo de este trabajo.

La información de la que se ha dispuesto es extremadamente heterogénea. Para algunos sondeos, como por ejemplo Ebro-1 y Ebro-2 se dispone de un estudio minucioso y detallado, sin embargo para otros, por ejemplo el Rioja-4, la información disponible es escasa y se limita casi exclusivamente a su localización.

Se presenta al final de este capítulo la descripción detallada de una columna “tipo” para el Sector Central de la cuenca del Ebro, zona que se considera con las mayores posibilidades de cara al almacenamiento profundo de CO₂.

RIOJA 1

Los sondeos denominados Rioja se sitúan en el extremo más occidental de la cuenca del Ebro, sector que conecta con la cuenca del Duero a través del corredor de La Bureba. El sondeo Rioja-1 se sitúa en el bloque hundido del anticlinal fallado de Alesanco, que se encuentra afectado por una importante falla inversa que lo compartimenta. Por el contrario, el sondeo Rioja-2 se sitúa en el bloque levantado.

Las formaciones litológicas atravesadas en el sondeo Rioja-1 se resumen en la Figura 8 y Tabla 2 y comprenden rocas del Cretácico Inferior y Superior (Cenomanense-Turonense) y Terciario, conformando una secuencia arenosa y arcillosa del Cretácico Inferior, con presencia de rocas carbonáticas en el Cretácico Superior. Los materiales Terciarios son fundamentalmente arcillas y areniscas.

Edad	Facies	Carácter	Techo	Potencia	Descripción
Terciario	Nájera	Arcilloso	0	3378	Arcillas y arenisca con nódulos de anhidrita
Turonense Inf	-	Carbonatado	3378	22	Calizas
Cenomanense	-	Carbonatado	3400	50	Calizas con pasadas de arcillas y limolitas
Cretácico Inferior	-	Arcilloso	3450	26	Arcillas limolíticas con carbón y pirita e intercalaciones de arenisca
	Utrillas	Arenoso	3475	174	Areniscas de grano medio
	Weald	Arcilloso	3650	130	Arcilla carbonosa
		Arenoso	3780	445	Arenisca cuarcítica de grano fino a medio
		Arcilloso	4225	45	Arcilla negra tectonizada
	Arenoso	4270	>163	Arenisca de grano fino	

Tabla 2 .- Unidades litoestratigráficas diferenciadas en el sondeo Rioja-1.

El sondeo Rioja-1 fue ubicado sobre el perfil sísmico RI-10, y del calado entre este perfil sísmico y el propio sondeo se deducen los reflectores recogidos en la Tabla 3.

La estanqueidad del sondeo Rioja-1 es cuestionable ya que, según el informe de la compañía de exploración, a la falla que afecta al anticlinal de Alesanco. Esta falla parece estar sellada por arcillas terciarias en el bloque levantado pero no en el bloque hundido.

Dada la potencia de los materiales terciarios (3378 m) no se procede a la descripción más detallada del sondeo, ya que las profundidades para posibles almacenes y sellos están fuera de los objetivos perseguidos en este trabajo.

Además, el sondeo Rioja-1 demuestra que los niveles mesozoicos atravesados carecen prácticamente de porosidad, lo que es debido a los procesos diagenéticos responsables de la formación de cementos silíceos, por presión-disolución-precipitación.

La tónica general del sondeo Rioja-1 es la falta de almacenes, y si hubiera alguna posibilidad se encontraría siempre por debajo de los 3335 m, es decir por debajo del Terciario continental en donde se encuentra una serie cretácica que incluye al Turonense Inferior y Cenomanense, ambos carbonatados, y las formaciones Utrillas y Weal de carácter de transición y netamente continental, respectivamente.

Marcador	Profundidad (m)	Profundidad N.M (m)	Tiempo Doble milisegundos	Edad
A	952	334.16	592	Terciario
B	1547	929.16	890	Terciario
C	1815	1197.16	1012	Terciario
D	3108	2490.16	1532	Terciario
E	3376	2758.16	1646	Techo carbonatos Cretácico Superior
F	3476	2858.16	1680	Techo Areniscas Utrillas
G	3650	3032.16	1749.8	Base Areniscas Utrillas
H	4270	3652.16	1986	Base Intercalación arcillosa

Tabla 3.- Reflectores identificados en el perfil sísmico R1-10 correlacionados con el sondeo Rioja-1.

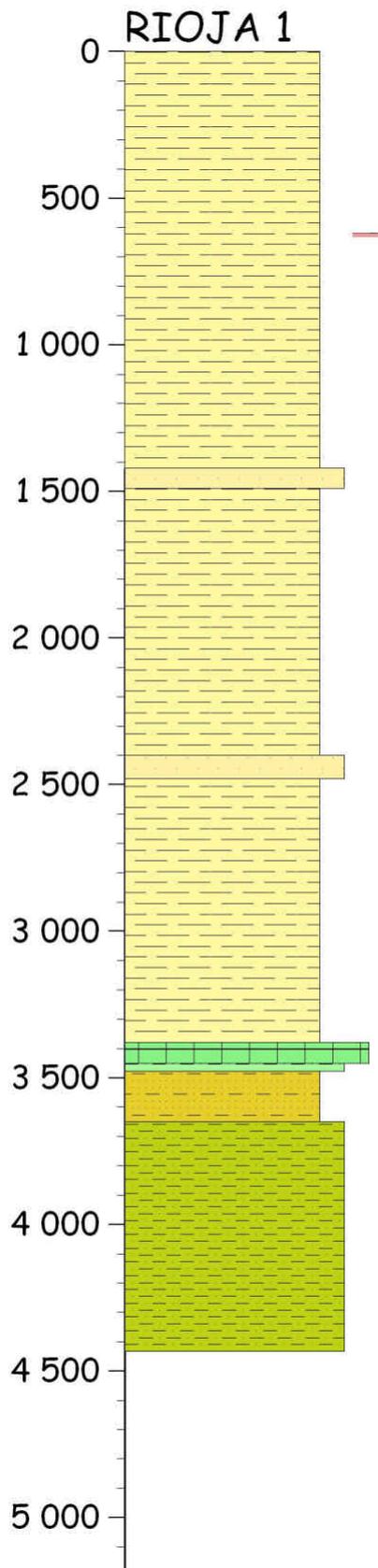


Figura 8.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Rioja-1 (— Nivel del Mar).

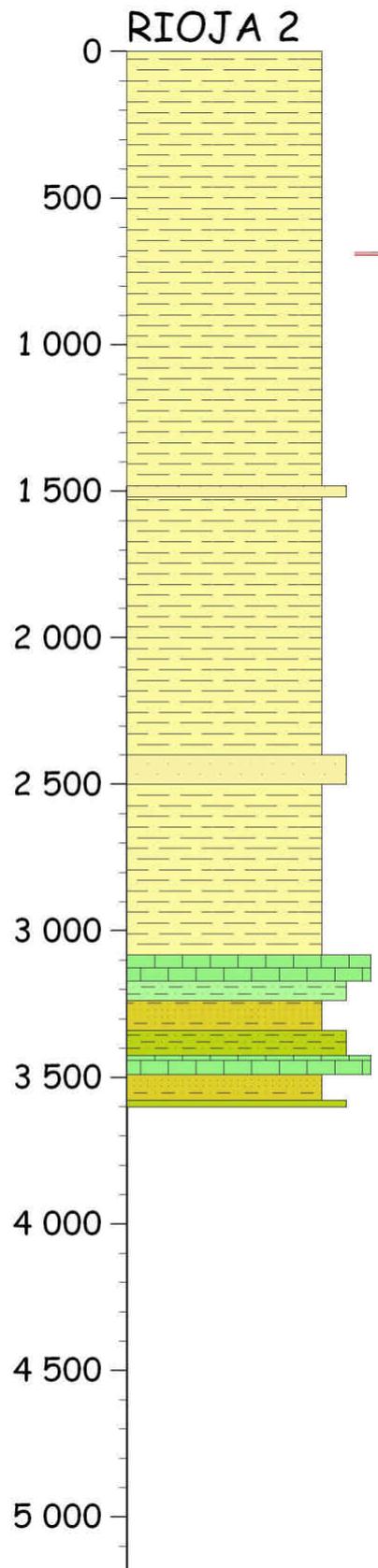


Figura 9.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Rioja-2 (— Nivel del Mar).

RIOJA 2

La columna litológica del sondeo Rioja-2 (Figura 9), presenta un potente tramo de materiales Terciarios (0-3082.5 m) dividido en 10 niveles, que no se describen pormenorizadamente en este informe. Consisten fundamentalmente en una alternancia de areniscas y arcillas con algunas pasadas de caliza, por ejemplo hacia los 460 m, y microconglomerados a 1200 m y en la base, entre los metros 3051 y 3066.

Por debajo de la discordancia basal terciaria se encuentra la serie mesozoica constituida por cuatro tramos. El primero está formado por una caliza gris claro a oscura, muy fracturada, en parte arcillosa, de dureza alta-media. Un segundo tramo constituido por arcilla negra-gris verdosa, tectonizada, con intercalaciones de areniscas y arcillas. El tercer tramo está constituido por areniscas rojizas con matriz arcillosa, de grano fino, bien clasificadas y, por último, el tramo final esta constituido por areniscas de grano fino bien clasificadas, con intercalaciones de arcilla roja. Esta serie mesozoica se encuentra duplicada por la presencia de una falla inversa (Figura 9).

Hacia los 3420 m de profundidad, existe una falla de envergadura que invierte las direcciones de máximo buzamiento. Por encima y por debajo de este supuesto plano de falla se observa un aumento constante del buzamiento con la profundidad y se observa igualmente un aumento de densidad de fracturas por debajo del mismo.

Estructuralmente, el sondeo Rioja-2 se encuentra ubicado en el bloque levantado del anticlinal fallado de Alesanco, sobre el perfil sísmico RI-33. Del calado entre este perfil sísmico y el propio sondeo se deducen los reflectores que se recogen en la Tabla 4.

Marcador	Profundidad (m) Profundidad en la columna litológica	Profundidad N.M (m)	Tiempo Doble milisegundos	Atribución/Edad BL=Bloque levantado BH= Bloque hundido
1	3090 (3082.5)	2411	1485	Techo carbonatos Turonense (BL)
2	3211 (3238.3)	2531	1530	Techo Utrillas (BL)
3	3332 (3340.5)	2652	1580	Base Utrillas (BL)
1'	3479 (3490.0)	2799	1640	Techo Utrillas (BH)
2'	3584 (3575.5)	2905	1680	Base Utrillas (BH)

Tabla 4.- Reflectores identificados en el perfil sísmico R1-33 correlacionados con el sondeo Rioja -2.

RIOJA 3

En el sondeo Rioja-3 (Figura 10), se alcanza la base del Terciario a una profundidad de 5120 m y se apoya directamente sobre el basamento Paleozoico. El Terciario de carácter continental tiene características similares al ya descrito pero con mayor espesor. El hecho de que el Terciario se apoye directamente sobre el Paleozoico, se describe en los informes de exploración, como una tendencia que se extiende de forma regional y produjo en su momento el cese de la investigación para hidrocarburos en la zona.

RIOJA 4

El sondeo Rioja-4 (Figura 10), se sitúa sobre una estructura anticlinal de eje E-O, definida en los sondeos previos y cuyo flanco norte está afectado por una falla inversa. Litológicamente no difiere de los sondeos Rioja- 1 y Rioja- 2, alcanzando la base del Terciario a una profundidad de unos 3850 m. Éste descansa en discordancia sobre un tramo que, por comparación con los sondeos mencionados, debe estar constituido por areniscas rojizas con cemento arcilloso, de grano fino, bien clasificadas y por un tramo de areniscas de grano fino, bien clasificadas con intercalaciones de arcilla roja.

RIOJA 5

El sondeo Rioja- 5, cuya columna no incluimos, ha atravesado una serie de sedimentos terciarios de carácter continental, hasta una profundidad de 3386 m. Por debajo existen arcillas con niveles de arenisca del Garum, hasta los 3665 m. Hasta el final del sondeo (4437.2 m) existen arcillas y areniscas, con capas de carbón, atribuidas al Cretácico Inferior.

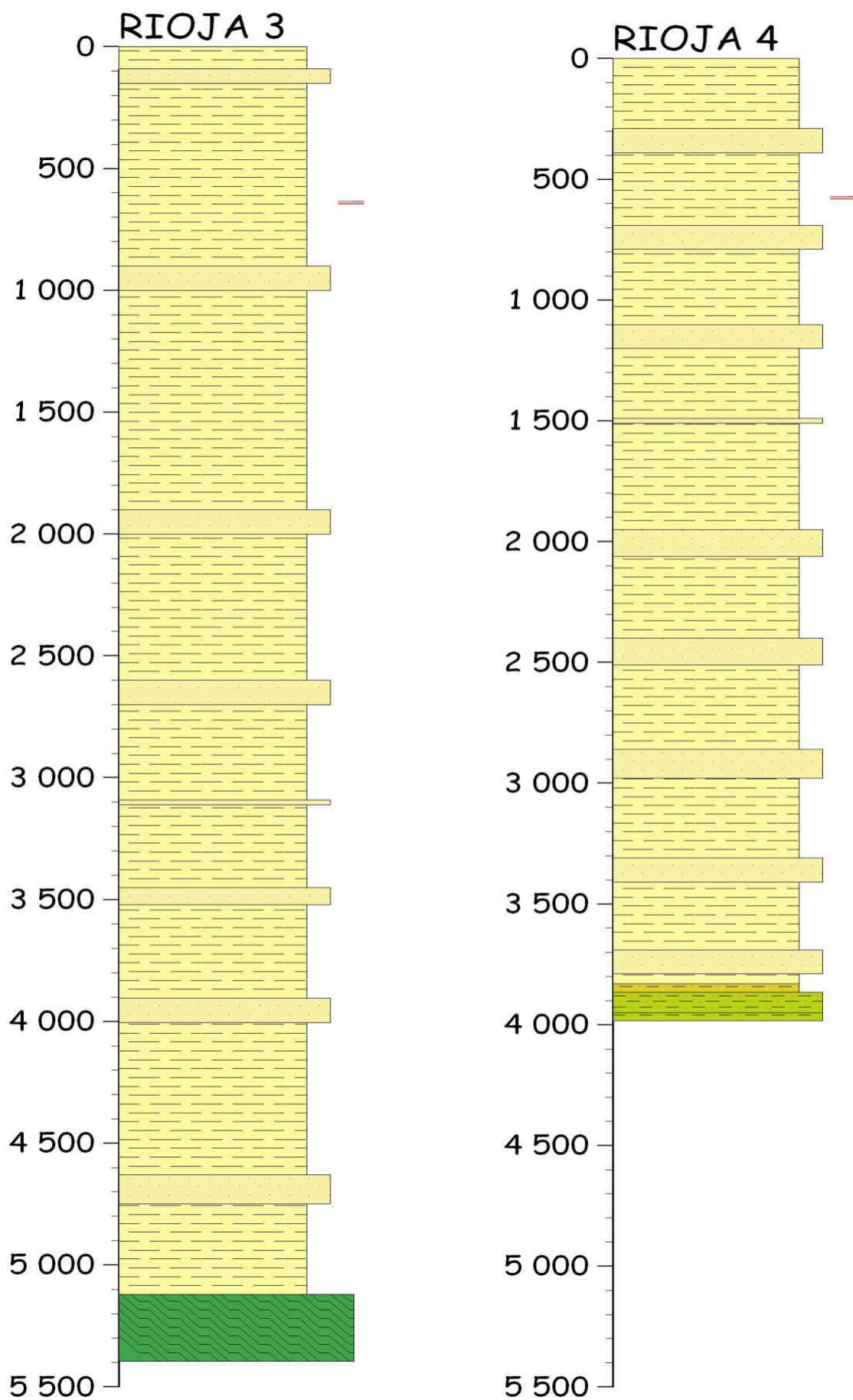


Figura 10. - Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Rioja- 3 y Rioja- 4 (— NM.).

ARNEDO

Del sondeo Arnedo-1 se dispone únicamente de la columna litológica. Según ésta (Figura 11) y de su correlación con los sondeos Magallón-1, La Zaida-1 y Caspe-1 (véase correlación 4 en la Figura 43) se puede describir de la siguiente forma:

El Terciario (0-834 m) está formado por un primer tramo de areniscas y conglomerados hasta los 80 m de profundidad, al que le sigue un potente tramo de arcillas y limolitas hasta los 571 m. A continuación y hasta la discordancia basal terciaria situada a 834 m, la serie está compuesta por arenisca conglomerática con pasadas de arcilla. Este terciario podría constituir un sello de carácter dudoso pero potente.

La serie mesozoica se encuentra bastante adelgazada. El Jurásico está compuesto por calizas oolíticas y calcilutitas entre los 834 y 960 m de profundidad y por dolomías del Infralías, entre los 960 y 1045 m. Ambos tramos podrían constituir un posible almacén. Por debajo aparece el Keuper entre los metros 1045 y 1113 en facies anhidríticas y arcillosas y el Muschelkalk que está únicamente representado por las dolomías de la base entre 1113 y 1178 m. El Keuper podría constituir un posible sello para las dolomías del Muschelkalk.

En el Buntsandstein se diferencian dos tramos: uno superior que podría constituir un sello, formado por una alternancia de areniscas y arcillas (1178-1326 m), y otro inferior (1326-1508 m), constituido por arenisca conglomerática de matriz arcillosa que podría ser evaluado como posible almacén. Estos dos tramos tienen un mayor desarrollo en comparación con el resto de la serie.

La discordancia que da paso a los materiales Paleozoicos se sitúa en este sondeo a 1508 m de

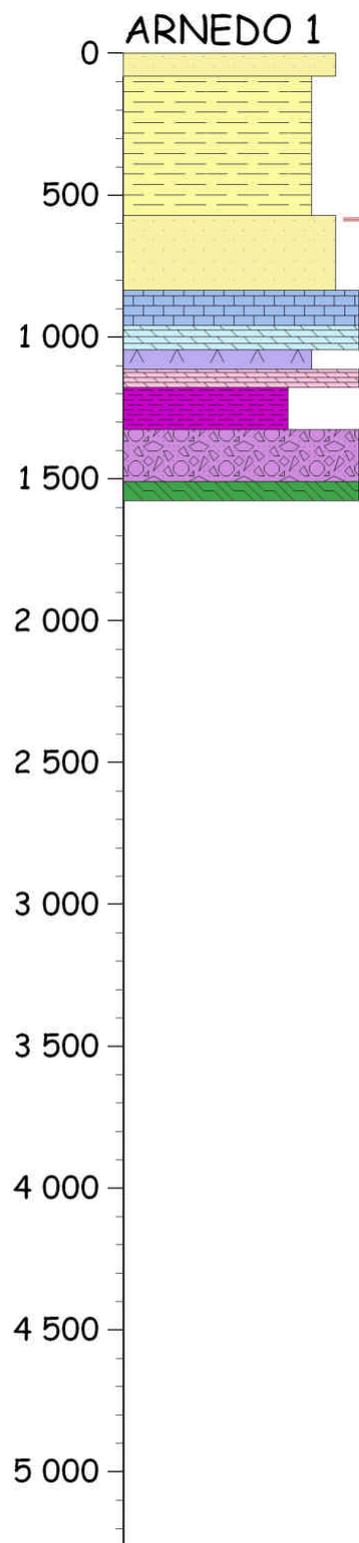
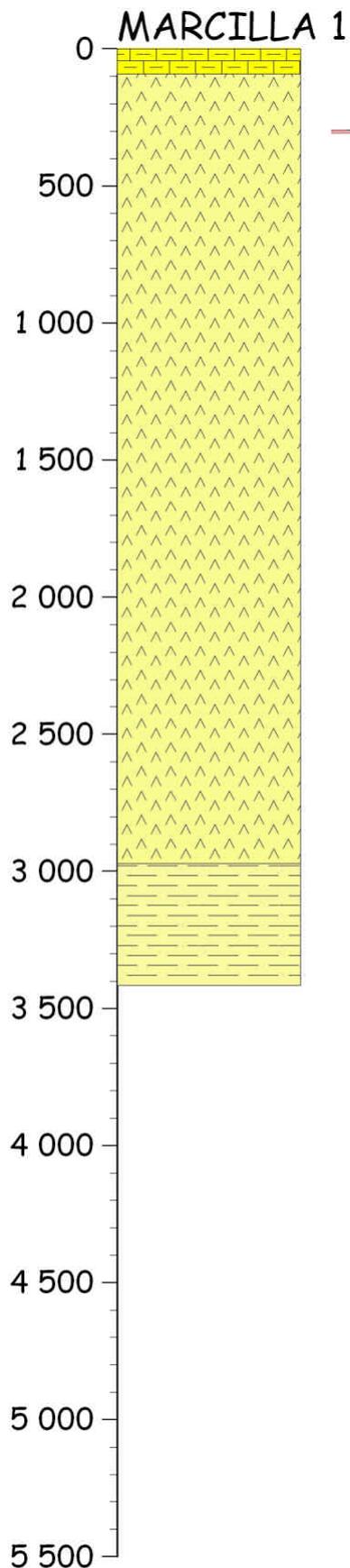


Figura 11.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Arnedo-1 (— Nivel del Mar).

profundidad.

MARCILLA 1



El sondeo Marcilla-1 (Figura 12), no se describe — dado el poco interés que presenta de cara al trabajo que nos ocupa. Todo él se encuentra perforado en materiales terciarios constituidos por calizas, yesos y arcillas que alcanzan al menos una profundidad de 3400 m.

Figura 12. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Marcilla -1 (— Nivel del Mar).

BALLOBAR 1

El sondeo Ballobar-1 se realizó con el objetivo de reconocer la serie terciaria y mesozoica.

Bajo las formaciones lacustres del Terciario continental de aproximadamente 1100 m de potencia el sondeo alcanzó a 1094 m de profundidad el Cretácico Inferior. Es poco potente, de unos 150 m de espesor. A una profundidad de 1249 m el sondeo cortó al Jurásico con unos 500 m de espesor y a 1765 m de profundidad interceptó al Triásico, bien desarrollado, con una potencia de unos 1000 m. Finalmente, a 2706 m de profundidad cortó al Paleozoico tectonizado del Devónico Medio. El sondeo alcanzó una profundidad total de 3450 m.

La serie presenta buenas condiciones para encontrar formaciones almacén y sello. Por ejemplo, el infralías muestra, bajo el sello anhidrítico, una formación dolomítica porosa (hasta un 15-18% de porosidad) de unos 60 m de potencia. Sin embargo, esta formación puede presentar acuñamientos bajo la discordancia Cretácico-Jurásico. Esta formación dolomítica da 3400 litros de agua salada (260g/L) en 50 minutos y una presión próxima a la hidrostática (136 kg/cm² a 1453 m). Desde un punto de vista litológico, la formación puede dividirse en dos tramos. Entre 1420 y 1431 m es una caliza oolítica dolomitizada con porosidad intergranular, y entre 1431 y 1480 m es una dolomía brechoide de grandes poros “no unidos” según especifica el informe del sondeo. La porosidad observada en el testigo del sondeo (6-10%) se considera una porosidad “no útil”, sin embargo la porosidad

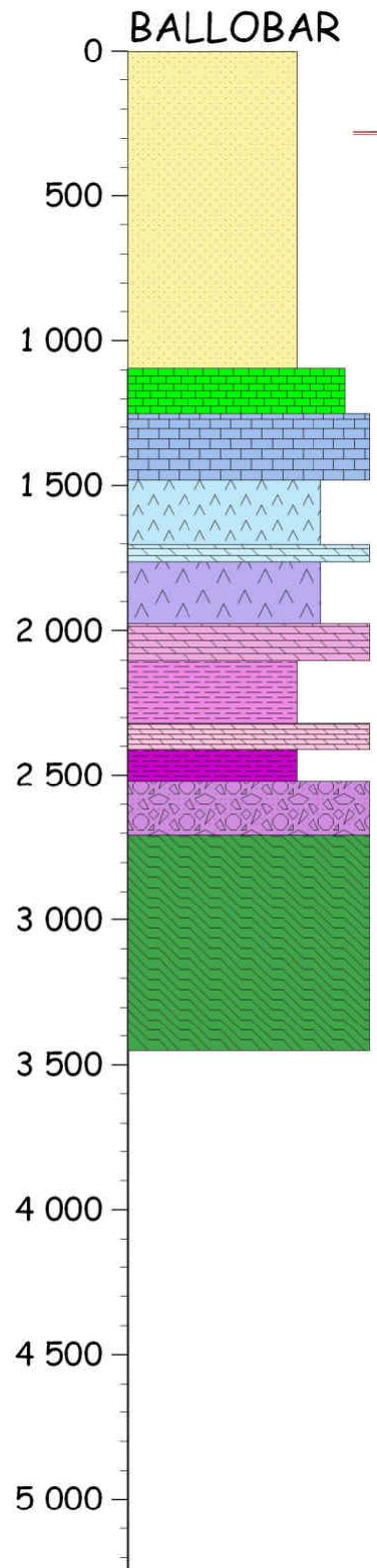


Figura 13.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Ballobar -1 (— Nivel del Mar).

intragranular de las calizas del techo de la formación asegura una porosidad útil a los 11 m de potencia.

El Muschelkalk presenta dos niveles de dolomías (M1 y M3). La dolomía superior M3, muy rica en inclusiones y nódulos de anhidrita, no mostró más que una débil porosidad en los testigos de los sondeos y en las diagráfias, por lo que no se realizó ningún *test*. La dolomía inferior M1, muy anhidrítica también, presenta porosidades débiles entre un 2 y un 4%, con algunas zonas más porosas según las diagráfias.

El Buntsandstein presenta tres sellos posibles: el Keuper, el Muschelkalk-M2 y el Buntsandstein arcilloso, con una potencia total de 330 m. Muestra un tramo arcilloso a techo de aproximadamente 160 m de potencia y un potente tramo almacén de unos 194 m, constituido por areniscas y conglomerados, que puede mostrar importantes variaciones laterales de espesor y porosidad. En este tramo almacén se pueden diferenciar cuatro zonas:

- Entre 2512-2563 m (51 m) – formada por arenisca fina porosa (10-12%). Un *test* efectuado en el techo de esta formación ha dado 10880 litros en 60 minutos de agua salada a presión hidrostática (255 kg/cm² a 2542 m).
- Entre 2563-2599 m (36 m) – formada por arenisca de grano medio muy porosa (14-19%).
- Entre 2599-2632 m (33 m) – formada por arenisca conglomerática con intercalaciones de conglomerado medianamente poroso (10-12%).
- Entre 2632-2706 m (74 m) – formada por conglomerado con intercalaciones arcillosas, poco porosas (3-7%).

Finalmente, el Paleozoico comienza a 2706 m de profundidad con las facies flysch del Devónico Medio y continúa con areniscas masivas y compactas. El sondeo alcanzó una profundidad total de 3450 m.

El Buntsandstein se encuentra poco desarrollado hasta el final del sondeo. Muestra un tramo más arcilloso a techo, entre 2734 y 2757 m, y un tramo arenoso-conglomerático, entre 2757 m y el final del sondeo a 2825 m de profundidad. Como se describe en el informe geológico del sondeo, este último nivel puede mostrar importantes variaciones laterales de espesor y porosidad.

CANDASNOS 1

El sondeo Candasnos-1 (Figura 15) se realizó con el objetivo de alcanzar el Infralías.

El sondeo cortó, hasta los 967 m, Terciario continental con un predominio de calizas arcillosas. Por debajo de la discordancia Terciario-Cretácico, que se manifiesta por el carácter ferruginoso de los primeros metros, se encuentra el Cretácico Medio-Superior. Está formado por dos pequeños conjuntos calizos: calizas con Orbitolinas (1003-1045 m) y calizas algo arcillosas (1045-1064 m). En la columna estratigráfica simplificada (Figura 15) no se diferencian estos dos tramos.

El Jurásico Superior (Mam) no aparece y el Cretácico se apoya directamente sobre el Dogger que está constituido principalmente por calizas y calizas arcillosas. Por debajo, el Lías se corta a partir del metro 1150 hasta el metro 1303, aunque dividido en varios tramos. Comienza con un tramo margoso (1150-1160 m) al que le siguen calizas compactas (1160-1215 m) y dolomías, a veces porosas y brechas (1215-1303 m). El Dogger y Lías aparecen como un único paquete en la columna estratigráfica sintética.

El Infralías está constituido por una zona con anhidrita a techo, con intercalaciones de dolomía entre 1303 y 1496 m, y un tramo inferior dolomítico poroso entre 1496 y 1546 m.

El Keuper se corta al final del sondeo entre los metros 1546 y 1550 y está representado por anhidritas cristalinas con intercalaciones de arcilla negra endurecida.

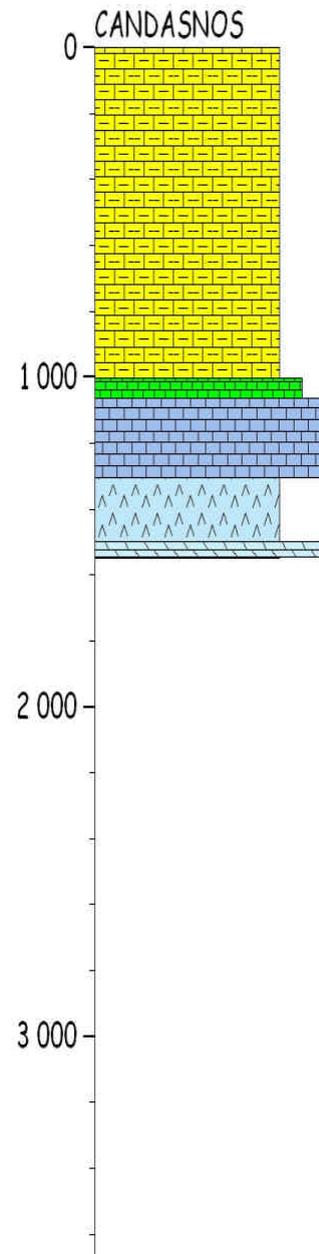


Figura 15. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Candasnos-1
(— Nivel del Mar).

Formación	Lías	Infralías
Continuidad	Disc.	Cont.
Litología	Dolomía	Dolomía
Límites (m)	1215-1303	1496-1546
Potencia (m)	44	50
Porosidad (%)	7-15	4-15
Presión (kg/cm ²)	118 a 1243 m	151 a 1522 m
Caudal (l/min)	10.2	66.9
Indicios		Gas
Salinidad (gr/l)		254
Temperatura (°C)	59	70

Tabla 5.- Resumen de los posibles almacenes y sus características intersectados en el sondeo Candanos-1.

Los dos posibles almacenes y sus características se resumen en la Tabla 5. Los almacenes identificados en el Lías e Infralías poseen excelentes sellos que son: las margas del Terciario, y la zona de anhidrita y margas del Dogger y Lías.

CASPE 1

El sondeo Caspe-1 (figura 16) tuvo como objetivo el Mesozoico y está situado en una estructura anticlinal definida por geología y comprobada por sísmica.

Tiene una profundidad total de 1800 m y en él se cortaron las series terciaria y mesozoica, terminando en una potente serie limolítico-areniscosa del Paleozoico.

Entre los metros 0 y 148 se cortó un tramo calcáreo arenoso constituido por alternancias de calizas arenosas y arcillosas con intercalaciones de margas y anhidritas de edad neógena. Por debajo, existe un tramo margoso evaporítico (148-277 m) formado por margas con intercalaciones de anhidrita y ocasionales intercalaciones de calizas, también de edad neógena.

La discordancia de la base del Terciario (277 m) da paso directamente a los materiales del Muschelkalk, que está dividido en tres tramos. El primero, de 87 m de potencia, entre 277 y 364 m de profundidad, es un tramo calcáreo. El segundo de 93 m de potencia, entre 364 y 457 m, está constituido a techo por arcillas abigarradas y anhidrita, predominando hacia la base, arcillas plásticas con intercalaciones de anhidrita. El último, de 104 m de potencia, entre 457 y 561 m de profundidad, está constituido por dolomías microcristalinas y calizas en la base.

El Buntsandstein, con 599 m de potencia total, presenta, a techo, un tramo arcilloso (561-705 m) y un tramo arenoso-conglomerático en la base de gran potencia (705-1160 m). Este tramo posee unas condiciones interesantes para constituir un “almacén”, aunque la profundidad es escasa en relación con los requerimientos exigidos. La escasa profundidad del Mesozoico en relación a sondeos próximos, por ejemplo La Zaida-1, está controlada por la dinámica de

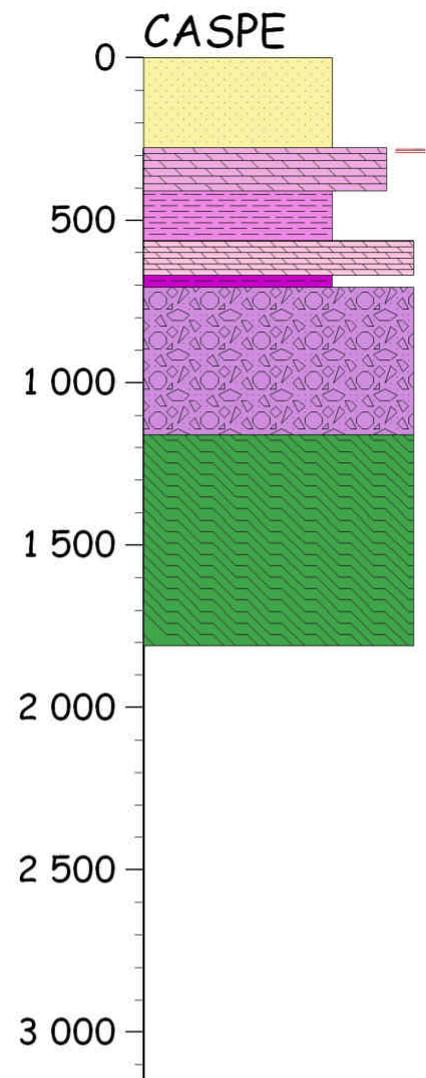


Figura 16.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Caspe-1 (— Nivel del Mar).

la Falla de Lérida o del Segre, de dirección NNE-SSO, la cual separa un bloque oriental levantado con respecto al bloque occidental.

El sondeo termina con una potente serie paleozoica (1160-1810 m) compuesta por areniscas calcáreas con intercalaciones de limolitas y arcillas que se han atribuido a la Formación Areniscas de Maella, probablemente devónica. A partir de los 1678 m predominan los limos y las arcillas sobre las areniscas.

EBRO 1 y EBRO 2

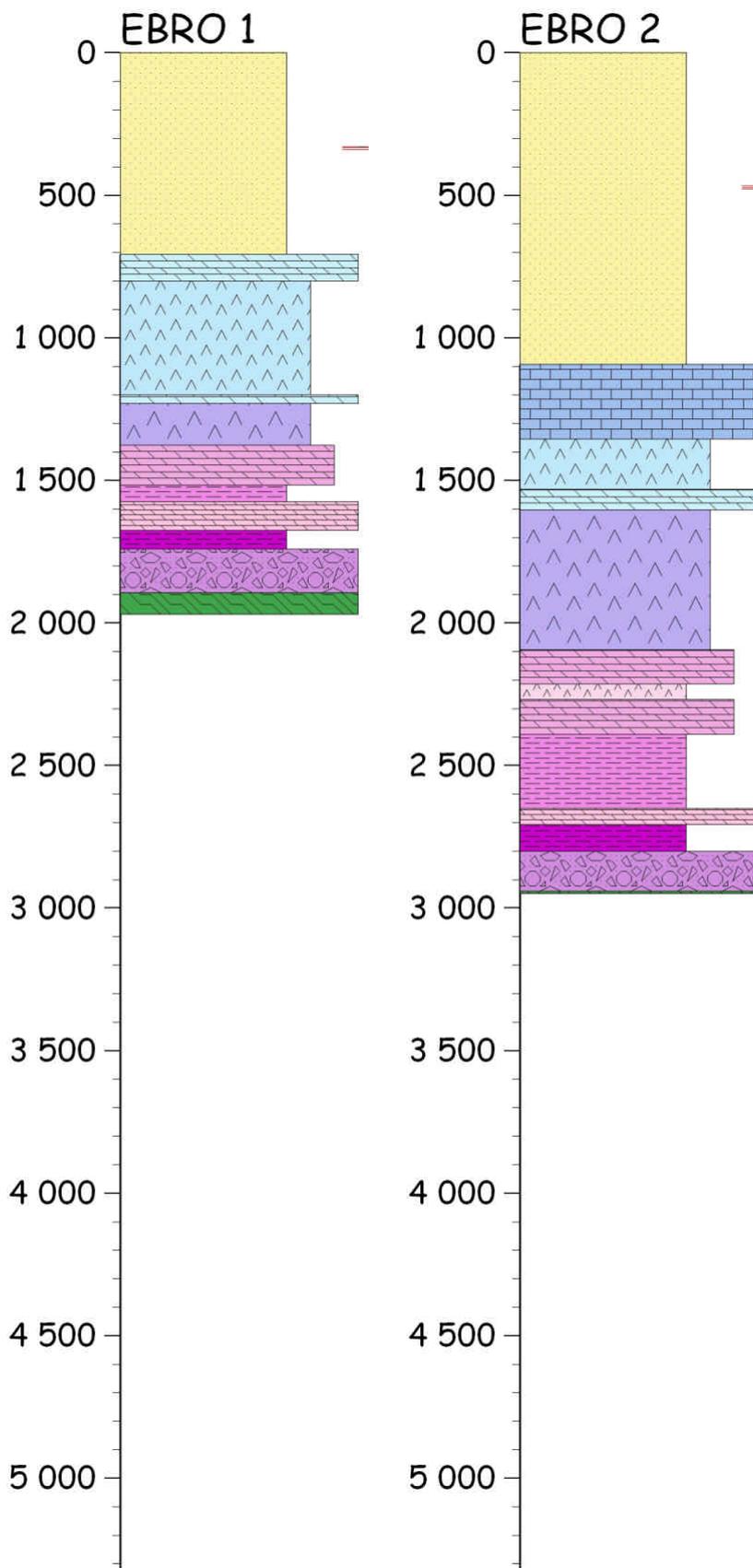


Figura 17.- Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Ebro-1 y 2 (— Nivel del Mar).

Los sondeos Ebro-1 y 2 (Figura 17) comienzan con un Terciario de carácter continental de 700 y 1100 m de potencia respectivamente. Este Terciario está constituido por arcillas calizas y yesos.

En el sondeo Ebro-1 se diferencian cinco tramos, de techo a muro compuestos por arcillas con delgadas intercalaciones de yeso, calizas arcillosas y arcillas, y arcillas, dolomías y anhidrita.

De la misma forma, en el Ebro-2 se diferencian seis tramos dentro de los materiales Terciarios entre 0 y 1093 m de profundidad que básicamente corresponden a una alternancia de calizas, margas, arcillas y, en ocasiones, yeso y anhidrita.

La discordancia de la base del Terciario se sitúa a 705 m en el Ebro-1 y a 1093 m en el Ebro-2.

Por debajo de esta discordancia aparece en el sondeo Ebro-1 el Retiense,

mientras que en el Ebro-2 aparece el Jurásico inferior (Lias) .

En el sondeo Ebro-2, el Lias presenta dos tramos diferenciados, uno superior (1093-1175 m) de calizas compactas y duras, y otro inferior (1175-1355 m) constituido por dolomías. Por debajo, el Retiense presenta igualmente dos tramos diferenciados: uno superior de carácter evaporítico con anhidrita y dolomías (1355-1543 m) y otro inferior formado por dolomías y calizas dolomíticas (1543-1603 m).

El sondeo Ebro-1 cortó al Retiense directamente bajo la discordancia basal terciaria, a unas profundidades comprendidas entre 705 y 1256 m, y está formado principalmente por dolomías, anhidrita y arcilla. En este sondeo el Retiense está dividido en cuatro tramos:

- R1 – Dolomítico – 705-860 m – dolomía anhidrita y arcilla.
- R2 – Anhidrítico – 860-1188 m – anhidrita dolomía y arcilla.
- R3 – Dolomítico – 1188-1240 m – dolomía y anhidrita.
- R4 – Anhidrítico – 1240-1256 m – anhidrita y arcilla.

Por debajo en el sondeo Ebro-1 el Keuper se alcanza en a 1256 m y en el Ebro-2 a 1603 m de profundidad. En ambos sondeos, el Keuper presenta un tramo superior más arcilloso y un tramo inferior netamente yesífero. La profundidad que alcanza el muro en casa sondeo es de 1376 y 2094 m respectivamente.

El Muschelkalk, de carácter dolomítico y anhidrítico, presenta tres tramos diferenciados en ambos sondeos, aunque los dos superiores en el Ebro-2 aparecen duplicados por la existencia de una falla inversa a 2270 m. Estos tramos son, de menor a mayor profundidad (Tabla 6):

Ebro-1	Tramo	Prof. (m)	Ebro-2	Tramo	Prof. (m)
			M3	Dolomítico	2094-2214
			M2	Evaporítico	2214-2269
M3	Dolomítico	1376-1516	M3	Dolomítico	2269-2390
M2	Evaporítico	1516-1575	M2	Evaporítico	2390-2626
M1	Dolomítico	1575-1674	M1	Dolomítico	2626-2707

Tabla 6.- Correlación de los tramos del Muschelkalk en los sondeos Ebro-1 y Ebro-2

Finalmente, la serie mesozoica termina con los materiales del Buntsandstein en cuyas facies (Tabla 7) dominan las areniscas y los conglomerados, aunque también aparecen tramos arcillosos. En el sondeo Ebro-1 se han reconocido tres tramos, mientras que en el Ebro-2 se han reconocido cuatro (Tabla 7):

Ebro-1	Tramo	Prof. (m)	Ebro-2	Tramo	Prof. (m)
-	-	-	B4	Evaporítico	2727-2734
B3	Arcilloso	1674-1760	B3	Arcilloso	2734-2805
B2	Detrítico	1760-1875	B2	Detrítico	2805-2924
B1	Conglomerático	1875-1893	B1	Conglomerático	2924-2940

Tabla 7.- Correlación de tramos del Buntsandstein entre los sondeos Ebro-1 y Ebro-2.

El sondeo Ebro-1 cortó al Paleozoico a 1893 m, mientras que el sondeo Ebro-2 lo cortó a 2940 m. Estos materiales paleozoicos están constituidos en ambos sondeos por arcillas, limolitas y areniscas.

En cuanto a la posición estructural, el sondeo Ebro-2 está ubicado en el ápice del anticlinal “Sena” y en la traza 280 del perfil sísmico BU-7. Por su parte, el sondeo Ebro-1 está ubicado en la traza 130 del perfil sísmico CII-6 sobre un anticlinal que se encuentra fallado por su flanco sur. El estudio estructural del sondeo Ebro-1, a partir de las diagráfias eléctricas, permite deducir la existencia de una falla inversa a una profundidad de 2270 m, con un salto superior a los 260 m, que produce una repetición de la serie dolomítica del Muschelkalk superior.

Del análisis de la columna litológica de ambos sondeos, así como de los logs eléctricos y de velocidad de penetración, se deduce la existencia, dentro de los almacenes posibles, de unos tramos especialmente preferentes que se recogen, junto con su profundidad, porosidad y permeabilidad, en las Tablas 8 y 9.

SONDEO EBRO 1						
Intervalo (m)	Pot. m	Litología	Edad	Tramo	Porosidad (%)	Permeabil.
706-752	46	Dolomías	Retiense	R1	14	-
827-864	37	Dolomías	Retiense	R1	8	Muy baja
1190-1237	47	Dolomías	Retiense	R3	5	-
1425-1487	62	Dolomías	Muschelkalk	M1	7	-
1741-1785	44	Areniscas	Buntsandstein	B2	12	Muy baja

Tabla 8.- Resumen de posibles niveles almacén en el Sondeo Ebro-1 reflejados en la investigación realizada en exploración de hidrocarburos (se conserva la notación de los tramos de dicha investigación).

SONDEO EBRO 2							
Intervalo (m)	Pot. (m)	Litología	Edad	Tramo	Porosidad (%)		Permeab.
					Media	Máx.	
1127-1159	32	Calcáreo	Lias	L2	16.9	19	Alta
1551-1600	49	Dolomítico	Rético	R1	15.9	18	Alta
2098-2110	12	Dolomítico	Muschel	M3	19.2	23	Alta
2121-2125	4	Dolomítico	Muschel	M3	11.0	22	Media
2132-2137	5	Dolomítico	Muschel	M3	14.8	18	Media
2144-2166	22	Dolomítico	Muschel	M3	15.8	19	M-Alta
2870-2950	80	Arenoso	Bunt	B1-2	5.5	9	Media

Tabla 9.- Resumen de posibles niveles almacén en el Sondeo Ebro-2 reflejados en la investigación realizada en exploración de hidrocarburos (se conserva la notación de los tramos de dicha investigación).

El tramo L2 sólo se corta en el sondeo Ebro-2 (Tabla 10), y presenta una litología calcárea y una porosidad media del 16.9%, con valores máximos del 19%.

En el sondeo Ebro-1, el intervalo 706-752 m es un almacén de litología carbonatada con una porosidad del 14.67%, en el que existe algún tramo (734.8-735.5 m) en el que se alcanza un valor de un 29.5%. El intervalo 827-864 m está constituido por dolomías y calizas dolomíticas con una porosidad del 7.76%, la zona más porosa alcanza el 15.7%. La permeabilidad, de acuerdo con la sonda Microlog, es muy baja. Estos dos tramos en el Ebro-1 se correlacionan con el nivel 1551-1600 m del Ebro-2, el cual presenta una porosidad media del 16% y una permeabilidad alta.

De manera análoga a los anteriores, el tramo R3 del sondeo Ebro-1, situado entre 1190 y 1237 m de profundidad, es dolomítico con alguna intercalación anhídrica. La porosidad media es de un 4.96% aunque en algún punto puede sobrepasar el 14%. Se encuentra saturado en agua.

El cuarto tramo M1 del sondeo Ebro-1 está formado por dolomías y calizas con una porosidad primaria del 7.30%. Sin embargo se constató la presencia de porosidad secundaria mediante la sonda sónica. La mayoría de las zonas en este tramo dan una saturación del 100%.

En el sondeo Ebro-2 se diferencian varios tramos dolomíticos en el Muschelkalk (M3) con diferentes espesores, y porosidades comprendidas entre 11 y 19% con algunos valores máximos del orden de un 23%.

Finalmente, el último intervalo (B2 en Ebro-1; 1741-1785 m y B1-2 en Ebro-2; 2870-2950 m) presenta una litología fundamentalmente areniscosa, pero compleja. Está formada por areniscas, calizas arenosas, dolomías, calizas dolomíticas e incluso anhidritas. La porosidad media es del 12.11% llegando a alcanzar valores del 19% en el sondeo Ebro-1. En el sondeo Ebro-2 las porosidades máximas varían entre un 5.5% y un 9% de valor máximo en el Ebro-2. La permeabilidad es muy baja en el Ebro-1 y media en el Ebro-2.

EJEA 1

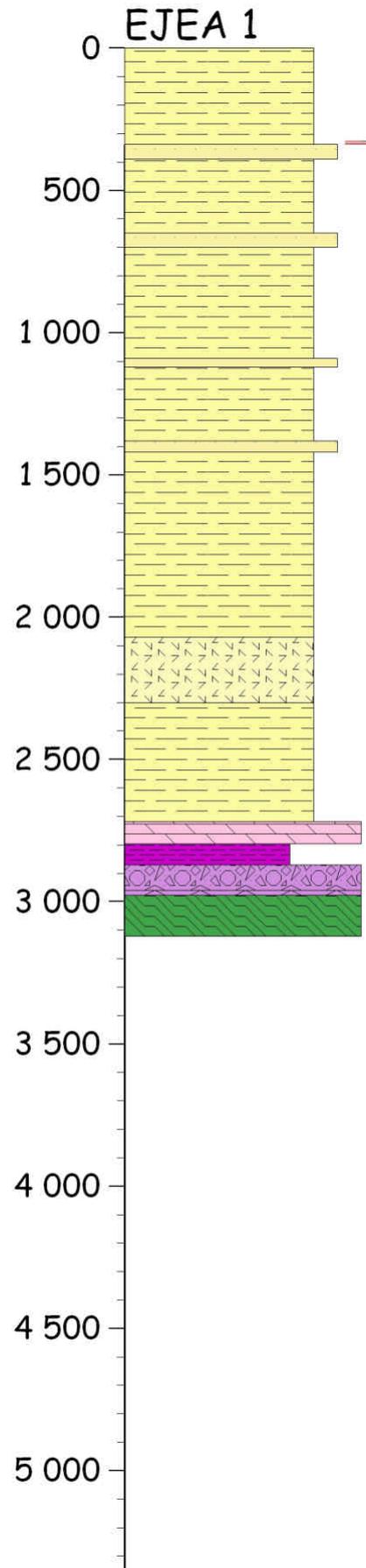
Del Sondeo Ejea-1 se dispone únicamente de la columna litológica (Figura 18) pero no de informes geológico y geofísico.

En este sondeo el Terciario alcanza una profundidad de 2718 m, y está constituido por una alternancia de arcillas, areniscas y yeso hasta el metro 2070, en donde aparece un tramo potente de unos 230 m de anhidrita, sal y arcilla. Por debajo de este paquete evaporítico, la serie consiste en una alternancia de limolitas, areniscas, arcillas y ocasionalmente calizas.

La discordancia terciaria se sitúa en este sondeo a 2718 m. Por debajo de ella aparecen directamente los materiales de la base del Muschelkalk (2718-2796 m), constituidos por un tramo dolomítico, que con toda probabilidad corresponde a M1.

El Buntsandstein (2796-3012 m) presenta dos tramos diferenciados, uno superior arcilloso y otro inferior de carácter conglomerático.

El techo del Paleozoico se alcanza a una profundidad de 3012 m y hasta el final del sondeo (3129 m) está constituido predominantemente por limolitas atribuidas al Carbonífero.



ESPLUS 1

Del Sondeo Esplús-1 se dispone de la columna litológica (Figura 19), pero no se dispone de ningún informe geológico ni geofísico. Este sondeo se encuentra situado entre los sondeos Monzón-1, Sariñena-1 y Lérica-1.

Hasta una profundidad de 1739 m se corta el Terciario, el cual es de carácter continental. Está constituido por intercalaciones de arcilla, areniscas y arenas. Hacia la base aparecen margas y en la discordancia basal con el Mesozoico se localiza un nivel de brechas.

Por debajo de la discordancia basal terciaria se encuentra el Dogger y el Lias (1739-1904 m), constituidos por calizas arcillosas, margocalizas y margas. Por debajo, el Infralías tiene un importante desarrollo (1904-2085 m) y está constituido por calizas brechoides y oolíticas, hacia el techo, y dolomías hacia la base.

A 2085 m de profundidad se corta el Keuper, constituido por margas y anhidrita hasta el final del sondeo a 2087 m.

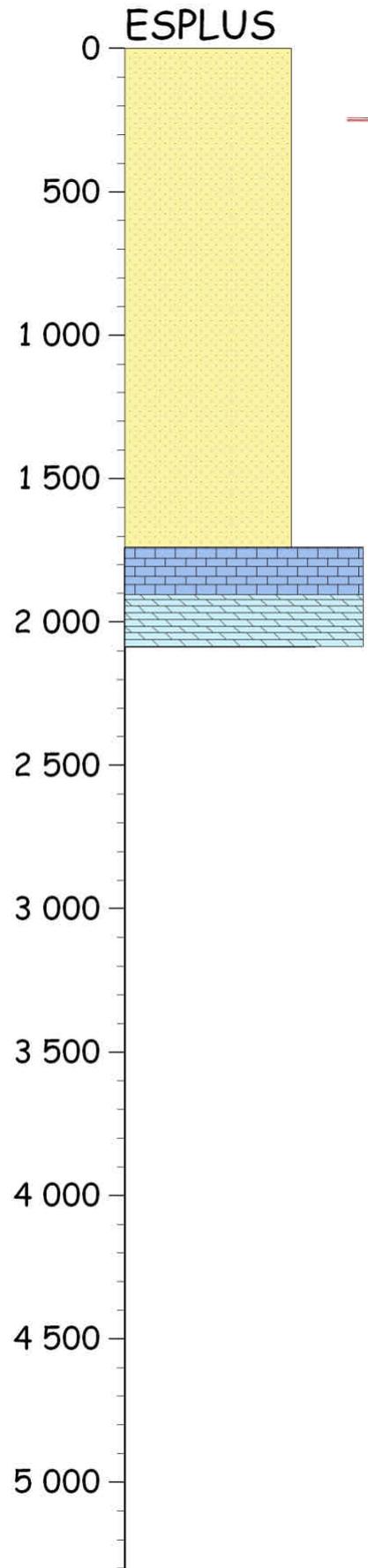


Figura 19.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Esplús-1 (— Nivel del Mar).

FRAGA 1

El sondeo Fraga-1 (Figura 20), está situado en uno de los sectores más interesantes de cara al almacenamiento. Corta a los mismos conjuntos litológicos descritos anteriormente en el sondeo Ballobar-1, exceptuando los depósitos correspondientes al Jurásico.

En primer lugar se encuentra el Terciario hasta una profundidad de 1095 m, el cual, está constituido por alternancias de calizas y margas. En la columna se ha representado una trama de Terciario indiferenciado ya que su estudio no constituye un objetivo de este trabajo. Por debajo de la discordancia basal terciaria se encuentra el Cretácico Superior, constituido por calizas y dolomías entre 1095 y 1211 m de profundidad. Según el informe del sondeo estos materiales se encuentran de forma discontinua, fisurados y con una porosidad del 3%. La temperatura medida en esta formación fue de 47°C a 1200 m de profundidad.

Según el informe del sondeo, el Cretácico Superior descansa directamente sobre el Keuper, interpretación que hemos respetado a la hora de representar la columna del sondeo. Sin embargo, a partir de la correlación con sondeos próximos, este nivel de carácter principalmente dolomítico, podría corresponder más bien con las dolomías basales del Retiense.

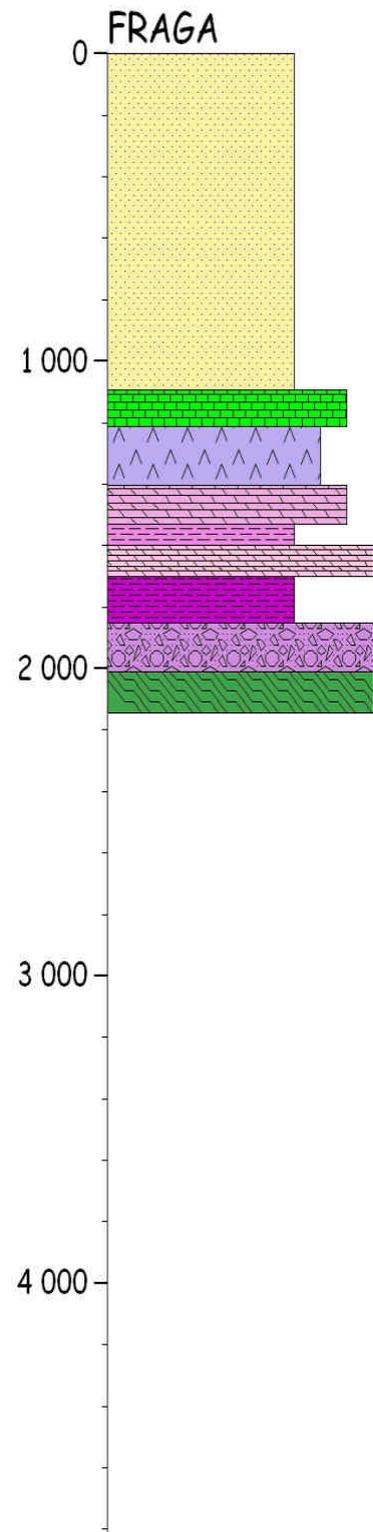


Figura 20. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Fraga-1 (— Nivel del Mar).

El Triásico de techo a muro está constituido por:

- Keuper - (1211-1405 m) – Arcilla y anhidrita.
- Muschelkalk - M3 (1405-1531 m)- Dolomías y calizas dolomíticas.
- Muschelkalk - M2 (1531-1599 m) - Arcilla y anhidritas.
- Muschelkalk - M1 (1599-1701 m) – Calizas y dolomías.
- Buntsandstein - B3 (1701-1722 m) - Anhidrita.
- Buntsandstein - B2 (1722-1758 m) – Arcilla roja.
- Buntsandstein - B1 (1758-2106 m) – Areniscas con intercalaciones de conglomerados.

El techo del Paleozoico se alcanza a una profundidad de 2106 m y hasta el final del sondeo (2143 m) está constituido por esquistos arcillosos y silt.

Las posibles rocas almacén están recogidas en la Tabla 10, así como sus características más destacables.

Formación	M3	M1	B1
Litología	Dolomía	Dolomía	Arenisca
Tipo	Discontinua y fisurada	Discontinua y fisurada	Continua
Potencia (m)	54	39	170
Porosidad (%)	4	7	7
Presión (kg/cm ²)	143 a 1501 m	154 a 1611 m	174 a 1805 m
Caudal (l/m)	222.15	390	153.5
Salinidad (g/l)	7	3.6	26
Temperatura °C	60° a 1500 m	65.5° a 1600 m	71° a 1800 m

Tabla 10.- Posibles almacenes identificados en el sondeo Fraga-1.

GELSA 1

El sondeo Gelsa-1 (Figura 21) se encuentra al norte del sondeo de La Zaida-1 (Figura 22), que se describe a continuación. Ambos sondeos se complementan ya que el primero no cortó a los materiales paleozoicos, mientras que el segundo sí.

En el Mioceno–Oligoceno se diferencian dos unidades, aunque en la columna del sondeo se indica con una trama de Terciario indiferenciado, por no ser objeto de estudio de este trabajo. La unidad superior (0-215 m) está constituida por margas abigarradas y la inferior (215-485 m) por calizas pardas alternando con margas abigarradas y yesos o anhidritas.

Por debajo de la discordancia terciaria se sitúa el Jurásico Superior, entre 485 y 1230 m de profundidad. Está constituido, de techo a muro, por calizas fértidas y calizas margosas, calizas grises. A muro se intercala un nivel de unos 25 m de potencia de margas micáceas.

El Jurásico Medio (Dogger), entre 1230 y 1336 m de profundidad, consiste en una sección relativamente homogénea de caliza microcristalina. El Jurásico Inferior (Lias), entre 1336 y 1430 m de profundidad, se compone de calizas homogéneas que en profundidad pasan a ser dolomíticas. Nótese que en la columna estratigráfica (Figura 21) los diferentes niveles calcáreos jurásicos se han agrupado en una única trama.

El Retiense (Infralias) lo sitúan entre 1430 y 2020 m, con tres tramos diferenciados. Un tramo de carniolas (1430-1504 m) formado por calizas dolomíticas y dolomías microcristalinas y con alta salinidad en el agua extraída de la formación. Un segundo tramo de evaporitas (1504-2020 m), que de forma

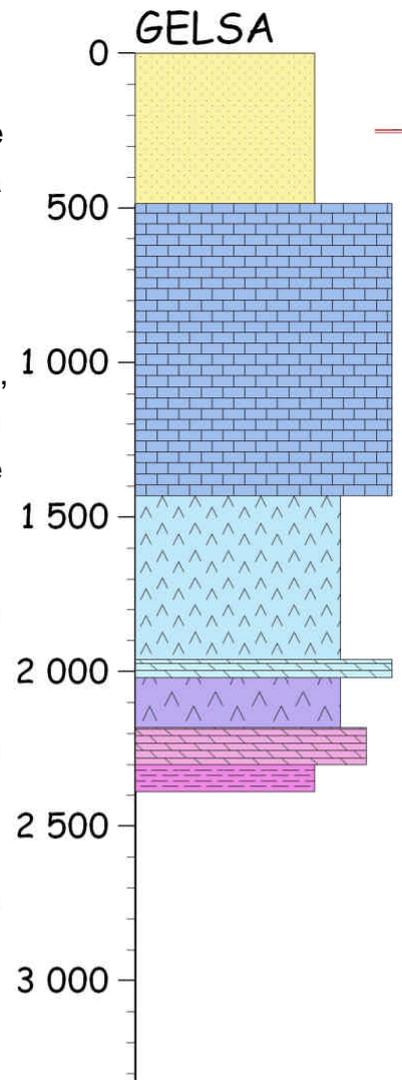


Figura 21. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Gelsa-1 (— Nivel del Mar).

regional se denomina “zona de anhidritas”, y en cuya parte basal predominan las dolomías, que corresponderían al tercer tramo de 60 m de potencia.

El Keuper se compone de facies arcillosas, margas y yesos (2020-2182 m). Por debajo se corta el Muschelkalk, en el que se diferencian dos unidades litológicas: una entre 2182 y 2302 m de profundidad, constituida por dolomías y una basal (2302-2388 m), que consiste en una alternancia de yeso-anhidrita, dolomías y margas.

LA ZAIDA 1

El sondeo La Zaida-1 (Figura 22) fue realizado a escasa distancia del pueblo del mismo nombre hasta una profundidad de 1698 m. Se alcanzó el basamento Paleozoico a 1577 m de profundidad.

El Mioceno-Oligoceno aparece representado por formaciones en facies continentales y lacustres y, en su conjunto, pueden diferenciarse dos unidades: la unidad superior, entre 0 y 127 m de profundidad, se compone de arcillas y evaporitas (yeso y anhidrita) con escasas intercalaciones calizas. En la unidad inferior (127-258 m) predominan las evaporitas sobre las arcillas y contiene también intercalaciones de areniscas.

El Jurásico Superior (Malm, entre 258 y 300 m de profundidad) y Medio (Dogger – 300-429 m) está compuesto por formaciones depositadas en ambiente marino. Aparece un tramo superior constituido por calizas masivas con alguna intercalación arcillosa, un tramo medio en el que predominan las margas y un tramo inferior en el que dominan nuevamente las calizas con alguna intercalación esporádica de arcillas.

El Jurásico Inferior (Lias – 465-505 m) está constituido por calizas y margas con predominio de las primeras. El Retiense (infralias) presenta un tramo de carniolas que corresponden a calizas vacuolares y porosas, dispuestas en bancos potentes entre los metros 505 y 567. Todas estas unidades dolomítico-calcáreas han sido agrupadas en una única trama en la columna del sondeo (Figura 22). Desde el punto de vista de la exploración de hidrocarburos este tramo de carniolas, con permeabilidad variable, de tipo granular, muestra buenas condiciones de

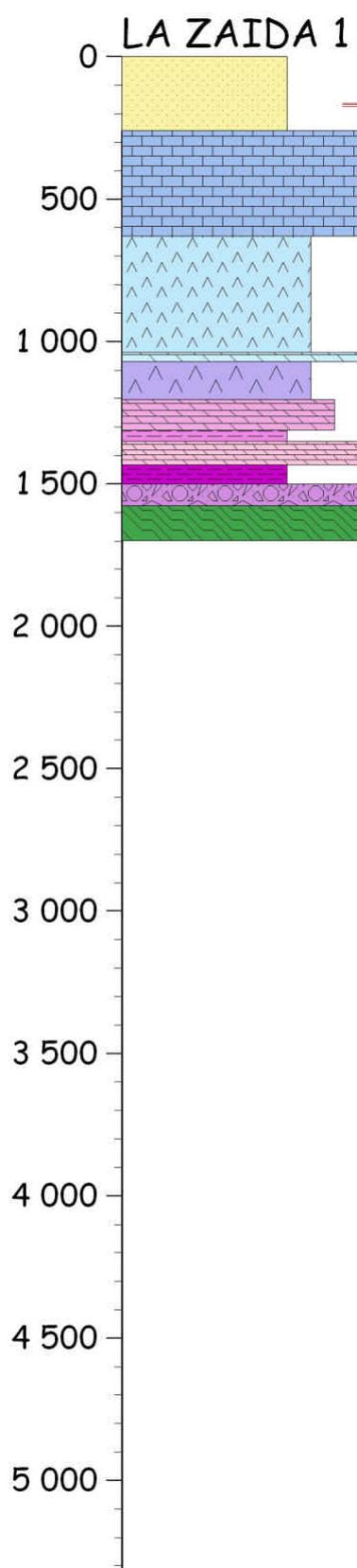


Figura 22. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo La Zaida-1 (— Nivel del Mar).

almacenamiento.

Por debajo aparece un potente tramo de anhidritas entre 567 y 1070 m de profundidad, denominado “zona de anhidritas” atribuido al Retiense o Infralías, con un predominio dolomítico hacia la base.

La secuencia litológica atribuida al Keuper, entre 1070 y 1203 m de profundidad, consiste en un potente conjunto de anhidritas masivas, arcillas y margas, con intercalaciones ocasionales de dolomías.

El Muschelkalk, entre 1203 y 1432 m de profundidad, presenta tres unidades litológicas de considerable extensión regional: la unidad superior compuesta por arcillas margosas y margas que pasan a muro a anhidritas y a dolomías arcillosas y anhidríticas masivas de gran dureza; la unidad intermedia que consiste en arcillas abigarradas y evaporitas (yesos) en facies muy similares a las del Keuper; y la unidad inferior, entre 1350 y 1432 m de profundidad, constituida por dolomías grises y pardas de microcristalinas a granulares.

Por último, el Buntsandstein (1432-1580 m) se presenta en facies continentales detríticas y pueden diferenciarse tres unidades: la superior constituida por areniscas porosas, limolitas y arcillas limolíticas; la intermedia constituida por areniscas de aspecto masivo de prosidad media; y la unidad inferior que presenta conglomerados cuarcíticos con matriz arcillosa-arenosa.

El Paleozoico que fue cortado por este sondeo a una profundidad de 1577 m está formado por pizarras arcillosas, de dudosa atribución al Carbonífero.

A partir de las conclusiones obtenidas del estudio geológico y geofísico de los sondeos Gelsa-1 y La Zaida-1, se considera muy probable la existencia de una falla inversa situada entre ambos sondeos y que, en el sondeo La Zaida-1, se situaría a unos 1085 m de profundidad (310 milisegundos – 3500 m/s), lo que la situaría en el techo del Keuper. Se considera también probable la existencia de otra falla aproximadamente paralela a la anterior y situada al sur probablemente con gran desarrollo regional.

La presencia de este accidente entre los sondeos Gelsa-1 y La Zaida-1, debería ser minuciosamente estudiado para comprobar si, por una parte, puede constituir una vía preferente de escape, o por el contrario, pudiera actuar como una trampa para el almacenamiento de CO₂.

LOPÍN 1

Del Sondeo Lopín-1 se dispone de la columna litológica (Figura 23), pero no de informes geológico y geofísico.

La base del Terciario se encuentra a 230 m de profundidad y éste está constituido por arcillas y yeso fundamentalmente.

Bajo los materiales del Terciario se sitúa el Jurásico Superior (Malm) hasta una profundidad de 435 m y compuesto por calizas y calizas margosas a techo. El Lías y Dogger están constituidos, igualmente, por calizas, calizas margosas y dolomicritas y alcanza n los 672 m de profundidad.

El Infralías (672-1160 m) está constituido, hasta los 1119 m, por un potente tramo anhidrítico que corresponde con la denominada “zona de anhidritas” y un tramo dolomítico en la base entre 1119 y 1160 m de profundidad.

Por debajo se encuentra el Keuper, entre los metros 1160 y 1350. Tiene un importante desarrollo y está constituido por arcillas, anhidritas y margas, dando paso a las tres unidades del Muschelkalk (1350-1615 m) definidas regionalmente y descritas en sondeos anteriores. La unidad superior dolomítica (M3); la unidad intermedia (M2), que consiste en arcillas abigarradas y anhidritas en facies muy similares a las del Keupper y la unidad inferior (M1) constituida por dolomías.

Por último, el Buntsandstein (1615-1652 m) presenta una unidad superior constituida por areniscas y arcilla, y otra inferior, microconglomerática, definida ya en otros sondeos.

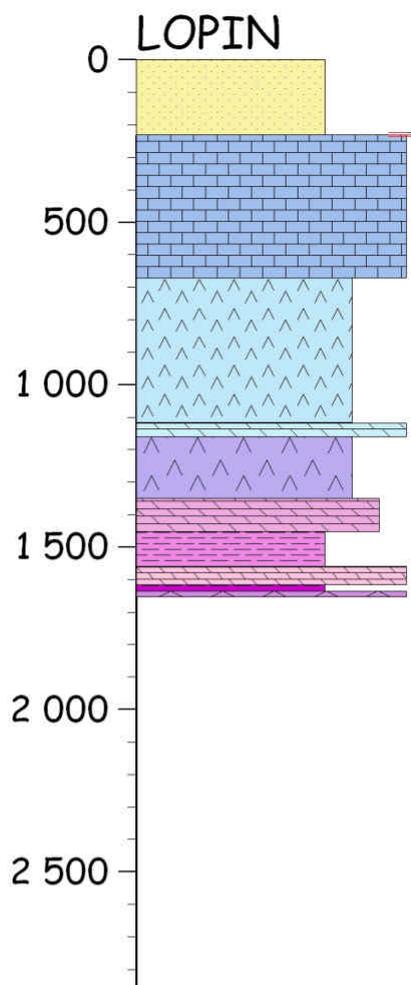


Figura 23. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Lopín-1 (— Nivel del Mar).

MAGALLON 1

Del sondeo Magallón-1 (Figura 24) tampoco se dispone de informe geológico. Su descripción es la siguiente:

Las formaciones terciarias, están constituidas por arcillas arenosas, yesos, anhidrita, calizas arenosas, dolomías y conglomerados, alcanzando una profundidad de 2480 m. En general, el tramo superior es de carácter predominante evaporítico, mientras que el inferior es arcilloso.

Por debajo de la discordancia terciaria se sitúa la serie mesozoica que, aunque no es muy potente (2480-3200 m), sí se encuentra bastante completa. En primer lugar, por orden de perforación, se corta el Cretácico, de muy poco desarrollo (2480-2505 m) y constituido por calizas. Por debajo, en los materiales del Jurásico (2505-2830 m), se puede diferenciar el Lias inferior y medio que está constituido por calizas arcillosas a techo y una potente zona de brechas con cemento dolomítico hacia la base.

Entre el Jurásico y el Triásico (2970-3200 m) se intercala una zona donde se cortan ofitas, rocas subvolcánicas de carácter básico, que aparecen como sills relacionados con el vulcanismo del Keuper. Por debajo, el Keuper está formado por arcillas con anhidrita, con escasa potencia, alcanzando los 3019 m de profundidad.

El Muschelkalk presenta en este sondeo únicamente las dos unidades inferiores: la M2 con arcillas y yesos, y la M1 dolomítica con el techo a 3.100 m de profundidad. Por último, el Buntsandstein (3172-3200 m) está constituido por arcillas y se apoya directamente sobre el Paleozoico, que presenta facies arcillosas con intercalaciones de ofitas atribuidas al Carbonífero.

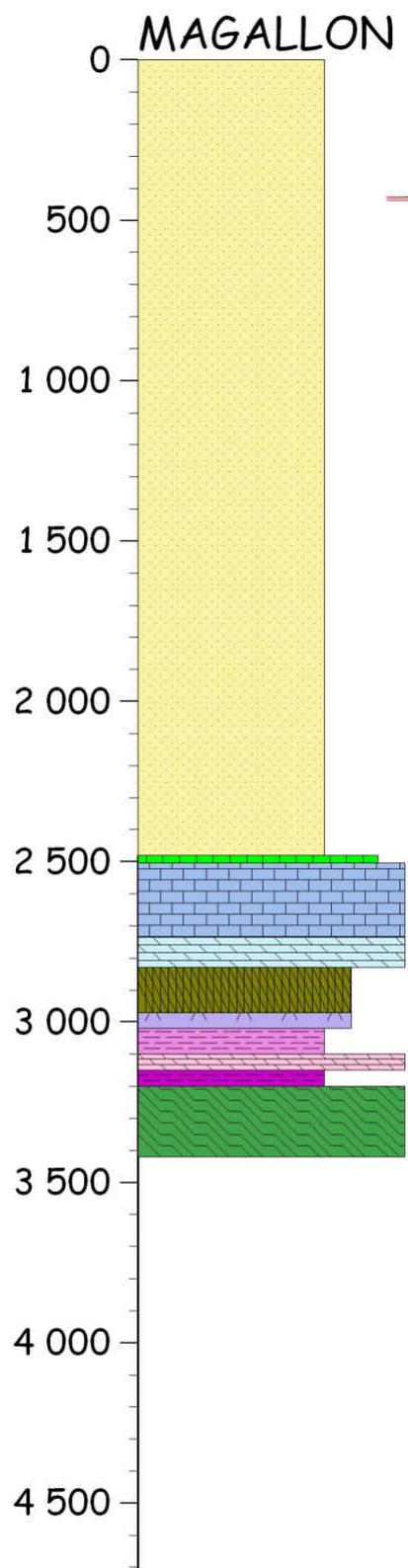


Figura 24. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Magallón-1 (— Nivel del Mar).

MAYALS 1

El sondeo Mayals-1 (Figura 25) está ubicado en la traza del perfil sísmico MI3 y su profundidad final fue de 1401 m.

En este sondeo se corta el Terciario hasta una profundidad de 976 m, en donde se apoya directamente sobre el Triásico. El Terciario está constituido por alternancias de arcillas, calizas y areniscas, con intercalaciones anhidríticas y/o yesíferas, entre los 315 y 905 metros de profundidad.

El primer tramo de Triásico, entre 976 y 1080 m de profundidad, indiferenciado según el informe del sondeo, corresponde a arcillas con intercalaciones de areniscas de grano fino a medio con cemento calcáreo. Éste se apoya sobre un tramo (1080-1220 m) constituido por areniscas de grano medio a grueso que pasan a microconglomerados hacia la base. Por último se cortó un tramo entre 1220 y 1365 m de profundidad, constituido por una alternancia de arcillas, areniscas con cemento ligeramente calcáreo y microconglomerados de cuarzo subredondeados y mal clasificados.

A 1365 m se encuentra el Paleozoico, hasta los 1401 m que constituye el final del sondeo.

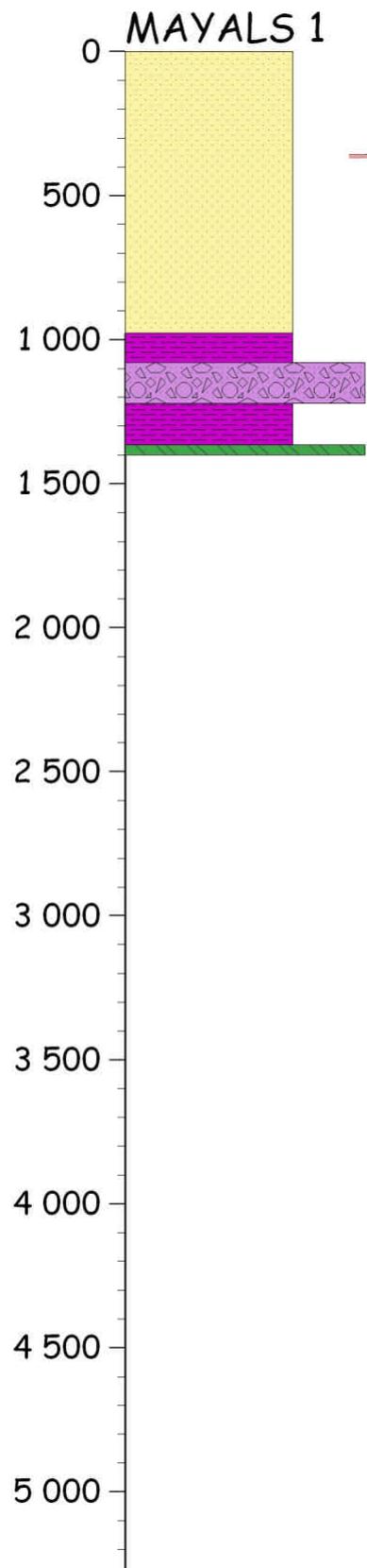


Figura 25. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Mayals-1 (— Nivel del Mar).

LÉRIDA 1

El Sondeo Lérica-1 presenta 1.177 m de relleno terciario continental margoso y arcilloso, con un tramo potente entre 676 y 938 m de profundidad, constituido por calizas con intercalaciones de margas y anhidritas. En la columna del sondeo (Figura 26) se ha representado con trama correspondiente al terciario indiferenciado.

Por debajo de la discordancia basal terciaria (1177 m), se cortó una barra dolomítica del Muschelkalk que, muy posiblemente, se corresponde con el nivel M1 definido a nivel regional. Ésta tiene una potencia de 66 m, de forma que a 1243 m de profundidad da paso a un Buntsandstein muy adelgazado, que alcanza los 1321 m de profundidad y que está constituido por arcillas, en su mitad superior, y areniscas y microconglomerados, en la inferior.

A 1321 m de profundidad se cortó el Paleozoico indiferenciado, constituido por arcillas dolomías y silt hasta el final del sondeo a 1410 m de profundidad.

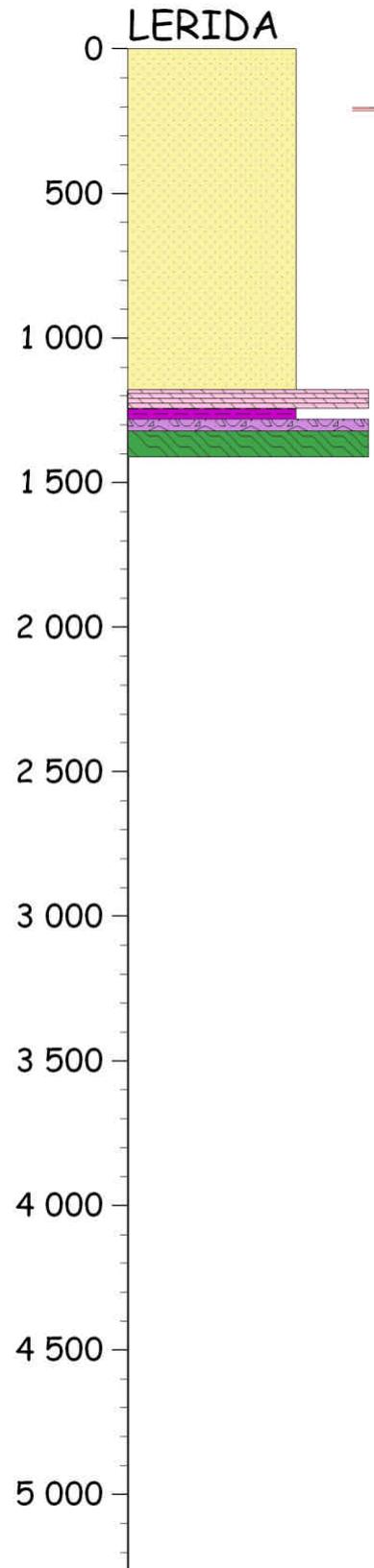


Figura 26. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Lérica-1 (— Nivel del Mar).

MONEGRILLO 1

Del sondeo Monegrillo-1 (Figura 27) tampoco se dispone de un informe de perforación ni de ninguna prueba de producción.

El sondeo corta, en primer término, al relleno terciario que está constituido por 820 m de margas yesíferas con intercalaciones de calizas.

Por debajo de la discordancia basal terciaria se corta anhidrita masiva con intercalaciones dolomíticas (820-978 m), atribuida al Lías o infra-Lías y podría ser correlacionable con la “zona de anhidritas” definida a nivel regional. Esta zona de anhidritas se superpone a las facies del Keuper constituidas por arcillas, sal y anhidrita que se extienden hasta los 1064 m de profundidad.

El Muschelkalk está dividido en tres niveles, dos de carácter dolomítico, M3 y M1, entre 1064-1175 m y 1208-1288 m respectivamente, separados por un tramo constituido por sal y anhidrita entre los metros 1175 y 1208, y que correspondería con el M2 definido a nivel regional.

Por debajo, el Buntsandstein, con un desarrollo moderado, está formado por un conjunto superior de areniscas y arcillas y un conjunto inferior conglomerático. Se encuentra directamente sobre el Paleozoico que se corta a una profundidad de 1381 m y se extiende hasta el final del sondeo (1447 m).

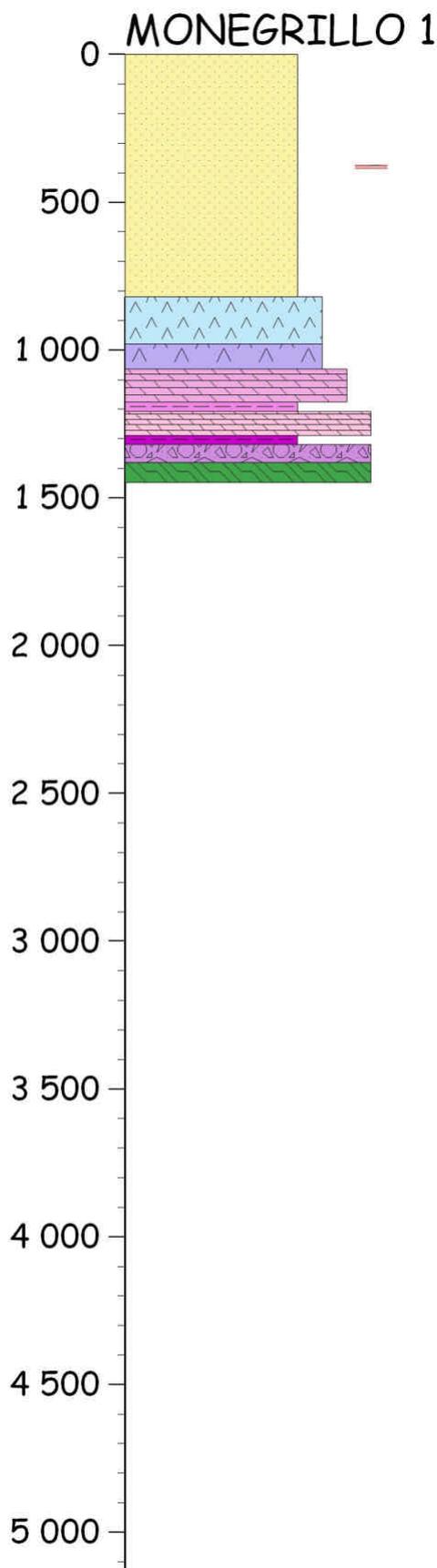


Figura 27. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Monegrillo-1 (— Nivel del Mar).

MONZON 1

En este sondeo la profundidad de la base del Terciario se alcanza a 2429 m y la serie terciaria está constituida principalmente por arcillas, areniscas, evaporitas y margas, aunque en la columna estratigráfica (Figura 28) no se hayan diferenciado estas litologías, por no ser objeto de estudio en este trabajo.

La serie mesozoica tiene un desarrollo considerable, aunque no completa, y se sitúa por debajo de los 2400 metros de profundidad.

Comienza directamente, según el orden de perforación, con los materiales del Lias inferior que es de carácter carbonatado, el Infralias, el cual está constituido por brechas calcáreas y una alternancia de dolomías y calizas, alcanzando una profundidad de 2655 m.

Por debajo, se cortan las arcillas y sales del Keuper, entre los metros 2655 y 2977, con un importante desarrollo (322 m de potencia).

El Muschelkalk está constituido por tres unidades:

- Muschelkalk M3, entre 2977 y 3012 m, con dolomías principalmente y caliza y anhidritas.
- Muschelkalk M2, entre 3012 y 3320 m, constituido por sales con arcilla y anhidrita.
- Muschelkalk M1, entre 3320 y 3415 m, formado por calizas dolomíticas y dolomías.

El sondeo termina en el Buntsandstein que presenta un tramo superior, entre 3415 y 3575 m, de carácter anhidrítico arcilloso y uno inferior, entre 3575 y 3714 m de profundidad, de carácter arenoso y conglomerático.

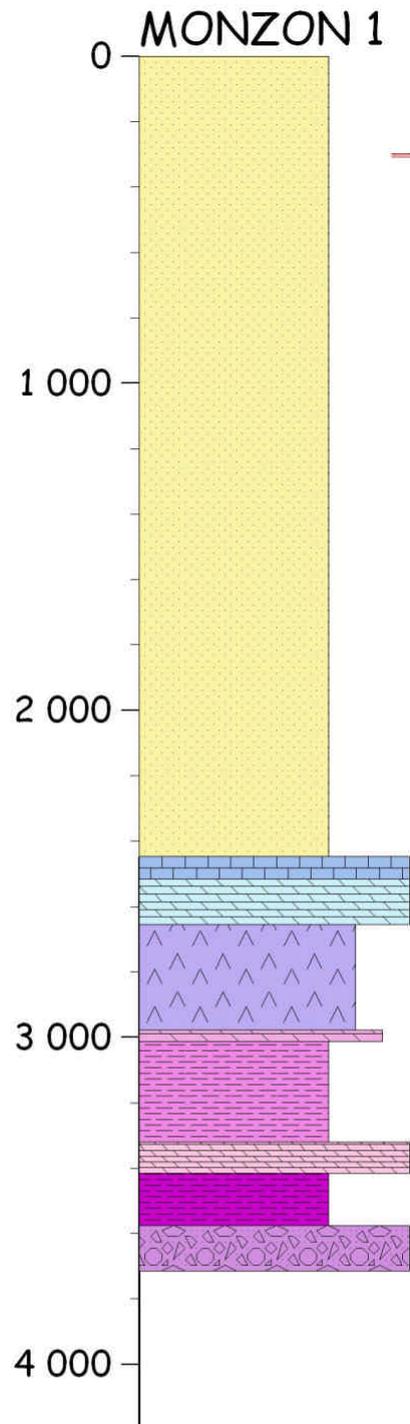


Figura 28. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Monzón-1 (— Nivel del Mar).

SARIÑENA 1

Del sondeo Sariñena-1 (Figura 29) se dispone únicamente de la columna litológica, pero no de los informes.

El Terciario, de carácter continental, alcanza una profundidad de 1795 m y está constituido por tres grandes tramos, aunque en la columna estratigráfica no se hayan diferenciado (Figura 30). Entre 0 y 1056 m es de carácter arciloso-arenoso, entre 1056 y 1450 m presenta calizas y margocalizas y entre 1450 y 1756 m es margoso con anhidrita y sal. En la base (1756-1795 m) presenta un nivel de calizas arcillosas.

La serie mesozoica tiene un importante desarrollo y se encuentra bastante completa. Comienza con las calizas dolomíticas del Lias inferior que alcanzan una profundidad de 1820 m. Por debajo, el Infralias presenta un tramo superior constituido por anhidrita, entre 1820 y 2000 m de profundidad, y un tramo inferior constituido por dolomías, entre 2000 y 2049 m de profundidad. Por debajo, el Keuper (2049-2331 m) presenta las facies con anhidrita, arcilla y sal y algunas pasadas de dolomías.

El Muschelkalk presenta igualmente su configuración habitual, con la existencia de dos barras dolomíticas separadas por facies anhidríticas-arcillosas.

- M3, entre 2331 y 2454 m, constituido por dolomías y calizas dolomíticas.
- M2, entre 2454 y 2689 m, con predominio de arcilla y anhidritas.
- M1, entre 2689 y 2760 m, formado por calizas y dolomías.

De la misma forma el Buntsandstein presenta un tramo superior (2760-2850 m) formado por sal, anhidrita y arcilla, y un tramo inferior, hasta el final del sondeo (2850-2893 m), formado por areniscas y conglomerados.

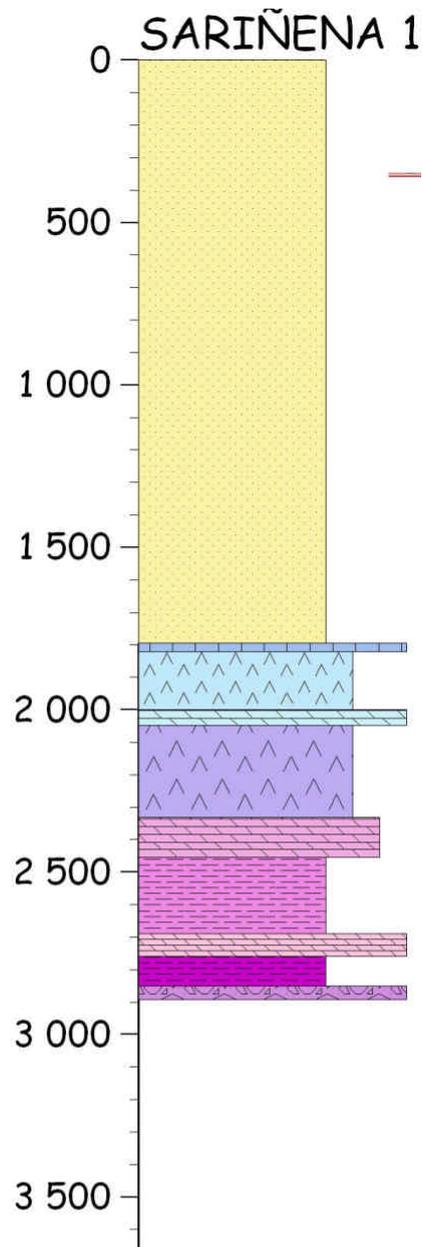


Figura 29. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Sariñena-1 (— Nivel del Mar).

TAUSTE ESTE 1

Del Sondeo Tauste-Este-1 se dispone de la columna litológica (Figura 30), pero no se dispone de ningún informe.

Las formaciones terciarias están constituidas por arcillas arenosas, yesos, anhidrita, calizas arenosas, dolomías y conglomerados, facies que se han representado en la columna litológica con una única trama de Terciario indiferenciado. Únicamente se ha diferenciado en esta columna un potente tramo de carácter evaporítico que se sitúa entre los metros 1929 y 2380 m, que podría representar un buen sello para las formaciones infrayacentes, aunque parece no presentar extensión lateral hacia los sondeos circundantes. La base del Terciario se sitúa a los 2752 m de profundidad, y da paso a los materiales mesozoicos, los cuales presentan escaso desarrollo.

El Jurásico, formado por calizas, dolomías y margas de edad Lías, se corta entre los metros 2752 y 2857. Por debajo, el Infralías (2857-2910 m) tiene una escasa representación y presenta únicamente un tramo de carácter anhidrítico y arcilloso.

Entre estos materiales y los materiales evaporítico del Keuper aparecen ofitas (2910-3007 m) que corresponde al episodio magmático del Triásico superior.

El Keuper (3007-3119 m) está formado por anhidrita y/o sal y, por debajo, el Muschelkalk presenta una única barra dolomítica de gran espesor (3119-3291 m). Por último, en el Buntsandstein (3291-3329 m), poco desarrollado, se puede diferenciar un tramo superior arenoso y otro inferior conglomerático en el que acaba el sondeo.

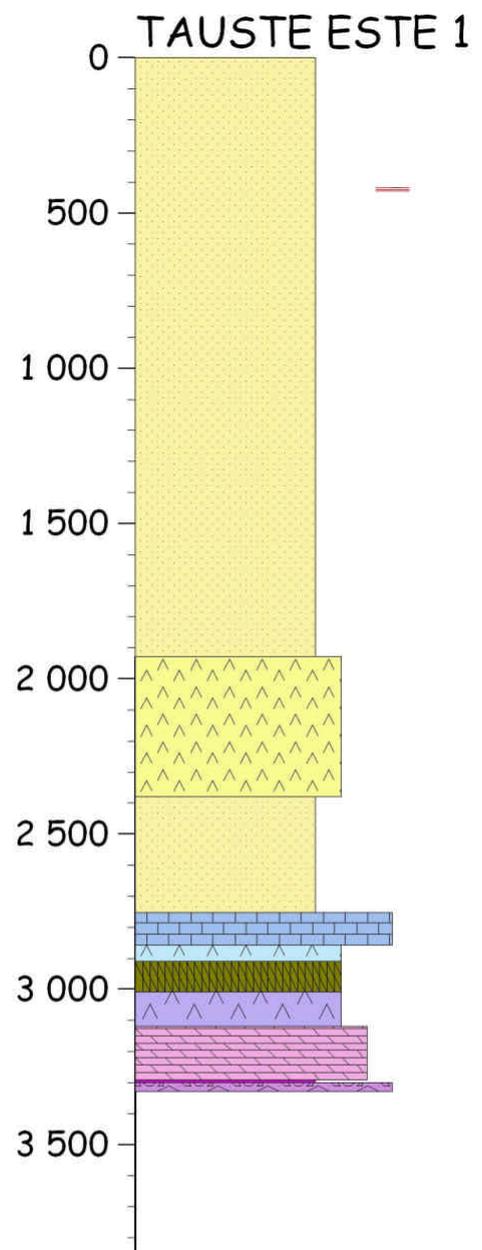


Figura 30. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Tauste Este-1 (— Nivel del Mar).

VALPALMAS 1

Del sondeo Valpalmas-1 únicamente se dispone de la columna litológica (Figura 31). Se encuentra próximo al sondeo Tauste-Este 1, descrito anteriormente.

En este sondeo el Terciario alcanza la profundidad de 3345 m, por lo cual, aunque el Buntsandstein y Muschelkalk presentan un interesante desarrollo, se sitúan a demasiada profundidad en relación con los objetivos que se persiguen en este trabajo.

De cualquier forma se describe la columna estratigráfica como sigue: el Terciario consiste en niveles de margas, areniscas, anhidrita, caliza arenosa y caliza arcillosa. Hacia el techo es de carácter más arenoso – arenisco, mientras que hacia la base puede presentar calizas y calizas dolomíticas, así como conglomerados en las proximidades de la discordancia basal terciaria.

Bajo esta discordancia se sitúa directamente el Keuper, entre 3345 y 3397 m de profundidad, con un escaso desarrollo y constituido por brechas, arcillas y dolomías con anhidrita. El Muschelkalk presenta los tres niveles característicos y observados en otros sondeos:

- M3 - 3397-3598 m - dolomías y calizas dolomíticas.
- M2 - 3598-3657 m - arcilla y anhidritas.
- M1 - 3657-3719 m – calizas y dolomías.

El Buntsandstein presenta un tramo superior (3719-3757 m) compuesto por arcillas y anhidrita y un tramo inferior (3757-4006 m) compuesto

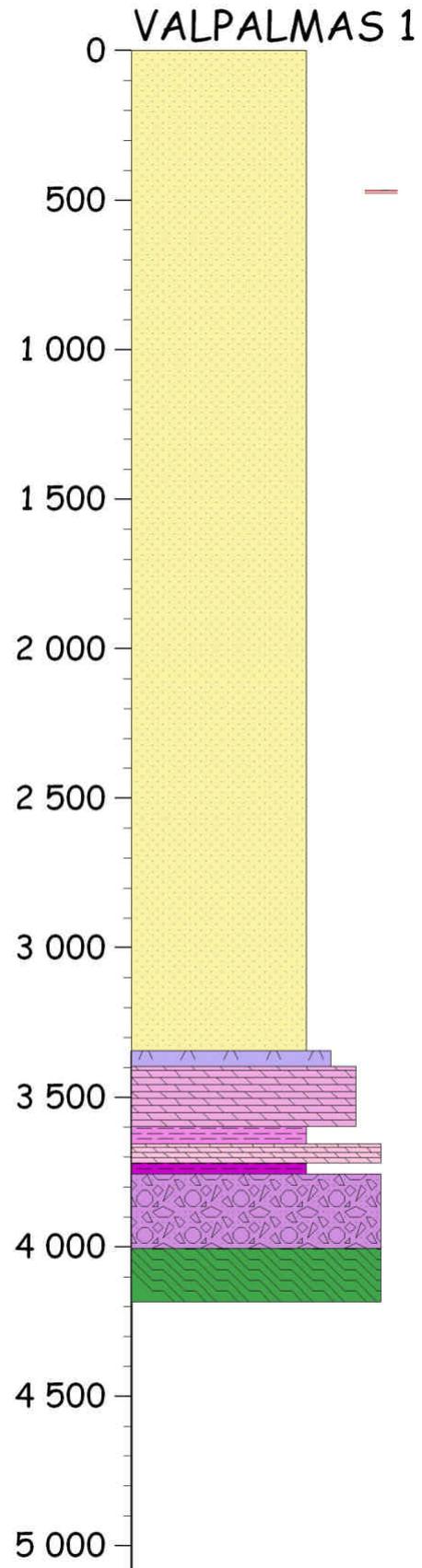


Figura 31.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Valpalmas-1 (— Nivel del Mar).

por areniscas y conglomerados que predominan hacia la base. Tienen un importante desarrollo, unos 250 m de potencia.

El techo del Paleozoico se alcanza a una profundidad de 4006 m y, hasta el final del sondeo (4183 m), está constituido por arcillas limolíticas y areniscas atribuidas al Carbonífero.

ZARAGOZA 1 y ZUERA 1

Los sondeos Zaragoza-1 y Zuera-1 (Figura 32), están prácticamente juntos. De hecho, el segundo se realizó probablemente por problemas mecánicos en el primero. Las profundidades que se reflejan en la descripción corresponden al sondeo Zuera-1 ya que es el más completo.

En estos sondeos, el Terciario consiste en una serie de tramos alternantes, más o menos anhidriticos o arcillosos, y alcanza una profundidad de 1788 m.

Por debajo de la discordancia basal terciaria, entre los metros 1788 y 1865, se cortan las calizas micríticas del Malm, que se superponen a los materiales margocalcáreos del Lías, ambos con una única trama en la columna del sondeo.

El Retiense inferior está constituido por dos tramos

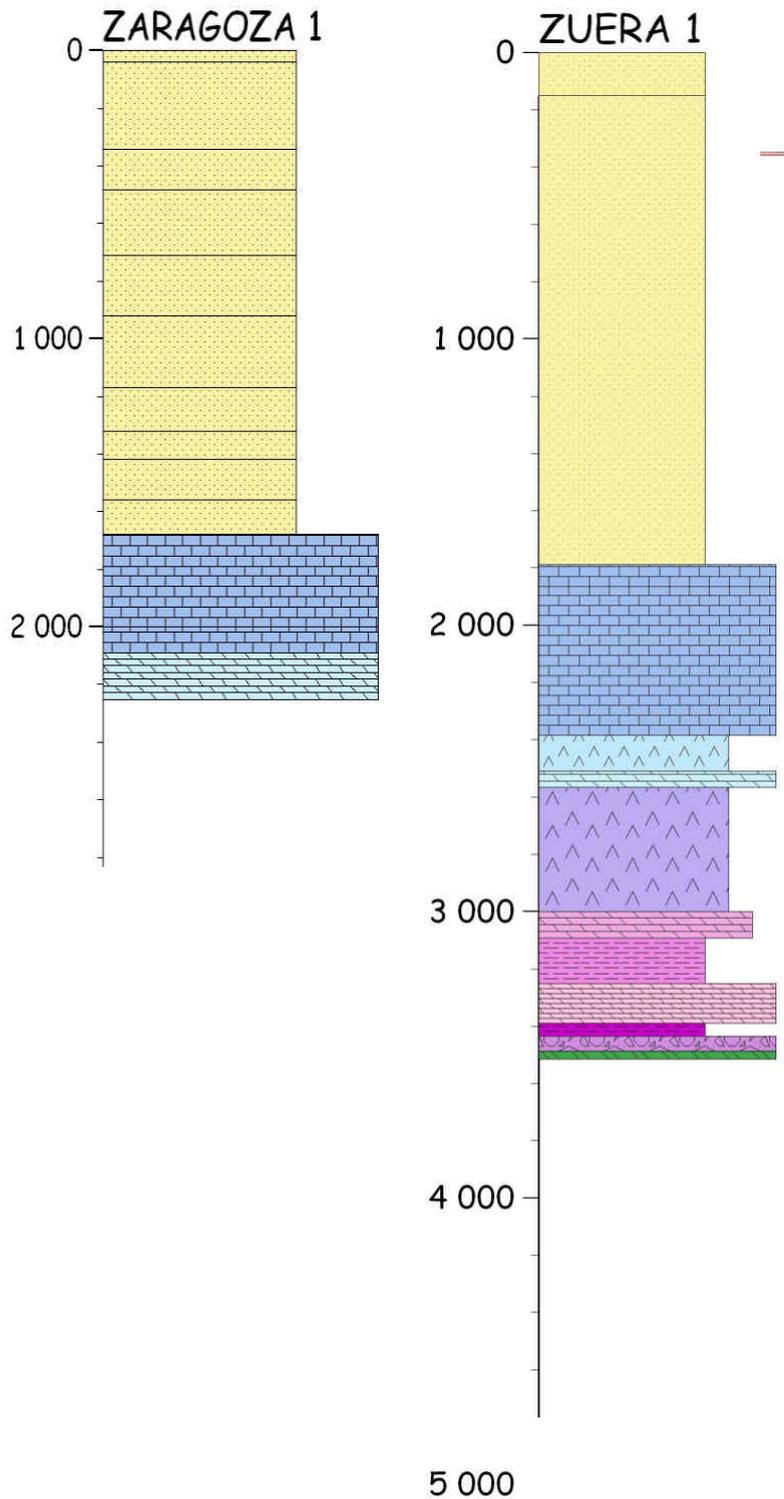


Figura 32. - Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Zaragoza 1 y Zuera 1 (— Nivel del Mar).

diferenciados, el superior entre 2385 y 2510 m de profundidad, de carácter anhidrítico, y el inferior entre 2510 y 2567 m de profundidad, dolomítico. El tramo superior no parece cortarse en el sondeo Zaragoza-1.

Por debajo, el Keuper, entre 2567 y 3000 m de profundidad, está constituido por arcilla, anhidrita y sal y se superpone al Muschelkalk, el cual presenta los tres niveles definidos regionalmente, dos barras dolomíticas a 3000 y 3250 m de profundidad, separadas por una unidad anhidrítica arcillosa entre los 3092 y 3250 m.

El Buntsandstein (3332-3487 m) presenta un tramo más arenoso-conglomerático a techo y a muro, separados por términos más arcillosos, aunque en la columna se ha respetado la división en dos tramos a la que nos hemos referido en otros sondeos, y que prevalecen a nivel regional.

El techo del Paleozoico se alcanzó a una profundidad de 3487 m, y hasta el final del sondeo (3515 m), está constituido por pizarras indiferenciadas.

SENANT 1

El Sondeo Senant-1, situado en la zona de transición entre el Sector Central y el Sector Oriental, presenta muy poco interés para los objetivos específicos de este trabajo (Figura 33).

Presenta 1423 m de relleno terciario (Paleógeno) sobre la serie mesozoica, la que tiene muy poco desarrollo.

El Terciario representado con una única trama en la columna del sondeo, es predominantemente arenoso en la parte superior, pero por debajo de 650 m está constituido por arcillas, entre las que destaca un tramo Eoceno de unos 100 m de calizas superpuestas a otros 120 m de areniscas, entre 940 y 1159 m de profundidad. En la columna del sondeo se ha representado con una única trama.

El Keuper, bastante adelgazado (1423-1456 m), está constituido por arcilla y anhidrita y da paso a los 1456 m de profundidad, a las dolomías del Muschelkalk superior (M3). Por debajo, se corta un tramo de limos de 60 m de potencia (M2) y un tramo dolomítico (M1), entre 1600 y 1630 m de profundidad.

La parte inferior del Trías (Buntsandstein) es arcillosa y muy adelgazada, de manera que el sondeo perfora el Paleozoico a 1.649 m.

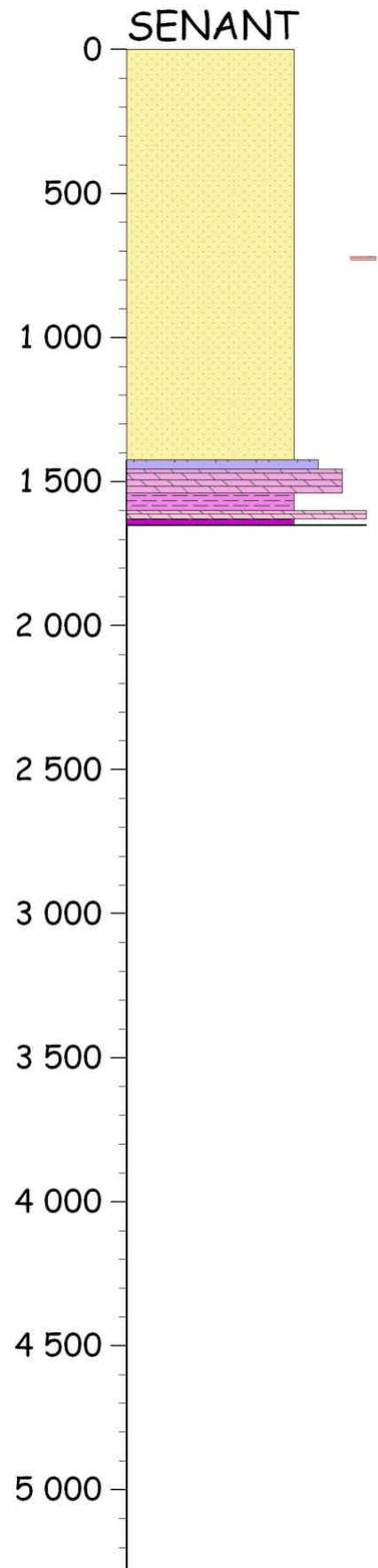


Figura 33.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Senant-1 (— Nivel del Mar).

CASTELLFULLIT 1

El sondeo Castellfullit-1 se sitúa en el Sector Oriental. Según la columna del sondeo, el relleno terciario alcanza una profundidad de 1935 m, y está constituido por una alternancia de limolitas y areniscas con intercalaciones de tramos anhidríticos. En la columna litológica (Figura 34) se han diferenciado los tramos más potentes.

Por debajo de la discordancia terciaria se encuentra el Keuper bastante adelgazado, entre 1935 y 1975 m de profundidad, y de carácter arcilloso fundamentalmente.

El Muschelkalk presenta tres tramos diferenciados, dos dolomíticos a 1975 y 2090 m, respectivamente y separados por un tramo arcilloso y anhidrítico entre los 2020 y 2090 metros de profundidad.

En el Buntsandstein, como en otros sondeos se diferencian dos tramos: el superior entre 2195 y 2275 metros, de carácter arcilloso-anhidrítico, y el inferior, entre 2275 y 2450 metros, formado por areniscas con intercalaciones de conglomerados y arcillas.

El techo del Paleozoico se alcanza a una profundidad de 2450 m, y hasta el final del sondeo (2500 m) está constituido por pizarras arcillosas indiferenciadas.

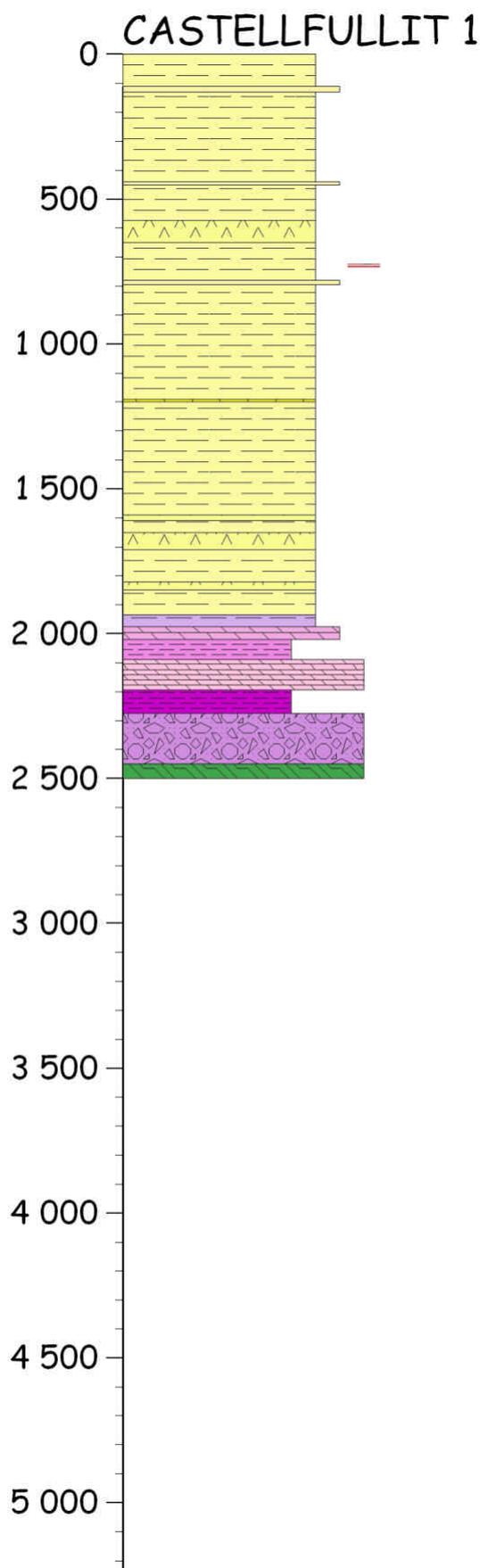


Figura 34. - Columna estratigráfica simplificada del sondeo Castellfullit-1 (— Nivel del Mar).

GUISONA 1

Según la columna del sondeo (Figura 35), el relleno Terciario alcanza una profundidad de 2660 m, y está constituido por una alternancia de limolitas y areniscas con intercalaciones de tramos anhidríticos y calcáreos. En la columna litológica se han diferenciado los tramos anhidríticos más potentes.

Por debajo de la discordancia terciaria se encuentra un Keuper muy adelgazado (2660-2693 m) de carácter arcilloso.

En este sondeo el Muschelkalk presenta un único tramo de carácter dolomítico, entre los 2693 y 2767 m. El Buntsandstein presenta hasta el final del sondeo a 3225 m, un único tramo formado por arcillas y anhidrita.

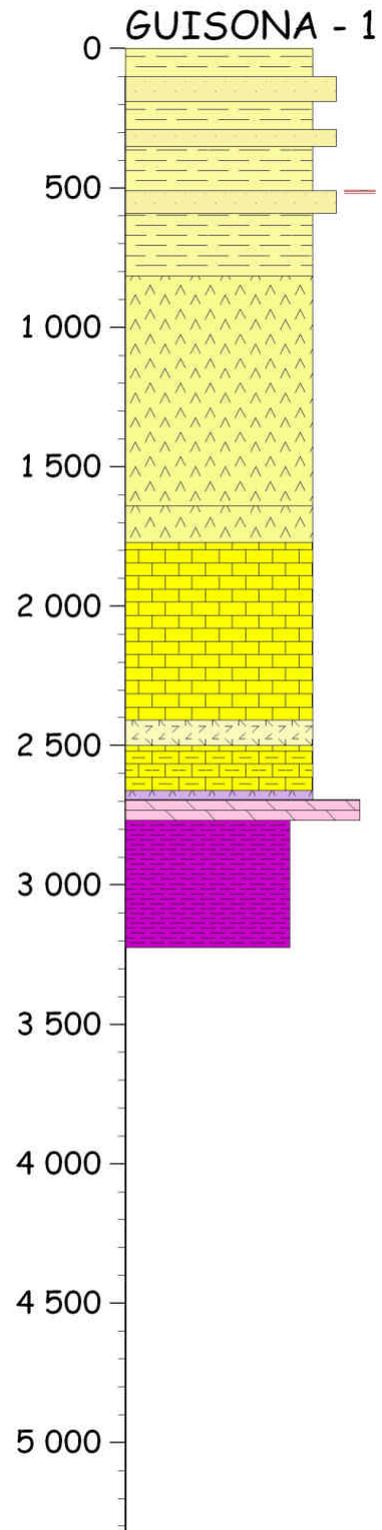


Figura 35.- Columna estratigráfica simplificada del sondeo Guisona-1 (— Nivel del Mar).

BASELLA-1, SANAHUJA-1 y PINOS-1

El sondeo Basella-1 (Figura 36), cortó únicamente al Terciario que se pone directamente en contacto con el Paleozoico a una profundidad de 3690 m. Por su parte, el sondeo Pinos-1 únicamente cortó materiales terciarios hasta una profundidad de 1928 m. El sondeo Sanahuja-1 (Figura 36), el relleno terciario alcanza una profundidad de 3365 m, dando paso a los materiales dolomíticos del Muschelkalk y, a 3487 m, a los materiales arcillosos del Buntsandstein. El final de este sondeo se encuentra a una profundidad de 3510 m.

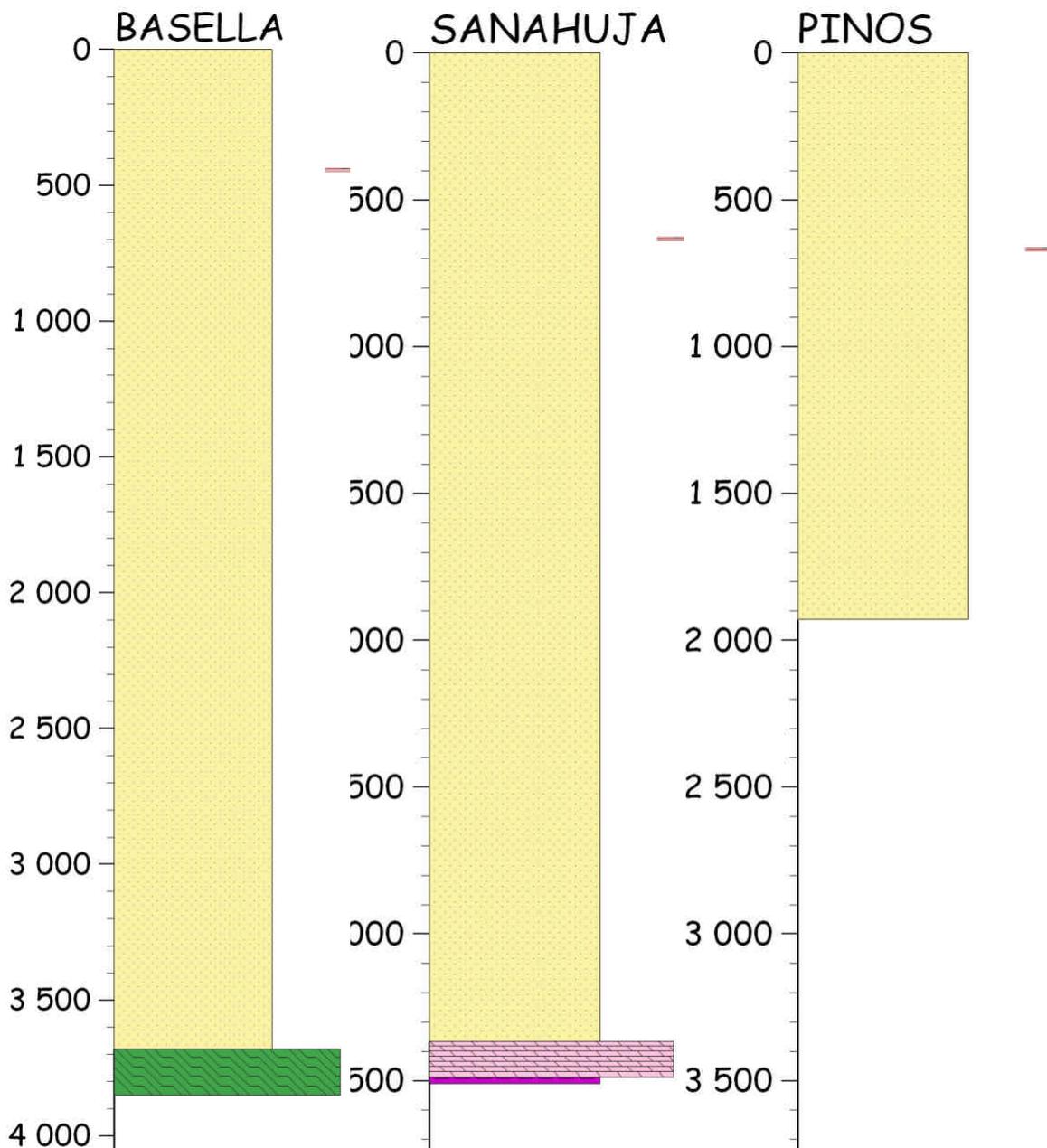
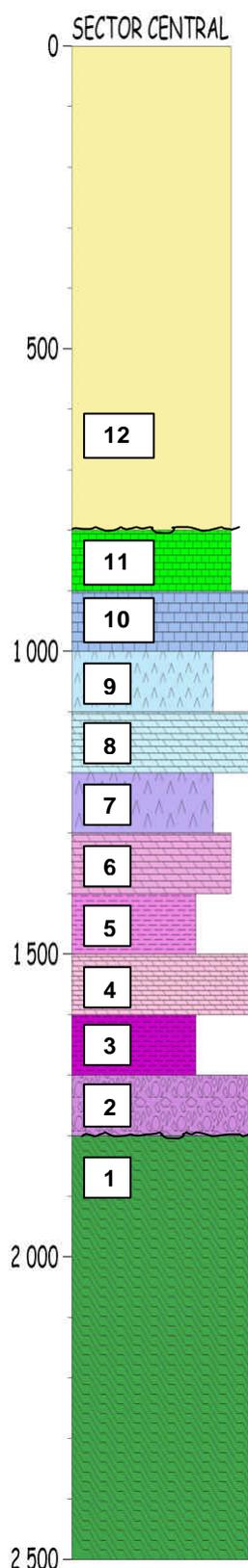


Figura 36. - Columnas estratigráficas simplificadas de los sondeos Basella-1, Sanahuja-1 y Pinos-1 (— Nivel del Mar).

COLUMNA “TIPO” PARA EL SECTOR CENTRAL



En el sector central de la cuenca del Ebro puede definirse una columna estratigráfica “tipo”, en la que los materiales, de muro a techo, pueden describirse de la siguiente manera:

- El **Paleozoico (1** en la Figura 37): está constituido por esquistos, pizarras, dolomías, areniscas y arcillas que en algunos sondeos han sido datados como silúricos y devónicos.
- El Triásico comienza con los conglomerados, areniscas y arcillas en facies **Buntsandstein (2-3)**. Este tramo está constituido por conglomerados y areniscas rojas de origen continental en su parte basal y media (**2**), y por arcillas y evaporitas (**3**) a techo (facies Röt). Los espesores que presentan estos tramos son muy variables. El tramo basal de conglomerados y areniscas presenta un espesor medio de 160 m, aunque en los sondeos oscila entre 40 y 450 m de potencia. El tramo arcilloso terminal tiene un espesor medio de 80 m y oscila entre 20 m y 150 m, en los diferentes sondeos analizados.
- Dolomías del **Muschelkalk inferior (4)**: está formada por dolomías y calizas dolomíticas con algunas intercalaciones de evaporitas. Corresponden a depósitos de “lagoon”, transgresivos sobre los materiales del Buntsandstein, mientras que la parte superior es de carácter regresivo. Presentan procesos paleokársticos y una fuerte dolomitización debido a la migración de fluidos ricos en Mg. El espesor medio de esta unidad es de unos 75 m, y oscila entre los 30 m y 100 m, en los sondeos analizados.

Figura 37. - Columna estratigráfica “tipo” para el sector central de la cuenca del Ebro

- Evaporitas y arcillas del **Muschelkalk medio (5)**: este tramo está constituido por una serie evaporítico lutítica con influencias detríticas. Está formado por arcillas y evaporitas, anhidritas y sal. Tiene un espesor medio de 130 m, aunque presenta valores muy variables, desde 30 m a 250 m. Esta unidad constituiría la cobertera (o sello) de las dolomías del Muschelkalk inferior.
- Dolomías del **Muschelkalk superior (6)**: esta unidad está constituida por una alternancia de dolomías de potencia métrica, dolomías tableadas y dolomías arcillosas. Presenta niveles estromatolíticos y desarrollos paleokársticos. La parte superior de la unidad tiene carácter regresivo, reflejando la transición al Keuper. El espesor medio de esta unidad es de 110 m, con valores que oscilan entre 45 y 140 m.
- Lutitas y evaporitas del **Keuper (7)**: esta unidad está formada por alternancias de arcillas rojas, anhidritas y localmente sal. El Keuper representa una excelente cobertera o sello para las dolomías del Muschelkalk superior. Presenta espesores muy variables que oscilan entre 35 y 300 m, con un valor medio de 180 m.
- Dolomías del **Retiense (8 - Fm. Imón)**: la sedimentación jurásica se inició con las dolomías de la Formación Imón, la cual está situada estratigráficamente sobre el Keuper. Está constituida por dolomías vacuolares con porosidad primaria y secundaria. En los bordes de la cuenca está formada por dolomías pseudo-oolíticas, tableadas, decimétricas. Presenta una potencia media de unos 50 m, con un rango de espesores que oscila entre 30 y 180 m, en los diferentes sondeos analizados.
- Anhidritas del **Infralias (9)**: esta unidad está constituida por anhidritas y dolomías de edad Hettangiense, que lateralmente pueden pasar a brechas poligénicas. Esta unidad representa una facies sedimentaria de ambiente lagunar. Constituye una excelente cobertera para las dolomías de la Formación Imón, con un espesor medio que oscila entre los 125 y los 300 m.
- Carbonatos del **Lías Inferior, Dogger y Malm (10)**: por encima de las anhidritas del Infralias se encuentra una serie carbonatada de edad Sinemuriense, constituida, de muro a techo, por dolomías, calizas, margas y calcarenitas, con crinoides y belemnites. Éstas últimas de edad Toarciense. El

Lias tiene una potencia media de unos 125 m, aunque al estar parcialmente erosionado, su potencia oscila entre los 20 m y los 240 m.

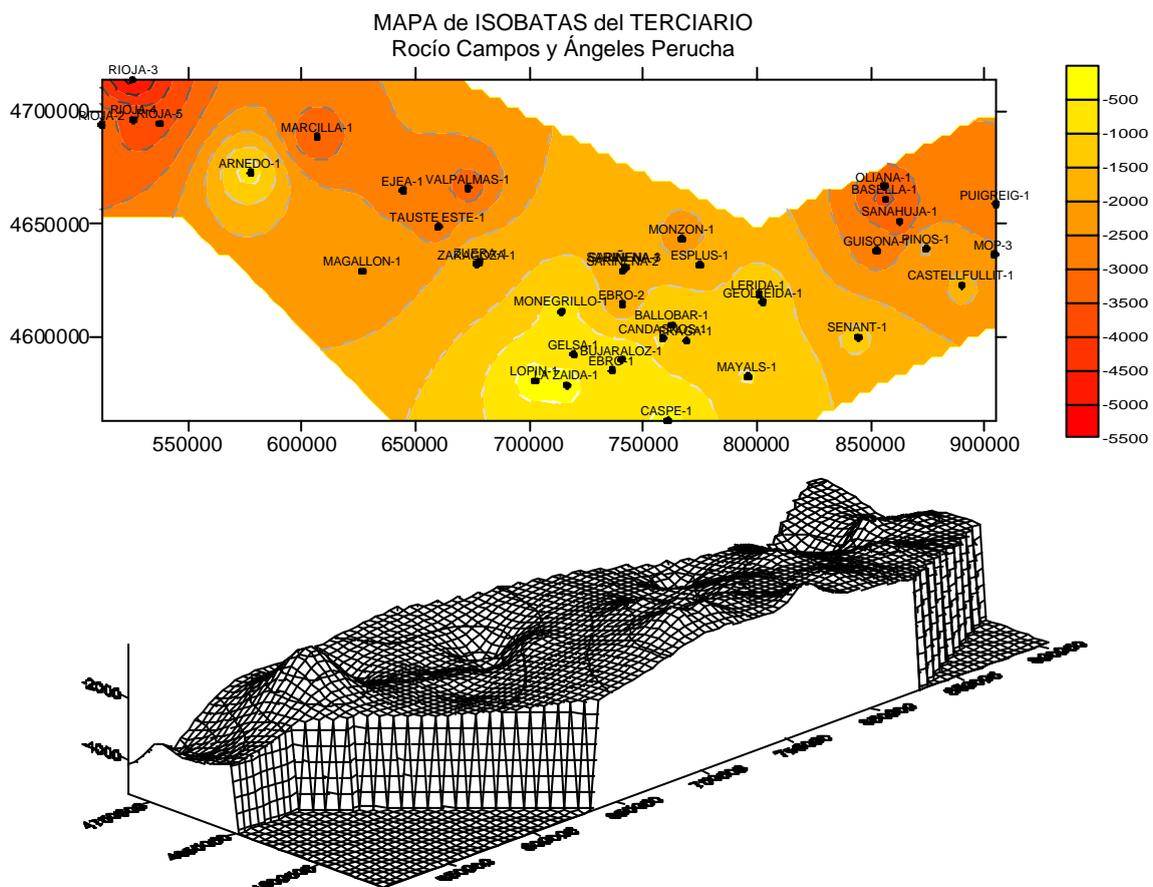
El Dogger se inicia con una pequeña intercalación margosa que separa la barra calcarenítica del Toarciense de la barra Aalenense. Esta última es bioclástica, está fuertemente cementada y carece de porosidad. El Bajociense está representado por margas y margocalizas azules con abundante fauna. El Bathoniense-Oxfordiense está constituido por calizas compactas grises, calizas nodulosas, compactas, grises, con estratificación decimétrica. En conjunto, el Dogger presenta una potencia media de unos 100 m, con valores que oscilan entre los 40 y los 270 m.

El Malm está constituido por calizas con algunos niveles margosos. Está presente de forma residual en algunos sondeos del sector central del valle del Ebro. Presenta unos espesores muy variables, desde 25 m a 745 m (máxima en el sondeo Gelsa-1), aunque la potencia media es de unos 125 m.

- Calizas del **Cretácico Inferior (11)**: los sedimentos cretácicos se apoyan en disconformidad sobre los materiales preexistentes y aparecen tan sólo en tres sondeos (Ballobar-1, Bujaraloz-1 y Candanos-1) de la zona central del valle del Ebro. Está constituido por calizas grises biomicríticas fuertemente fracturadas, con foraminíferos, ostrácodos y lamelibranquios. En los sondeos en los que aparece presenta una potencia de 115 m, 207 m y 64 m.
- Depósitos continentales del **Terciario (12)**: los materiales terciarios reposan en discordancia erosiva, truncando todos los materiales mesozoicos, los cuales llegan a desaparecer completamente en algunas zonas. Los sedimentos terciarios están constituidos por alternancias de conglomerados, calizas, evaporitas, arcillas y limolitas. Los espesores son muy variables, llegando a superar los 4000 m en el sector noroccidental de la cuenca.

6.- SELECCIÓN DE FORMACIONES FAVORABLES

Los materiales del Terciario no presentan condiciones idóneas para el almacenamiento, dados los frecuentes cambios laterales de facies de sus formaciones, así como por la ausencia de sellos continuos y fiables que pudieran delimitar el almacenamiento. Los materiales del Paleozoico tampoco parecen adecuados para tal fin por su elevada fracturación así como por su baja porosidad primaria. Por otra parte, tampoco parece que se pudieran presentar en estos materiales sellos continuos y fiables para un posible almacenamiento. Objetivamente hay que tener en cuenta que los sondeos analizados para este trabajo, derivados de la exploración para hidrocarburos, no tuvieron en su momento por objetivo la exploración de los materiales paleozoicos, por lo que no disponemos de argumentos suficientes para descartar su idoneidad como roca almacén o sello de un futuro almacenamiento.



Teniendo en cuenta la falta de idoneidad de los materiales terciarios y paleozoicos, para proceder a la selección de formaciones favorables, se han delimitado la base del Terciario y el techo del Paleozoico, ya que el supuesto almacén ha de ser elegido entre estas dos discordancias (Figuras 38 y 39).

El mapa de isobatas del Terciario (Figura 38) muestra como éste se hace más profundo hacia los sectores occidental y oriental, en los cuales estos materiales de relleno de la cuenca alcanzan valores máximos de 3500-4000 m, razón por la cual estas zonas son, *a priori*, descartadas para albergar un posible almacenamiento de CO₂. Dentro del sector occidental, el sondeo Arnedo-1 presenta poco espesor de sedimentos terciarios lo que constituye una anomalía dentro de la tendencia general que debería ser comprobada.

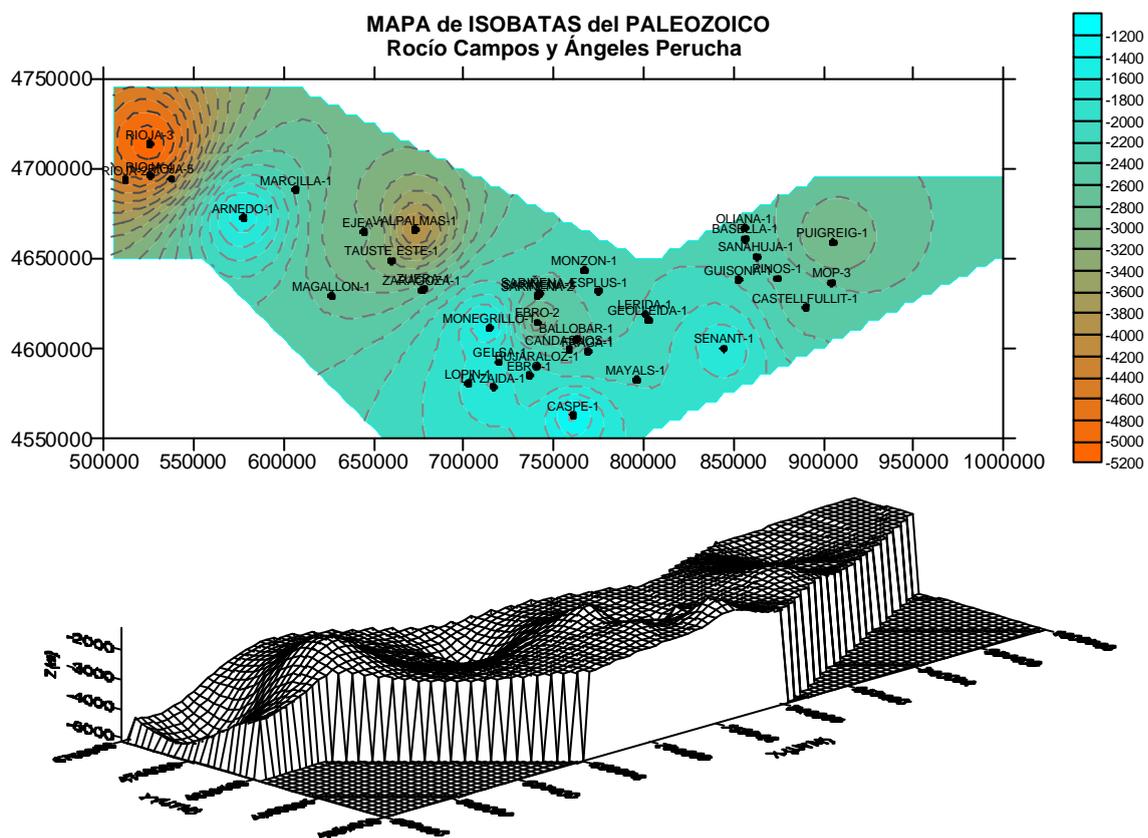


Figura 39. - Mapa 2D y 3D de isobatas del techo del Paleozoico.

El sector central presenta, prácticamente en su totalidad, un espesor de sedimentos terciarios inferior a 2000 m, con un adelgazamiento general hacia el sur, lo que se corrobora en los sondeos Lopín-1, La Zaida-1, Caspe-1, Mayals-1 y Candasnos-1 cuyo recubrimiento es menor de 500 m.

El mapa de isobatas del Paleozoico (Figura 39) muestra una tendencia muy similar a la del Terciario. Un aumento de la profundidad del techo paleozoico hacia los sectores occidental (más acusada) y oriental, así como, una disminución de la profundidad de esta discordancia en el sector central, sobre todo hacia el sur de este sector, con profundidades de torno a los 1100-1200 m. Presenta también una profundidad anómalamente baja en el sondeo Arnedo-1

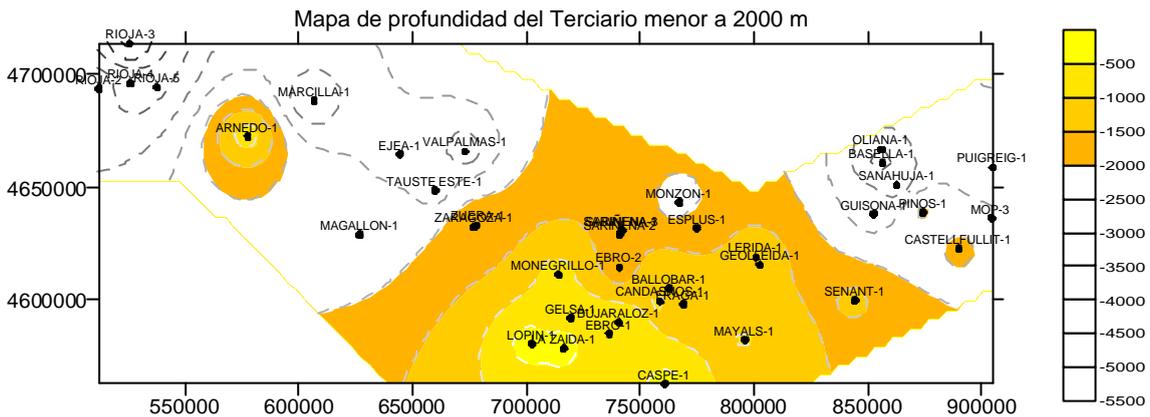


Figura 40. - Mapa de isobatas de la base del Terciario con profundidad inferior a 2000 m.

Teniendo en cuenta estos dos mapas de profundidades (Figuras 38 y 39), las zonas posibles para albergar un almacenamiento de CO₂ se encontrarán situadas en aquellos puntos donde el Terciario tenga un recubrimiento máximo de 2000 m (Figura 40). Así, la posible formación almacén, elegida entre los materiales del Mesozoico, se situará a una profundidad no superior a los 2500 m. Hay que señalar que se ha optado por delimitar la profundidad de la base del Terciario a 2000 m, bajo una aproximación muy general, con el objetivo de no descartar de momento grandes áreas. Sin embargo, siendo más precisos, sería

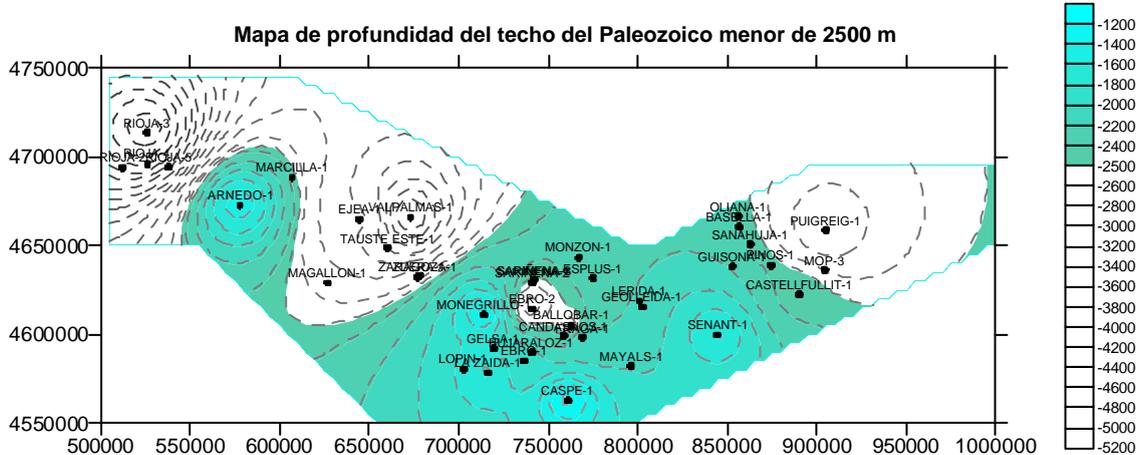


Figura 41. - Mapa de isobatas del techo del Paleozoico con una profundidad inferior a 2500 m.

aconsejable que la formación almacén estuviera situada entre los 800 y 1500 m de profundidad para optar a un almacenamiento viable, teniendo en cuenta el gradiente geotérmico y la presión hidrostática.

Por otra parte, aunque no es excluyente, parece lógico pensar que el techo del Paleozoico no debería estar a una profundidad mayor de 2500 m (Figura 41), para que la formación mesozoica seleccionada no se encontrara por debajo de esa cota. De esta forma delimitaríamos la profundidad máxima de la formación almacén a 2500 m.

Observando estos dos mapas, y siendo muy poco selectivo con las profundidades, la zona estudiada quedaría restringida a un área mucho menor, en concreto sería conveniente profundizar en el conocimiento del área localizada en torno al sondeo Arnedo-1, situado en la zona intermedia entre el sector occidental y central. En el sector central, en concreto, es de especial interés la zona delimitada por los sondeos Caspe-1, Lopín-1, Monegrillo-1, Lérida-1 y Mayals-1.

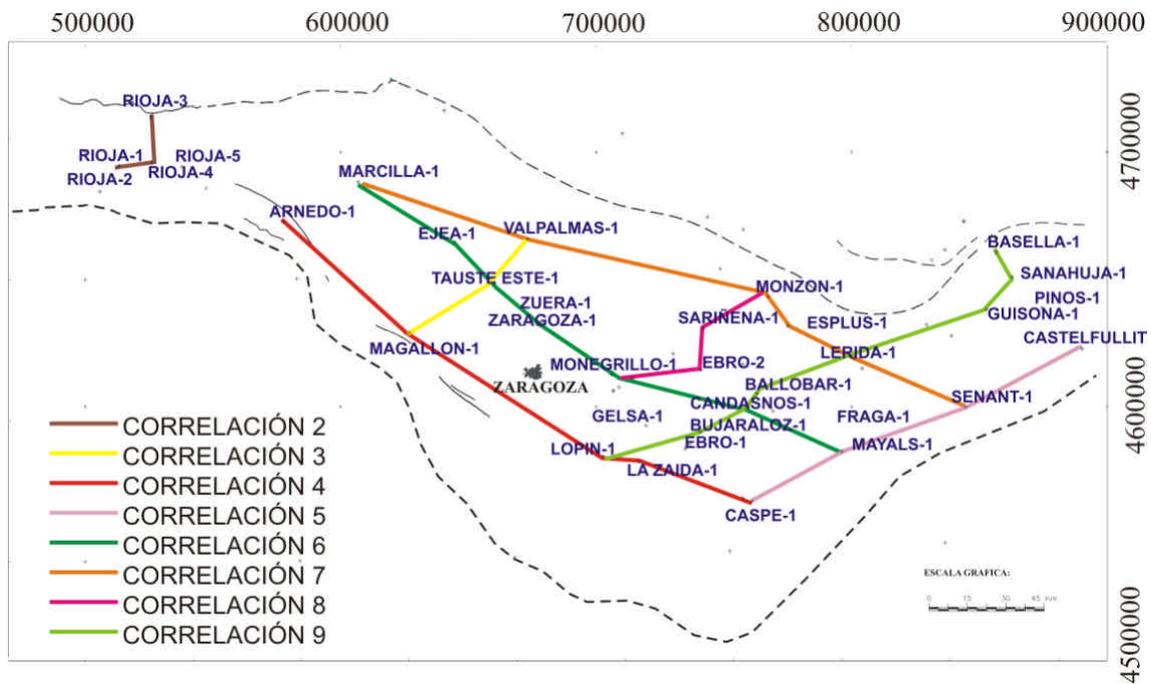


Figura 42.- Plano de posición de las correlaciones entre sondeos realizadas (Figuras 43 a 48).

Otro de los trabajos realizados con la información derivada de los sondeos de exploración ha sido la realización de correlaciones entre sondeos, con el fin de estudiar, independientemente de la profundidad de las formaciones, la continuidad lateral de las mismas. En la figura 42 se reflejan las ocho trazas de

las correlaciones realizadas. En este informe se reflejan seis de ellas, obviando la parte gráfica de las dos primeras (correlación 2 y 3), ya que no aportan información relevante para los objetivos perseguidos en este trabajo.

Por una parte, la correlación 2, que está realizada en el sector occidental entre los sondeos Rioja 2, 4 y 3, presenta poco interés de cara al almacenamiento, ya que en esta zona se presenta un recubrimiento terciario superior a los 2500 m. De hecho, alcanza los 3800 y 5100 m en los sondeos Rioja 4 y 3 respectivamente. Por otra parte, la correlación 3 entre los sondeos Magallón-1, Tauste Este-1 y Valpalmas-1 igualmente presenta un recubrimiento terciario de 2500-3000 m, situándose las formaciones mesozoicas de interés para este trabajo, por debajo de los 2500 m, por lo que tampoco se refleja en este informe.

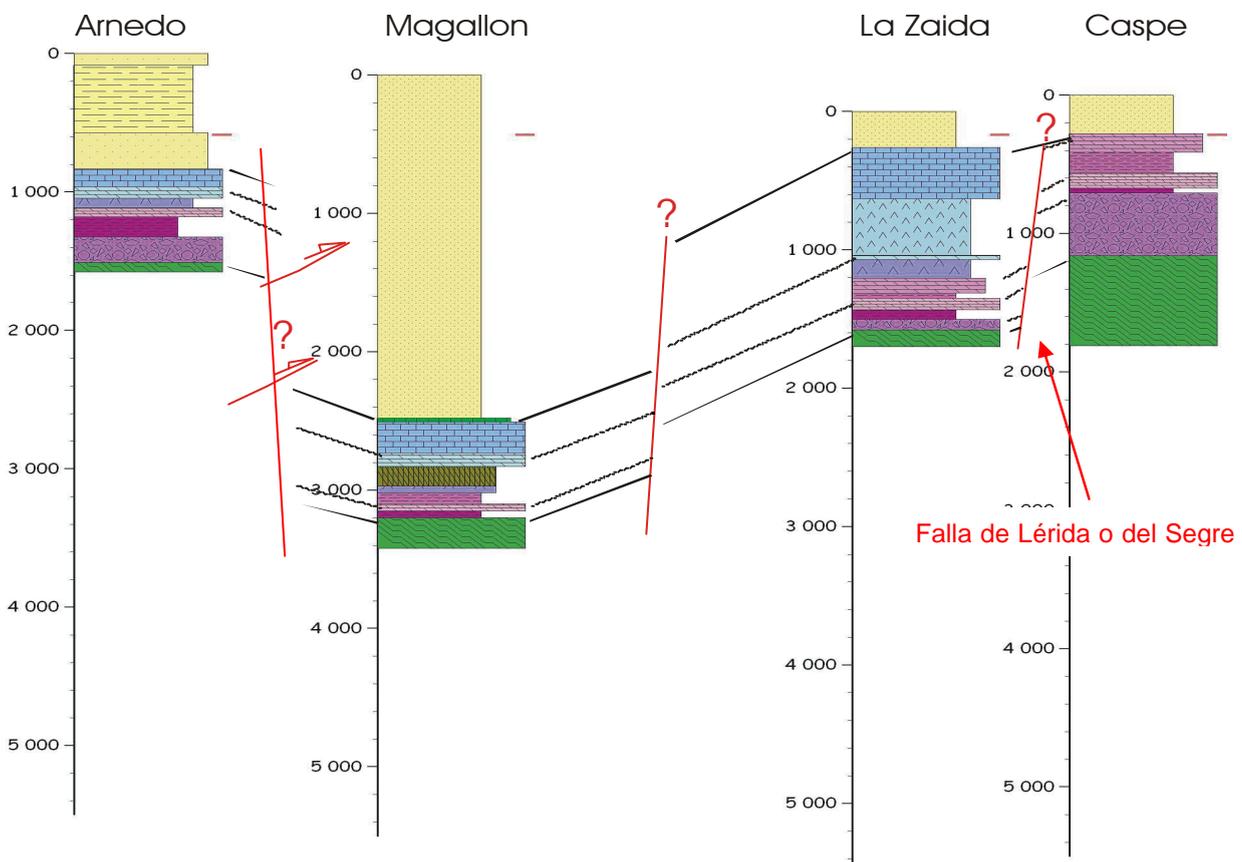


Figura 43.- Correlación 4 entre los sondeos Arnedo-1, Magallón-1, La zaida- 1 y Caspe-1.

En la correlación 4, entre los sondeos Arnedo-1, Magallón-1, La Zaida-1 y Caspe-1, (Figura 43), no se ha incluido el sondeo Lopín-1, ya que se encuentra muy próximo al sondeo La-Zaida-1 y no aporta una mayor información. Esta

correlación presenta una buena correspondencia entre las formaciones mesozoicas a unas profundidades aceptables de cara al almacenamiento, excepto en los sondeos Magallón-1, en donde las profundidades son excesivas y Caspe-1 en el que se cortan a los materiales mesozoicos a baja profundidad.

No obstante, el sondeo Caspe-1 debería ser considerado, si la formación almacén se situara en los términos siliciclásticos del Buntsandstein, teniendo como posibles sellos la formación Röt y M2.

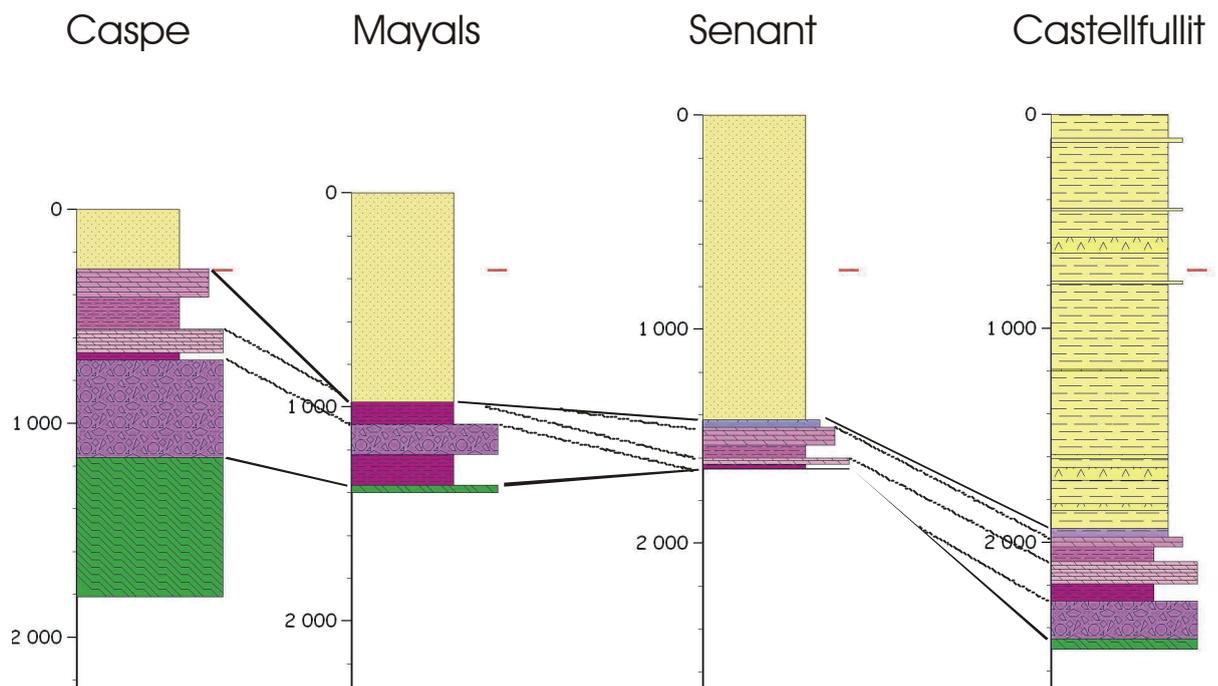


Figura 44 .- Correlación 5 entre los sondeos Caspe-1, Mayals-1, Senant-1 y Castellfullit-1.

La diferencia de profundidades entre La Zaida-1 y Caspe-1, así como la ausencia del Jurásico y Keuper en el sondeo Caspe-1 se explica por la proximidad a la falla de Lérida o del Segre, situada entre ambos sondeos. Por otra parte la diferencia de profundidades entre los sondeos Arnedo-1 y Magallón-1 están evidenciando una probable falla de salto importante, aunque no se descarta, dada su proximidad a la zona de cabalgamiento que limita con la Cordillera Ibérica, la existencia de fallas inversas que, de forma paralela, reproducen la dinámica del borde de la cuenca.

Así como la correlación 4 se sitúa próxima al borde ibérico, la correlación 5 (Figura 44) se sitúa hacia el límite con la Cadena Costero Catalana. En ella se

han correlacionado los sondeos Caspe-1, Mayals-1, Senant-1 y Castellfullit-1, evidenciando la transición entre el sector central y el oriental, y se observa cómo las formaciones mesozoicas tienen una considerable extensión lateral, aunque con algunas variaciones laterales de espesor. Además presentan un aumento de la profundidad hacia el sector oriental, lo que se pone en evidencia en el progresivo aumento de la profundidad, tanto de la base del Terciario como del Techo del Paleozoico hacia el sondeo Castellfullit-1.

La Correlación 6 (Figura 45), se sitúa a lo largo de una línea de dirección NE-SO que recorre prácticamente toda la cuenca, desde el sondeo Marcilla-1 hasta el sondeo Mayals-1. Esta correlación muestra como la base del Terciario va disminuyendo su profundidad hacia el sector central, siendo mínima en el sondeo Monegrillo-1 (~800 m), a partir del cual vuelve a profundizar hacia el sector oriental. El desarrollo de la serie mesozoica muestra una importante continuidad de los diferentes niveles definidos, pero con grandes variaciones de espesor. Los espesores máximos se detectan en Zuera-1 y Ballobar-1, sondeos que parecen estar separados de Monegrillo-1 por dos posibles fallas indicadas en la figura 45. A su vez, los sondeos Ballobar-1 y Fraga-1 están separados por la falla de Lérida o del Segre, lo que podría explicar la diferencia de cota en el techo del Paleozoico en ambos sondeos. Según esta correlación, las opciones de almacenamiento se configuran hacia el sector central, y en concreto a las formaciones mesozoicas identificadas en los sondeos Monegrillo-1, Ballobar-1, y Fraga-1. El Sondeo Zuera-1 presenta posibles formaciones muy interesantes para el almacenamiento, pero a unas profundidades en torno a los 3000 m, lo que se aparta de los objetivos de este trabajo.

La correlación 7 (Figura 46), que sigue un trazado a lo largo de la cuenca en dirección ENE-OSO, no muestra un gran interés para el almacenamiento, ya que en ella se observa que la zona NO del perfil presenta unos recubrimientos terciarios que sobrepasan los 2500 m, (sondeos Marcilla-1, Valpalmas-1 y Monzón-1). Únicamente las formaciones mesozoicas se encuentran a unas profundidades aceptables en los sondeos Lérida-1 y Senant-1, pero con una escasa potencia y sin la seguridad de poseer un sello continuo y fiable.

En la correlación 8 (Figura 47), según un perfil de tendencia SO-NE entre los sondeos Monegrillo-1 y Monzón-1, se observa, un aumento de la profundidad de los materiales terciarios hacia el NE (hasta aproximadamente 2500 m en el sondeo Monzón-1). Se define también una progresiva profundización del Paleozoico hacia el NE, en este caso en los sondeos Monegrillo-1 y Ebro-2. Se

observa también una disminución del espesor de los sedimentos mesozoicos hacia el SO, de tal forma que en el sondeo Monegrillo-1 las formaciones objeto de interés se sitúan entre unas profundidades de 1000 m y 1400 m, y presentan una potencia bastante reducida. No es así en los sondeos Ebro-2, Sariñena-1 y Monzón-1, en los que los sedimentos mesozoicos muestran una potencia considerable sin variaciones importantes de espesor, aunque presentan unas profundidades no siempre adecuadas.

Por último la correlación 9 (Figura 48), que sigue una línea de tendencia SO-NE entre los sondeos La Zaida-1 y Basella-1, nos muestra claramente la diferencia entre los sectores central y oriental, cuyo límite lo podríamos situar en torno a la falla de Lérida o del Segre. En los sondeos La Zaida-1, Ebro-1, Bujaraloz-1 y Ballobar-1 se observa un importante desarrollo de la serie mesozoica con un aumento del espesor de sedimentos y profundización de los mismos hacia el NE. A partir del sondeo Lérida-1, el cual está ubicado en un alto estructural, delimitado por dos accidentes estructurales a ambos lados (falla de Lérida al SO y otra probablemente paralela al NE), la serie mesozoica es prácticamente inexistente y la potencia de sedimentos terciarios aumenta notablemente hacia el NE (alcanza casi los 3700 m en el sondeo Basella-1). Estas observaciones nos ayudan a descartar casi definitivamente el sector oriental, debido al gran espesor de sedimentos terciarios y debido a la complejidad estructural que va adquiriendo la zona hacia el NE, dada su proximidad a estructuras de primer orden que delimitan, por el norte, la cuenca del Ebro.

La correlación 9 (Figura 48) nos muestra igualmente que la zona con mayores posibilidades de cara al almacenamiento se encuentra hacia el sur del sector central, en donde los materiales mesozoicos se presentan con una importante continuidad lateral, sin grandes cambios de espesor y con una progresiva y menor profundización hacia el SO (Sondeos La Zaida-1, Ebro-1, Bujaraloz-1 y Ballobar-1). La existencia de sellos continuos y fiables es también un importante argumento a favor a tener en cuenta.

Por último señalar que la posible existencia y confirmación de fallas, como la supuesta entre los sondeos Ebro-1 y Bujaraloz-1, debe estudiarse cuidadosamente en un futuro, en el caso de que se seleccione alguna de las formaciones presentes en esta serie como posible almacén.

Una vez analizados los sondeos uno a uno, establecidos los límites verticales posibles para el almacenamiento mediante los mapas de isobatas de la base

del Terciario y del techo del Paleozoico y analizada la continuidad lateral de las formaciones mesozoicas, así como sus posibles cambios de espesor, se llega a una serie de conclusiones sobre las posibilidades de almacenamiento en la cuenca del Ebro.

En el Sector Occidental (Zona Rioja), con los datos disponibles, no es posible contemplar un almacenamiento debido, principalmente, a la enorme potencia de sedimentos terciarios, los cuales no parecen presentar la idoneidad necesaria para este objetivo. Pero, además, existen otras razones, que se han puesto de manifiesto en la exploración realizada para hidrocarburos, como son: en primer lugar, la escasa porosidad y permeabilidad de los materiales atravesados por los sondeos, que está causada por intensos procesos de diagénesis; en segundo lugar, la existencia de duplicaciones en la columna estratigráfica de la serie cretácica debido a la existencia de fallas inversas, y en tercer lugar, la migración demostrada de hidrocarburos en el Terciario determinada por la existencia de indicios en el Oligoceno basal, lo cual nos indica la falta de estanqueidad de estos materiales.

En la zona límite entre los Sectores Occidental y Central debería estudiarse el entorno del sondeo Arnedo-1, que presenta un recubrimiento terciario anómalamente delgado, por lo que varios niveles mesozoicos podrían constituir buenos almacenes, al estar situados a una profundidad adecuada. La continuidad lateral de las formaciones mesozoicas atravesadas en el sondeo Arnedo-1 está condicionada, probablemente, por una estructuración que se materializa mediante rejuego de fallas no detectadas en superficie, y es un hecho que en el futuro debería estudiarse detenidamente.

El Sector Oriental presenta, al igual que el Sector Occidental, varios problemas. Por una parte, el espesor de sedimentos terciarios es importante, pudiendo llegar a 3000-3500 m, por ejemplo en los sondeos Basella-1 y Sanahuja-1. Por otra parte, la complejidad estructural derivada de su proximidad a la zona de cabalgamiento surpirenaico, implica grandes variaciones de espesor de la serie mesozoica y falta de continuidad lateral, así como duplicaciones de la serie que no aconsejan su elección como área favorable para albergar un posible almacenamiento.

El Sector Central, al SE de la línea Magallón-1-Tauste-Este-1-Monzón-1, parece presentar condiciones, *a priori*, idóneas para la elección de formaciones almacén. Por una parte, las profundidades que alcanzan los sedimentos

terciarios, parecen estar, en parte, en un rango adecuado. Por ejemplo los sondeos Lopín-1, La Zaida-1, Gelsa-1 y Caspe-1 presentan un escaso recubrimiento terciario, menor de 500 m, por lo que no todas las formaciones mesozoicas estarán a una profundidad adecuada (>800 m). Los sondeos Monegrillo-1, Bujaraloz-1, Ebro-1, Candanos-1 y Mayals-1 presentan un recubrimiento terciario comprendido entre 500 y 1000 m, por lo que las formaciones mesozoicas de interés tienen grandes posibilidades de encontrarse a unas profundidades muy adecuadas. En el resto de los sondeos: Ballobar-1, Ebro-2, Esplús-1, Fraga-1, Lérida-1, Sariñena-1, Senant-1, Zaragoza-1 y Zuera-1, los recubrimientos terciarios son mayores de 1000 m, y en el sondeo Monzón-1 el recubrimiento terciario es mayor de 2000 m.

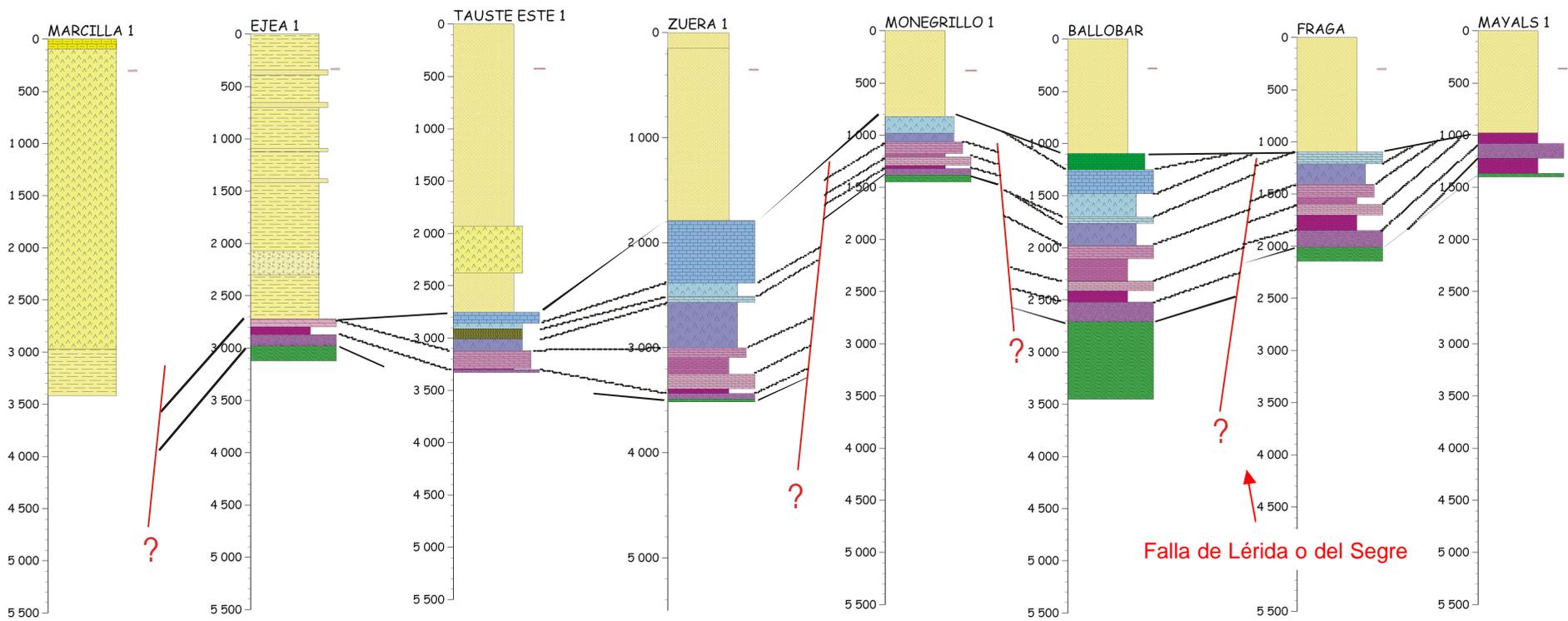
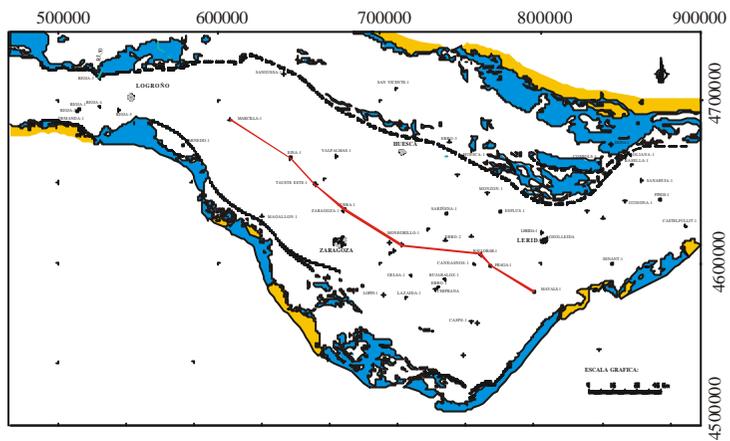


Figura 45.- Correlación 6, entre los sondeos Marcilla-1, Ejea-1, Tauste Este-1, Zuera-1, Monegrillo-1, Ballobar-1, Fraga-1 y Mayals-1.

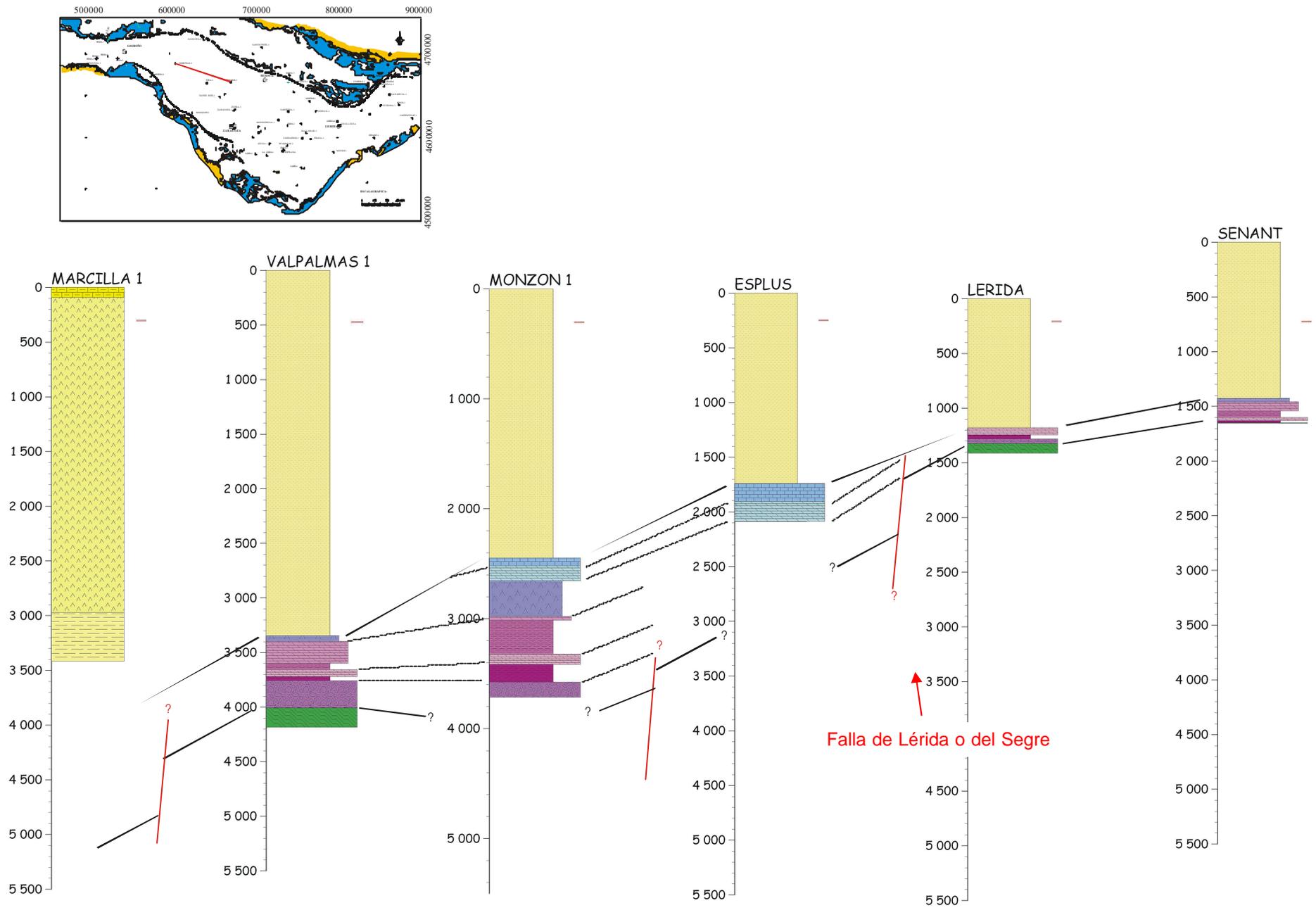


Figura 46. - Correlación 7, entre los sondeos Marcilla-1, Valpalmas-1, Monzón-1, Esplús-1, Lérida-1 y Senant-1.

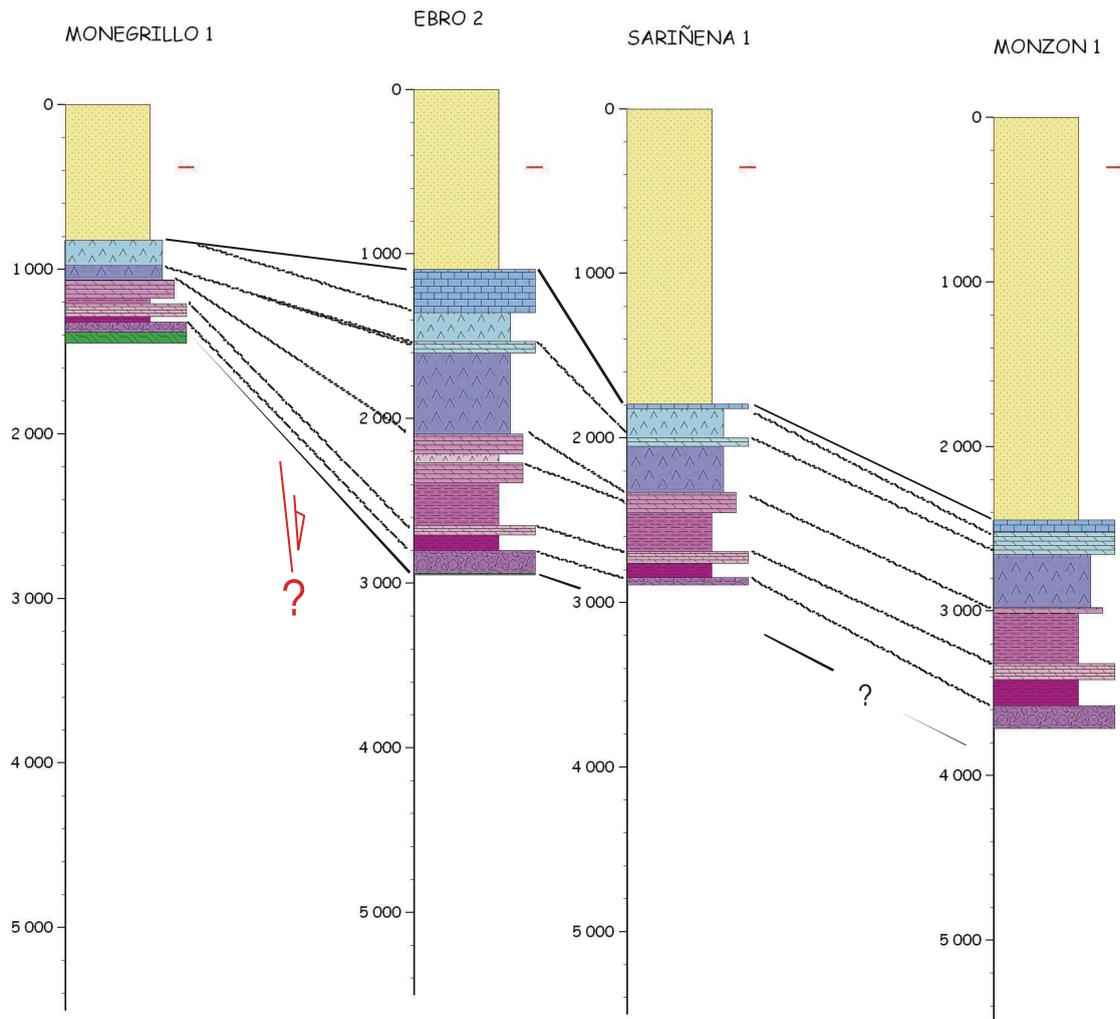
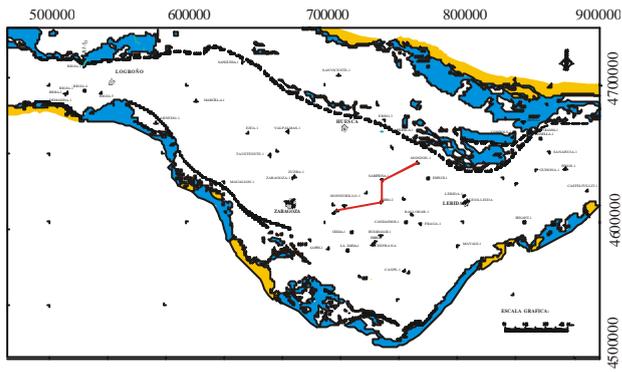


Figura 47. - Correlación 8, entre los sondeos Monegrillo-1, Ebro-2, Sariñena-1 y Monzón-1.

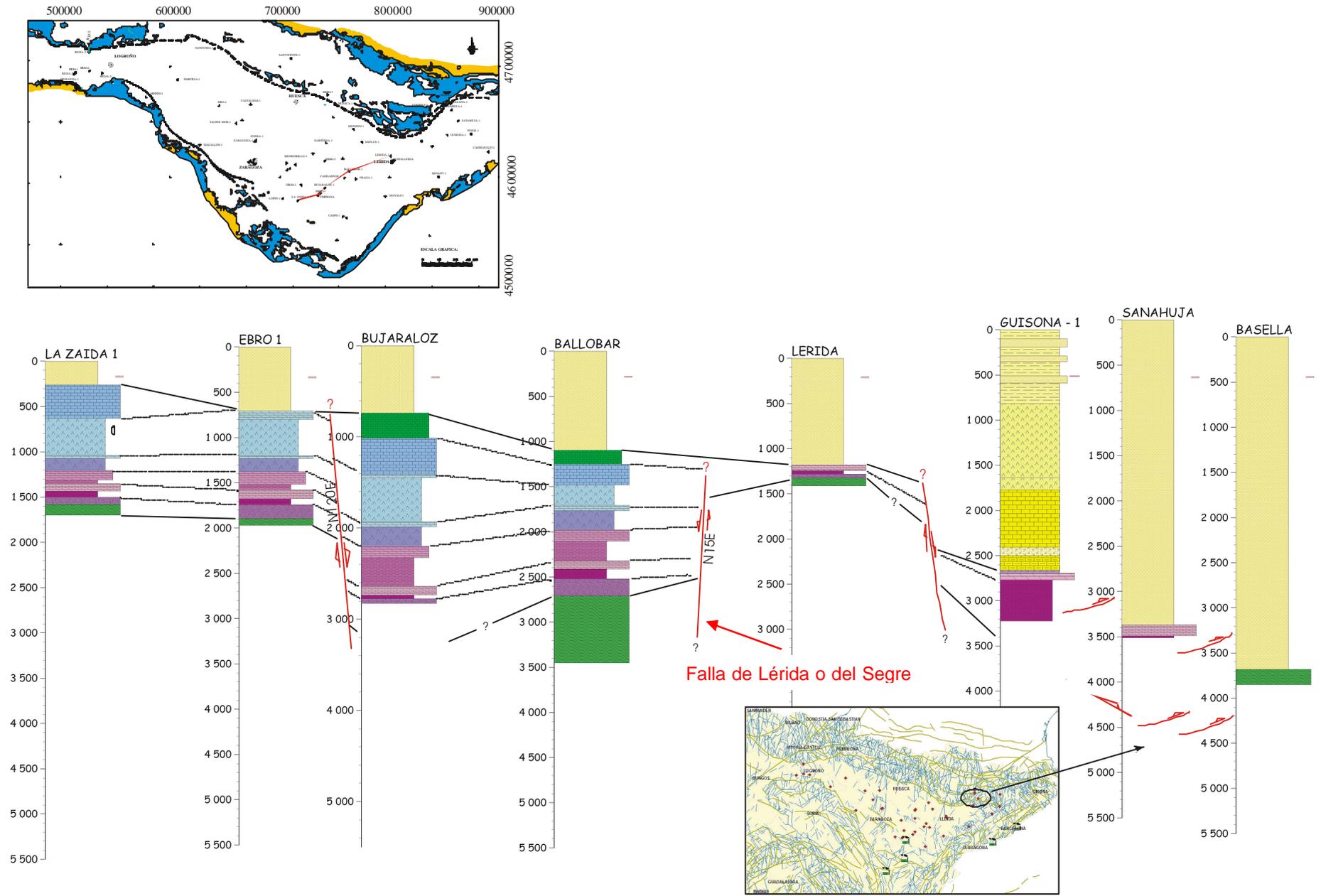


Figura 48. - Correlación 9, entre los sondeos La Zaida-1, Ebro-1, Bujaraloz-1, Ballobar-1, Lérida-1, Guisona-1, Sanahuja-1 y Basella-1.

Otra de las cuestiones más favorables dentro de este sector, independientemente de la profundidad, es la importante continuidad lateral de las diferentes formaciones mesozoicas atravesadas por los sondeos y que podrían constituir almacenes o sellos del almacenamiento.

Dentro de los materiales mesozoicos se han seleccionado como posibles almacenes las siguientes formaciones (Figura 49 y Tabla 11):

ALMACÉN A1: Areniscas, conglomerados y microconglomerados del Buntsandstein.

ALMACÉN A2: Dolomías de la base del Muschelkalk.

ALMACÉN A3: Dolomías del techo del Muschelkalk.

ALMACÉN A4: Calizas Retienses (Fm. Imón).

Se podría contemplar también aunque no a nivel regional la existencia de otro posible nivel almacén por encima del Retiense, el Jurásico podría contemplarse como potencial nivel almacén pese a la existencia de un Dogger complejo, por ejemplo en los sondeos Arnedo-1 y Ebro-2, en los cuales actuaría como sello los materiales arcillosos del Terciario.

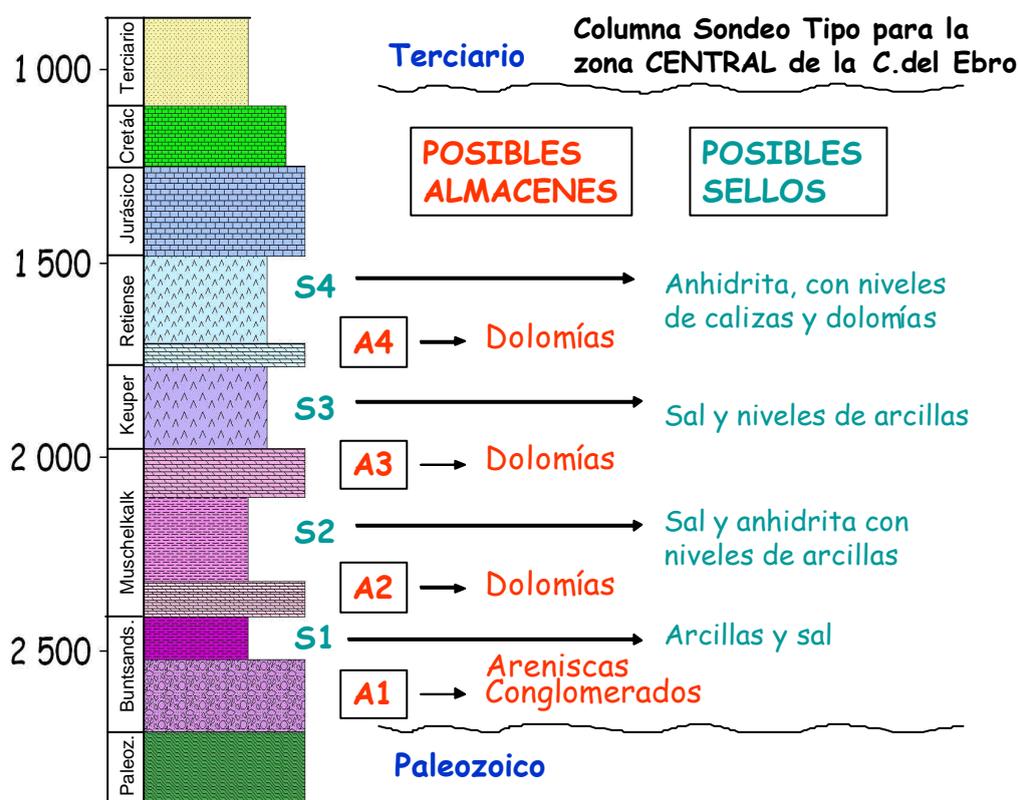


Figura 49. - Columna estratigráfica con las posibles formaciones almacén y sello identificadas en el Sector Central de la cuenca del Ebro. El espesor de los niveles definidos es un valor medio obtenido a partir de los datos de los sondeos de exploración de hidrocarburos.

Como posibles sellos se han definido las siguientes formaciones (Figura 49 y Tabla 11):

SELLO S1: Arcillas, anhidrita y sal del Buntsandstein

SELLO S2: Sal y anhidrita con niveles de arcillas del Muschelkalk

SELLO S3: Sal, anhidrita y niveles de arcilla del Keuper

SELLO S4: Anhidrita con niveles de calizas y dolomías del Jurásico Inferior-Retiense.

Raramente estas formaciones mesozoicas (excepto en el sondeo Arnedo-1) están ausentes y, generalmente, salvo duplicaciones por fallas inversas, se presentan en la sucesión normal (Figura 49), por lo que parece lógico pensar que, a iguales condiciones de almacenamiento (profundidad, espesor, porosidad etc.), siempre deberíamos inclinarnos hacia la elección del nivel de almacenamiento geológicamente más antiguo, ya que presentará un mayor número de sellos por encima que garantizarían su estanqueidad. Esto es, el Almacén A1, presentará como posibles sellos los niveles S1, S2, S3 y S4 a profundidades decrecientes, el almacén A2, presentará como sellos los niveles S2, S3 y S4, el almacén A3, presentará como sellos los niveles S3 y S4 y el almacén A4 únicamente presentará como posible sello el nivel S4 (Tabla 11).

De esta forma, por ejemplo, el almacén A1, con una potencia media ⁽¹⁾ de 126 m: con 153 m de potencia en el sondeo Ebro1, 161 m en Fraga-1, 77 m en La Zaida-1, 17 m en Lopín-1, 61 m en Monegrillo-1, 41 m en Lérida-1 y 140 m en Mayals-1 (Tabla 11), y a unas profundidades comprendidas entre 1100 y 1900 m en los sondeos citados, se presenta como un nivel de almacenamiento muy prometedor, no solo por la litología, profundidad y extensión, sino también por su estanqueidad, ya que presenta cuatro posibles sellos que lo aislarían de la superficie: S1 con una potencia media de 213 m, S2 con una potencia media de 223 m y S3 con una potencia media de 336 m y S4 con una potencia media de 367 m.

El Almacén A2, con potencia media de 78 m; con 99 m en el sondeo Ebro-1, 102 m en Fraga, 82 m en La Zaida-1, 55 m en Lopín-1, 80 m en Monegrillo-1 y 30 m en Senant-1, y a una profundidad media de 1200-1600 m, también presentaría alta fiabilidad por la presencia de tres sellos posibles (S2, S3 y S4) que lo aislaran de la superficie.

⁽¹⁾ Las potencias medias han sido calculadas a partir de las potencias de corte de los sondeos, teniendo en cuenta todos los sondeos que se reflejan en la tabla 11.

El Almacén 3 (Tabla 11) es el que probablemente presenta mayores posibilidades en cuanto a extensión. Se presenta con una potencia de 126 m en Ballobar-1 y Bujaroz-1, 140 m en Ebro-1, 296 m en Ebro-2, 126 m en Fraga-1, 120 m en Gelsa-1, 107 m en La Zaida-1, 102 m en Lopín-1, 111 m en Monegrillo-1, 123 m en Sariñena-1 y 84 m en Senant-1, siendo la potencia media es 126 m, a unas profundidades comprendidas entre 1000 y 2400 m. La fiabilidad de este almacenamiento, aún teniendo únicamente dos sellos posibles, es alta, ya que generalmente los materiales evaporíticos del Keuper, presente en todos los sondeos citados, se sitúan inmediatamente por encima con una potencia media de 336 m. Estos materiales pueden sobrepasar los 750 m, como por ejemplo en el sondeo Ebro-2. Uno de los problemas que puede plantear la inyección en este nivel de almacenamiento A3, y que se deberá estudiar detenidamente, es la posible conexión con otros sondeos próximos, en donde A3 aparece a muy poca profundidad, por ejemplo entre 277 y 364 m en el sondeo Caspe-1. En este caso, el CO₂ inyectado en el almacén A3 a una profundidad adecuada podría migrar a través de la formación, si no existiera algún impedimento, hacia profundidades menores.

El Almacén A4 tiene menor espesor: 59 m en el sondeo Ballobar-1, 25 m en Bujaroz-1, 56 m en Candasnos-1, 30 m en Ebro-1, 73 m en Ebro-2, 60 m en Gelsa-1, 32 m en La Zaida-1, 41 m en Lopín-1 y 49 m en Sariñena-1, posee una potencia media de 68 m y se sitúa a profundidades comprendidas entre los 1030 y 2050 m. Como nivel almacén posee un único sello de 367 m de potencia media que está presente en todos los sondeos citados, además del recubrimiento terciario. En los sondeos Esplús-1 y Monzón-1, este nivel de almacenamiento A4 aparece sin sello inmediatamente bajo las calizas del Jurásico, por lo que si se eligiera como posible nivel de almacenamiento, habría que estudiar cuidadosamente su conexión lateral, ya que se podría producir una migración del CO₂ hacia zonas desprovistas de cobertera-sello.

NOMBRE	ARNEDO-1	BALLOBAR-1	BUJARALOEZ-1	CANDASNOS-1	CASPE-1	EBRO-1	EBRO-2	ESPLUS-1	FRAGA-1	GELSA-1	LA ZAIDA-1	LERIDA-1	LOPIN-1	MAYALS-1	MONEGRILLO-1	MONZON-1	SARIÑENA-1	SENANT-1	ZARAGOZA-1	ZUERA-1
X30	577642.3758	762843.738	740777.3041	758735.661	760904.323	736509.682	740962.6391	774964.6654	769136.7513	719528.4432	716464.2697	800966.4853	702543.2788	796114.7055	714284.185	767216.4308	741842.0996	844569.9629	677011.1284	678137.6448
Y30	4672532.662	4605165.601	4590002.793	4599395.608	4562906.594	4585149.581	4614391.15	4631802.464	4598245.298	4592127.828	4578553.938	4618860.73	4580521.624	4582414.138	4611180.085	4643286.638	4630797.866	4599831.977	4632169.485	4633160.046
SUELO	580	276	340	279	280	328	467	242	296	245	162	202	224	356	374	297	349	719	336	348
PROF.	1576	3450	2825	1550	1810	1970	2950	2087	2143	2593	1698	1410	1652	1401	1447	3714	2893	1652	2252	3315
BASE TERC	834	1094	738	944	277	705	1935	1739	1095	485	258	1177	230	976	820	2446	1795	1423	1677	1788
PALEOZ.	1508	2706			1160	1893	2940		2011		1577				1381			1649		
Techo S4		1480	1450	1303		800	1355			1430	630		672				1820		2108	2385
Potencia S4		285	535	243		430	248			590	440		488				229			182
Techo A4	960	1706	1960	1490		1200	1530	1904		1960	1038		1119			2517	2000			2510
Muro A4	1045	1765	1985	1546		1230	1603	2085		2020	1070		1160			2655	2049			2567
Potencia A4	85	59	25	56		30	73	181		60	32		41			138	49			57
Techo S3	1045	1765	1985	1546		1230	1603	2085	1211	2020	1070		1160		978	2655	2049	1423		2567
Potencia S3	133	338	338			286	787		320	282	240		292		197	447	405	117		525
Techo A3		1977	2197		277	1376	2094		1405	2182	1203		1350		1064	2977	2331	1456		3000
Muro A3		2103	2323		364	1516	2390		1531	2302	1310		1452		1175	3102	2454	1540		3092
Potencia A3		126	126		87	140	296		126	120	107		102		111	125	123	84		92
Techo S2		2103	2323		364	1516	2390		1531	2302	1310		1452		1175	3102	2454	1540		3092
Potencia S2		307	411		197	158	317		170		122		163		113	313	306	90		240
Techo A2	1113	2320	2638		457	1575	2650		1599		1350	1177	1560		1208	3320	2689	1600		3250
Muro A2	1178	2410	2734		561	1674	2707		1701		1432	1243	1615		1288	3415	2760	1630		3332
Potencia A2	65	90	96		104	99	57		102		82	66	55		80	95	71	30		82
Techo S1	1178	2410	2734		561	1674	2707		1701		1432	1243	1615	976	1288	3415	2760	1630		3390
Potencia S1	330	296	91		599	219	233		310		145	78	37	244	93	299	133			97
Techo A1	1326	2520	2775		705	1740	2800		1850		1500	1280	1635	1080	1320	3575	2850			3435
Muro A1	1508	2706	2825		1160	1893	2940		2011		1577	1321	1652	1220	1381	3714	2893			3487
Potencia A1	182	186	50		455	153	140		161		77	41	17	140	61	139	43			52

Tabla 11 .- Profundidades de los diferentes niveles identificados en los sondeos seleccionados, en amarillo los niveles almacén y en verde los sellos.

7.- ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ROCA DISPONIBLE EN LOS ALMACENES SELECCIONADOS

La estimación del volumen de roca disponible para almacenamiento de CO₂ en cada uno de los niveles almacén seleccionados (A1, A2, A3 y A4) en el apartado anterior, es un paso imprescindible para poder calcular la capacidad real de almacenamiento de un nivel determinado. Esta capacidad real deberá calcularse con precisión cuando se dispongan, por una parte, de datos fiables de porosidad eficaz, y por otra, cuando se disponga de una modelización geométrica más precisa de las formaciones almacén y sello, que aportará datos más fiables de potencia y continuidad lateral de las formaciones.

Para la estimación del volumen de roca disponible para el almacenamiento se ha seguido un proceso de cubicación mediante la integración entre dos superficies dadas (techo y muro de la formación) y el posterior cálculo del volumen entre ellas. Este proceso está integrado en el paquete informático SURFER, que facilita enormemente el cálculo. El proceso que se ha seguido es el siguiente:

- Se toman los datos disponibles del techo y muro de la formación que se desea cubicar. Estos datos son aportados por las columnas analizadas de los sondeos, que nos permiten realizar un fichero en el que figura el nombre del sondeo, su posición mediante las coordenadas X e Y (UTM) en metros y cotas de la base y techo de la formación seleccionada.
- Con la posición y cotas del techo y muro de la formación seleccionada se realizan dos mallas mediante interpolación a malla regular. Una para cada superficie e independientes entre ellas. La elección del método de interpolación depende fundamentalmente de las características de los datos de entrada y de si existe alguna dirección preferente de entrada o salida de datos que limite la búsqueda en alguna dirección. El método de interpolación elegido en nuestro caso ha sido el de ajuste polinómico por mínimos cuadrados, sin ninguna restricción en cuanto a la dirección en el radio de búsqueda.

- Antes de la representación de cada una de las superficies halladas (techo y muro de la formación seleccionada), es necesario seguir un proceso de blanqueo de estas superficies, que consiste en poner los límites externos a partir de los cuales no son consideradas. Este proceso requiere un fichero con las coordenadas (X e Y, UTM) del polígono exterior que imponemos a las superficies. En este trabajo los ficheros de blanqueo impuestos son muy simples y se limitan a imponer un perímetro externo aproximado.
- El cálculo del volumen entre las dos superficies se realiza para cada una de las celdas de la malla. Cada una de éstas define un prisma del que conoceremos su volumen. Los métodos que emplea SURFER para el cálculo de volúmenes dentro de cada celda son: la Regla Trapezoidal y la Regla de Simpson. Aunque ésta última es más precisa, entre ellas no presentan variaciones importantes si las mallas originales son suficientemente densas. Para poder realizar el cálculo del volumen, las mallas que representan las superficies de techo y muro respectivamente tienen que ser exactamente iguales. Es decir, que ambas tengan el mismo número de filas y columnas y que sus límites (coordenadas XY dadas por el fichero de blanqueo) sean iguales.

Este proceso se resume para cada formación almacén seleccionada en las figuras 50, 51, 52 y 53. En ellas se presentan, por una parte, los mapas de isobatas del techo y del muro de cada una de las formaciones almacén y su perímetro de blanqueo, a partir del cual no se realizará ningún cálculo. Por otra parte, en la derecha de cada figura, se relacionan los datos numéricos relativos a esa formación. En primer lugar, los datos relativos a las superficies de techo y muro, esto es, tamaño de la malla, paso de malla, coordenadas X e Y (UTM) de los extremos de la malla y rango de profundidades abarcado por cada una de las superficies. En segundo lugar, entre los datos numéricos se relacionan aquellos relativos a los volúmenes calculados entre las dos superficies mediante los dos métodos citados anteriormente (Regla Trapezoidal y Regla de Simpson). En último término se reflejan los datos relativos a las áreas de las superficies, el área total, el área “blanqueada” y la posición relativa de una respecto a la otra.

En resumen, para el almacén A1 (Figura 50) se ha definido un área posible entre las coordenadas X (UTM en m) 660000 y 830000 e Y (UTM en m) 4550000 y 4680000, lo que define un área de 170 por 130 km o, lo que es lo mismo, un área de 22100 km². El rango de profundidades para A1, una vez

realizada la interpolación a malla regular, se establece entre 717 y 3567 m para el techo de la formación y entre 1169 y 3706 m para el muro. Todos los volúmenes calculados son positivos, lo que nos indica que ambas superficies nunca se cruzan y el volumen calculado para el almacén A1 es de $2.51\text{-}2.52 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

Para el almacén A2 (Figura 51) se ha definido un área posible entre las coordenadas X (UTM en m) 650000 y 930000 e Y (UTM en m) 4550000 y 4680000, lo que define un área de 280 por 130 km (a esta área se le ha restado la esquina inferior derecha) o, lo que es lo mismo, un área de 33150 km². El rango de profundidades para A2, una vez realizada la interpolación a malla regular, se establece entre 470 y 3312 m para el techo de la formación y entre 573 y 3407 m para el muro. Todos los volúmenes calculados son positivos y el volumen calculado para el almacén A2 es de $2.59 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

Para el almacén A3 (Figura 52), se ha definido un área posible entre las coordenadas X (UTM en m) 650000 y 900000 e Y (UTM en m) 4550000 y 4660000, lo que delimita un área de 250 por 110 km (a esta área se le ha restado algunas zonas marginales), lo que define un área total de 24400 km². El rango de profundidades para A3, una vez realizada la interpolación, se establece entre 289 y 2997 m para el techo de la formación y entre 377 y 3096 m para el muro. Todos los volúmenes calculados son positivos y el volumen total calculado para el almacén A3 es de $2.74\text{-}2.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

Para el almacén A4 (Figura 53) se ha definido un área posible entre las coordenadas X (UTM en m) 650000 y 800000 e Y (UTM en m) 4550000 y 4651000, lo que delimita un área de 150 por 101 km, con un total de de 15150 km². El rango de profundidades para A4, una vez realizada la interpolación, se establece entre 1041 y 2510 m para el techo de la formación y entre 1073 y 2648 m para el muro. Todos los volúmenes calculados son positivos y el volumen total calculado para el almacén A4 es de $9.8 \times 10^{11} \text{ m}^3$.

Esta estimación del volumen total de roca disponible permite evaluar la capacidad real de cada formación para almacenar CO₂, aunque en este caso de una forma muy aproximada, puesto que se parte de un cálculo de volumen total de roca aproximado debido a la falta de una modelización geométrica precisa de las formaciones. Además no se disponen de datos concisos de porosidad efectiva o útil.

Para realizar la estimación de capacidad $Q_{(A)}$ se ha partido del volumen total de roca disponible (V_R) para cada formación almacén, se ha supuesto una porosidad útil media (P) de un 15%, y se ha supuesto que el CO_2 es capaz de desplazar un 80% del agua contenida en los poros de la formación (D). Se ha supuesto también que la densidad del CO_2 en estado supercrítico (f_{CO_2}) está comprendida entre 600 y 700 $Kg\ m^{-3}$ para un gradiente geotérmico de $25^\circ C/km$ y una temperatura superficial de $15^\circ C$ (Bachu y Carroll, 2004).

$$Q_{(A)f} = V_R \cdot P \cdot D \cdot f_{CO_2}$$

$$Q_{(A1)600} = 2,51 \cdot 10^{12} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 600 = 180,72 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 1,80 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

$$Q_{(A1)700} = 2,51 \cdot 10^{12} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 700 = 210,84 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 2,10 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

$$Q_{(A2)600} = 2,59 \cdot 10^{12} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 600 = 186,48 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 1,86 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

$$Q_{(A2)700} = 2,59 \cdot 10^{12} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 700 = 217,56 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 2,17 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

$$Q_{(A3)600} = 2,74 \cdot 10^{12} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 600 = 197,28 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 1,97 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

$$Q_{(A3)700} = 2,74 \cdot 10^{12} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 700 = 230,16 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 2,30 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

$$Q_{(A4)600} = 9,80 \cdot 10^{11} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 600 = 70,56 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 0,70 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

$$Q_{(A4)700} = 9,80 \cdot 10^{11} \cdot 0,15 \cdot 0,80 \cdot 700 = 82,32 \cdot 10^{12} \text{ Kg} = 0,82 \cdot 10^5 \text{ MT}$$

Así, la capacidad calculada para el almacén A1 y para una densidad del CO_2 de $600\ kg\ m^{-3}$ es de $1,8 \cdot 10^5\ mT$, para una densidad de CO_2 de $700\ kg\ m^{-3}$ es de $2,10 \cdot 10^5\ mT$. Los almacenes A2 y A3 están aproximadamente en el mismo rango de capacidad, entre $1,8$ y $2,30 \cdot 10^5\ MT$, dependiendo de la densidad considerada, mientras que el almacén A4 presenta una capacidad de almacenamiento algo menor, entre $0,70$ y $0,80 \cdot 10^5\ MT$.

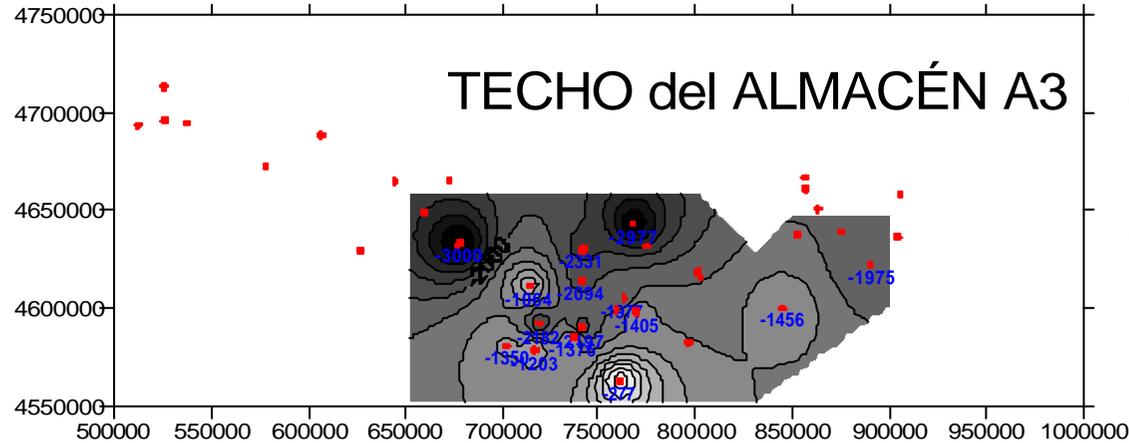
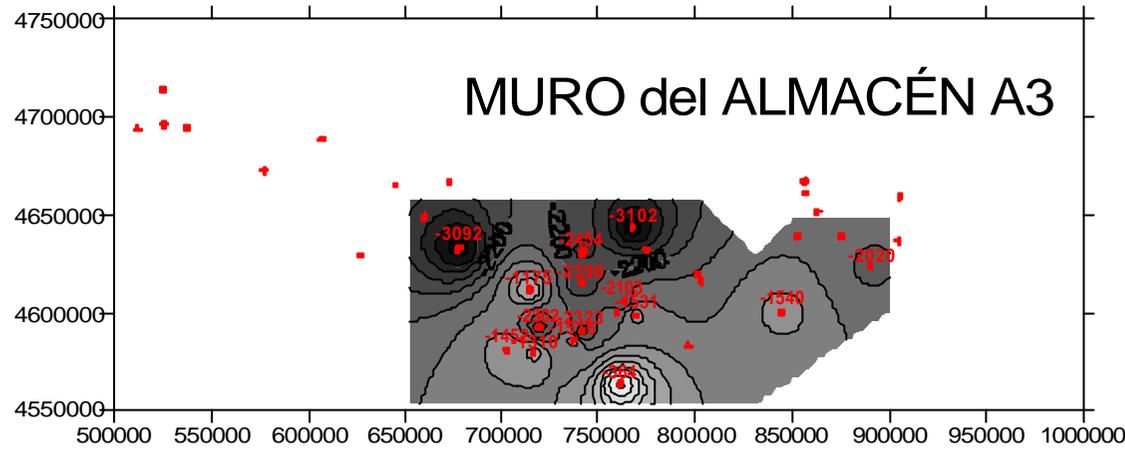


Figura 52. - Mapas de isobatas del techo y muro de la formación almacén A3 y estimación del volumen total de roca disponible para almacenamiento.

VOLUME COMPUTATIONS

UPPER SURFACE

Grid File: Techo A3 blanqueado.grd
 Grid size as read: 251 cols by 101 rows
 Delta X: 2000
 Delta Y: 2000
 X-Range: 500000 to 1000000
 Y-Range: 4550000 to 4750000
 Z-Range: -2997.43348632 to -289.812067592

LOWER SURFACE

Grid File: Muro A3 blanqueado.grd
 Grid size as read: 251 cols by 101 rows
 Delta X: 2000
 Delta Y: 2000
 X-Range: 500000 to 1000000
 Y-Range: 4550000 to 4750000
 Z-Range: -3096.46587756 to -377.203871235

VOLUMES

Approximated Volume by
 Trapezoidal Rule: 2.75307263739E+012
 Simpson's Rule: 2.74972703452E+012
 Simpson's 3/8 Rule: 2.75768409362E+012

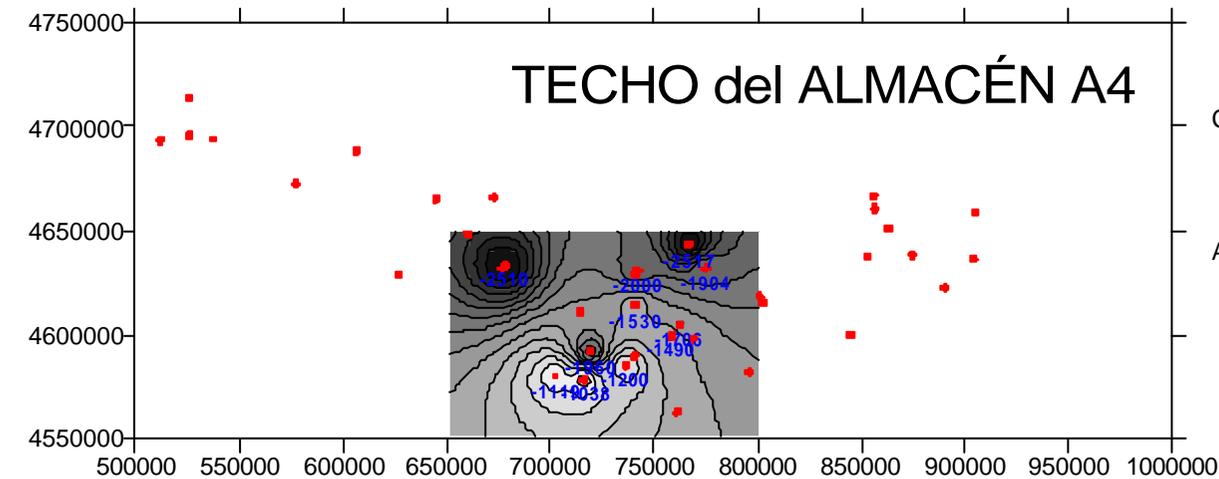
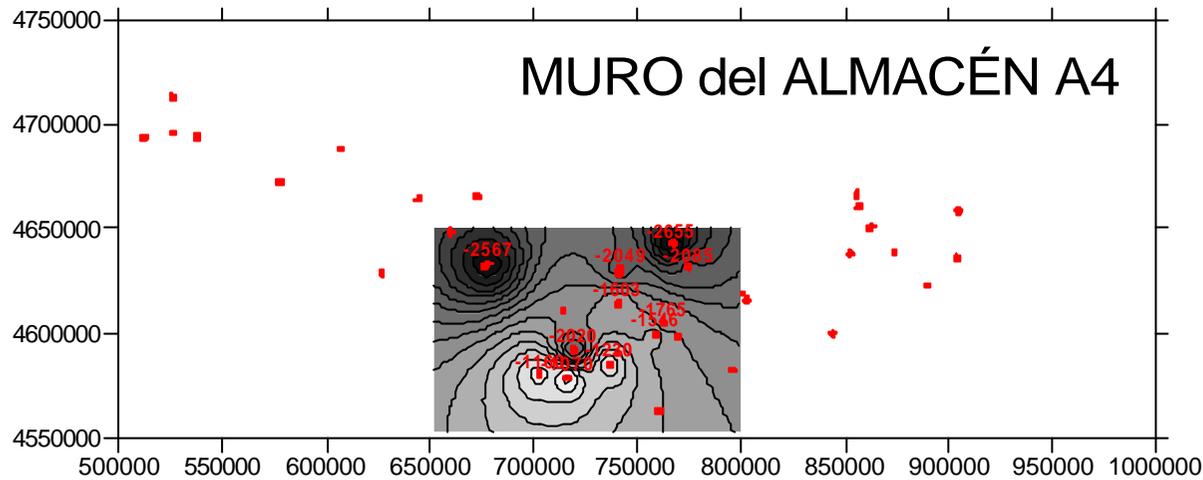
CUT & FILL VOLUMES

Positive Volume [Cut]: 2.75307263739E+012
 Negative Volume [Fill]: 0
 Cut minus Fill: 2.75307263739E+012

AREAS

Positive Planar Area
 (Upper above Lower): 23260000000
 Negative Planar Area
 (Lower above Upper): 0
 Blanked Planar Area: 76740000000
 Total Planar Area: 100000000000

Positive Surface Area
 (Upper above Lower): 23260046383.2
 Negative Surface Area
 (Lower above Upper): 0



VOLUME COMPUTATIONS

UPPER SURFACE

Grid File: Techo A4 blanqueado.grd
 Grid size as read: 251 cols by 101 rows
 Delta X: 2000
 Delta Y: 2000
 X-Range: 500000 to 1000000
 Y-Range: 4550000 to 4750000
 Z-Range: -2510.17878875 to -1041.50521091

LOWER SURFACE

Grid File: Muro A4 blanqueado.grd
 Grid size as read: 251 cols by 101 rows
 Delta X: 2000
 Delta Y: 2000
 X-Range: 500000 to 1000000
 Y-Range: 4550000 to 4750000
 Z-Range: -2648.07463587 to -1073.64307438

VOLUMES

Approximated Volume by
 Trapezoidal Rule: 988350299026
 Simpson's Rule: 981819425323
 Simpson's 3/8 Rule: 992815623529

CUT & FILL VOLUMES

Positive Volume [Cut]: 988350299026
 Negative Volume [Fill]: 0
 Cut minus Fill: 988350299026

AREAS

Positive Planar Area
 (Upper above Lower): 14504000000
 Negative Planar Area
 (Lower above Upper): 0
 Blanked Planar Area: 85496000000
 Total Planar Area: 100000000000

Positive Surface Area
 (Upper above Lower): 14504015908.5
 Negative Surface Area
 (Lower above Upper): 0

Figura 53. - Mapas de isobatas del techo y muro de la formación almacén A4 y estimación del volumen total de roca disponible para almacenamiento.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El trabajo que se presenta en este informe se integra en el Proyecto Singular Estratégico (PSE): "Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂", cuyo objetivo inmediato es definir, en el territorio nacional, aquellas cuencas, formaciones o estructuras geológicas con capacidad potencial de almacenar CO₂ de forma permanente, así como llevar a cabo una estimación preliminar de la capacidad total disponible. Este proyecto estratégico, a su vez, responde a la necesidad de tomar iniciativas que traten de reducir o evitar que el CO₂ antropogénico alcance la atmósfera.

Este informe se realiza con el objetivo concreto de seleccionar formaciones favorables para el almacenamiento geológico profundo de CO₂ en la cuenca del Ebro, que *a priori*, fue una de las áreas de la Península Ibérica seleccionada por cumplir con los criterios de favorabilidad establecidos a escala regional.

A menor escala, la cuenca del Ebro además cumple con otros criterios relacionados con la fracturación y sismicidad. Por una parte, presenta baja a muy baja densidad de fracturación, entre 0 y 10 fracturas /100 km², aunque ésta aumenta hacia los bordes de la cuenca, en relación con los lineamientos de primer orden que la limitan, y que están relacionados con las estructuras cabalgantes de Pirineos y de la Cordillera Ibérica.

Por otra parte, la cuenca del Ebro no parece presentar eventos sísmicos importantes en los registros disponibles, aunque tampoco se trata de una zona de nula actividad. Se han registrado eventos sísmicos ligados a los bordes de cuenca y a algunas estructuras de primer y segundo orden. Como el resto de la Península Ibérica, presenta una continuidad en el campo de esfuerzos actual en los últimos 9 millones de años, lo que proporciona un fundamento muy sólido para la predicción de posible actividad sísmica y para la estimación del peligro sísmico.

A escala de almacenamiento, la cuenca del Ebro ofrece amplias posibilidades en los términos litológicos siliciclásticos o carbonatados de la serie mesozoica, situada bajo el Terciario. Por una parte, las formaciones siliciclásticas presentes en los depósitos del Buntsandstein ofrecen la posibilidad de constituir un almacén en una roca con porosidad primaria considerable y una

serie de minerales reactivos que pueden favorecer el atrapamiento mineral, y por otra, las formaciones carbonatadas, más abundantes en la serie mesozoica (Muschelkalk, Jurásico y Cretácico), ofrecen la posibilidad de almacenar en una roca con una porosidad principalmente secundaria, en la que se favorecerán los procesos de disolución del CO₂, dándose un atrapamiento iónico.

Además, dentro de la serie mesozoica, se presentan potentes tramos de rocas evaporíticas y arcillosas en el Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper y Jurásico, que pueden actuar como sellos suprayacentes a las rocas almacén.

En este informe se ha presentado la descripción resumida de los sondeos utilizados, que provienen del Fondo Documental del Archivo de Hidrocarburos del IGME. Se han agrupado en tres sectores: el Sector Occidental (zona Rioja), el Sector Central y el Sector Oriental. Para el sector central de la cuenca del Ebro, el más prometedor de cara al almacenamiento, se ha definido una columna estratigráfica “tipo” que abarca los materiales del Terciario, los del Mesozoico y del Paleozoico.

Para la elección y estimación de la capacidad de las formaciones almacén, se ha partido del hecho de que, en principio, ni los materiales del Terciario ni los del Paleozoico presentan condiciones idóneas para el almacenamiento.

Por una parte, los materiales terciarios presentan frecuentes cambios laterales de facies y, en general, ausencia de sellos continuos y fiables que pudieran delimitar el almacenamiento. Por otra parte, los materiales del Paleozoico tampoco parecen adecuados para albergar un almacenamiento, dada su litología, elevada fracturación y baja porosidad primaria. La alta fracturación implica además la ausencia de sellos continuos y fiables. De cualquier forma, se debe tener en cuenta que los sondeos analizados para este trabajo, derivados de la exploración para hidrocarburos, no tuvieron por objetivo la exploración de los materiales paleozoicos, por lo que no disponemos de argumentos contundentes para descartar su idoneidad como roca almacén o sello de un futuro almacenamiento.

Para la selección de formaciones favorables dentro de la serie mesozoica se han realizado, en primer lugar, los mapas de isobatas de la base del Terciario y del techo del Paleozoico con el fin de delimitar las profundidades a las cuales podría estar ubicada la roca almacén.

El mapa de isobatas de la base del Terciario muestra una profundización del mismo hacia los sectores occidental y oriental, en los cuales estos materiales de relleno de la cuenca alcanzan valores máximos de 3500-4000 m, razón por la cual estas zonas son, *a priori*, descartadas para albergar un posible almacenamiento de CO₂.

El sector central presenta, prácticamente en toda su extensión, un espesor de sedimentos terciarios inferior a 2000 m, con un adelgazamiento general hacia el sur, existen zonas cuyo recubrimiento es menor de 500 m.

El mapa de isobatas del Paleozoico muestra una tendencia muy similar a la del Terciario, con un aumento de la profundidad del techo hacia los sectores occidental (más acusada) y oriental. Presenta una profundidad anómalamente baja en la zona de conexión entre los sectores occidental y central y una disminución de la profundidad de esta discordancia hacia el sur del sector central, en donde el Paleozoico se ha cortado a profundidades en torno a los 1100-1200 m.

En una primera aproximación, se han descartado las zonas en las que el Terciario presenta una potencia superior a los 2000 m, incluyendo una segunda condición, y es que el techo del Paleozoico no debería estar a una profundidad mayor de 2500 m, con lo que delimitamos la profundidad máxima de la formación almacén a 2500 m, siempre teniendo en cuenta que la profundidad óptima de almacenamiento se situaría entre los 800 y 1500 m para optar a un almacenamiento viable.

Otro de los trabajos realizados con la información derivada de los sondeos de exploración petrolera, ha sido la realización de correlaciones entre sondeos, con el fin de estudiar, independientemente de la profundidad de las formaciones, la continuidad lateral de las mismas.

La continuidad lateral de las formaciones mesozoicas es alta aunque se revelan, en algunos casos, importantes variaciones de espesor. Se pone de manifiesto en estas correlaciones la posible existencia de fallas que, en ocasiones, reproducen la dinámica del borde de la cuenca, afectando a la serie mesozoica y, en otras ocasiones, reproducen la dinámica de estructuras como la falla de Lérida, de dirección norteada.

Como conclusión con los datos que disponemos actualmente, no es posible contemplar un almacenamiento en el sector occidental (Zona Rioja), debido principalmente a la enorme potencia de sedimentos terciarios, los cuales no parecen presentar la idoneidad necesaria para este objetivo. Pero, además, existen otras razones, que se han puesto de manifiesto en la exploración realizada para hidrocarburos, como son: en primer lugar, la escasa porosidad y permeabilidad de los materiales atravesados por los sondeos, causada por intensos procesos de diagénesis; en segundo lugar, la existencia de duplicaciones en la columna estratigráfica de la serie cretácica debido a la existencia de fallas inversas, y por último, la migración demostrada de hidrocarburos en el Terciario determinada por la existencia de indicios en el Oligoceno basal, lo cual nos indica la falta de estanqueidad de estos materiales.

La zona límite entre los sectores occidental y central debe estudiarse detenidamente ya que presenta un recubrimiento terciario anómalamente delgado, por lo que varios niveles mesozoicos podrían constituir buenos almacenes, al estar situados a una profundidad adecuada. La continuidad lateral de las formaciones mesozoicas atravesadas en el sondeo Arnedo-1, puede estar condicionada por una estructuración materializada mediante rejuego de fallas no detectadas en superficie.

En el sector oriental, el espesor de sedimentos terciarios es importante, pudiendo llegar a 3000-3500 m de potencia, como ocurre en los sondeos Basella-1 y Sanahuja-1. Por otra parte, la complejidad estructural derivada de su proximidad a la zona de cabalgamiento surpirenaico, implica grandes variaciones de espesor de la serie mesozoica y falta de continuidad lateral, así como duplicaciones de la serie que no aconsejan su elección como área favorable para albergar un posible almacenamiento.

Las opciones de almacenamiento se configuran hacia el sector central y, en concreto, hacia el sur del sector central, en donde los materiales mesozoicos se presentan con una importante continuidad lateral, sin grandes cambios de espesor y con una progresiva y menor profundización hacia el SO (Sondeos La Zaida-1, Ebro-1, Bujaraloz-1 y Ballobar-1), también se deduce de este estudio la existencia de sellos suprayacentes, continuos y potentes.

Dentro de los materiales mesozoicos se han seleccionado como posibles almacenes las siguientes formaciones:

ALMACÉN A1: Areniscas, conglomerados y microconglomerados del Buntsandstein.

ALMACÉN A2: Dolomías de la base del Muschelkalk.

ALMACÉN A3: Dolomías del techo del Muschelkalk.

ALMACÉN A4: Calizas Retienses (Fm. Imón).

Y como posibles sellos las siguientes formaciones:

SELLO S1: Arcillas, anhidrita y sal del Buntsandstein

SELLO S2: Sal y anhidrita con niveles de arcillas del Muschelkalk

SELLO S3: Sal, anhidrita y niveles de arcilla del Keuper

SELLO S4: Anhidrita con niveles de calizas y dolomías del Jurásico Inferior-Retiense.

El almacén A1, de litología siliciclástica, tiene una potencia media de 126 m, con variaciones de espesor entre 17 m y 161 m en los sondeos estudiados. Se encuentra a una profundidad comprendida entre 1100 m y 1900 m y presenta cuatro sellos posibles que lo aislarían de la superficie: S1 con una potencia media de 213 m, S2 con una potencia media de 223 m y S3 con una potencia media de 336 m y S4 con una potencia media de 367 m. Sin limitación en el rango de profundidades, el volumen total de roca disponible para A1 es de $2.51-2.52 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

El Almacén A2, dolomítico, con potencia media de 78 m y variaciones de espesor entre 30 y 102 m, se encuentra a una profundidad comprendida entre 1200-1600 m y presenta tres sellos posibles que lo aislarían de la superficie S2, S3 y S4. Sin limitación en el rango de profundidades el volumen total de roca disponible para A2 es de $2.59 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

El Almacén 3, dolomítico, con 126 m de potencia media y variaciones de espesor entre 102 y 296 m se sitúa a una profundidad comprendida entre 1000 y 2400 m. Su fiabilidad es alta, ya que generalmente los materiales evaporíticos del Keuper se sitúan inmediatamente por encima, con una potencia media de 336 m. Este almacén A3 se puede presentar a muy poca profundidad, por ejemplo entre 277 y 364 m en el sondeo Caspe-1, con lo que podría producirse la migración del CO₂ inyectado hacia estas áreas menos profundas. Sin limitación en el rango de profundidades el volumen total de roca disponible para A3 es de $2.74-2.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

El Almacén A4, calcáreo, posee una potencia media de 68 m, con variaciones entre 25 y 73 m de potencia en los diferentes sondeos. Se sitúa a profundidades comprendidas entre los 1030 y 2050 m y posee un único sello

de 367 m de potencia media en los sondeos estudiados. En ocasiones este sello no aparece, con lo que se podría producir una migración del CO₂ hacia zonas desprovistas de cobertera-sello. Sin limitación en el rango de profundidades, el volumen total de roca disponible para A4 es de $9.8 \times 10^{11} \text{ m}^3$.

La estimación del volumen total de roca disponible, y suponiendo una densidad del CO₂ entre 600 y 700 kg m⁻³, permite evaluar la capacidad real de cada formación para almacenar CO₂, aunque, en este caso, de una forma muy aproximada ya que no se ha impuesto para este cálculo ninguna limitación en la profundidad:

$$\begin{array}{l}
 Q_{(A1)600} = 1,80 \cdot 10^5 \text{ MT}; Q_{(A1)700} = 2,10 \cdot 10^5 \text{ MT} \longrightarrow 0.2 \text{ GT} \\
 Q_{(A2)600} = 1,86 \cdot 10^5 \text{ MT}; Q_{(A2)700} = 2,17 \cdot 10^5 \text{ MT} \longrightarrow 0.2 \text{ GT} \\
 Q_{(A3)600} = 1,97 \cdot 10^5 \text{ MT}; Q_{(A3)700} = 2,30 \cdot 10^5 \text{ MT} \longrightarrow 0.2 \text{ GT} \\
 Q_{(A4)600} = 0,70 \cdot 10^5 \text{ MT}; Q_{(A4)700} = 0,82 \cdot 10^5 \text{ MT} \longrightarrow 0.08 \text{ GT}
 \end{array}$$

REFERENCIAS

- Alonso-Zarza, A.M., Armenteros, I., Braga, J.C., Muñoz, A., Pujalte, V., Ramos, E. (coords.), Aguirre, J., Alonso-Gavilán, G., Arenas, C., Baceta, J.I., Carballeira, J., Calvo, J.P., Corrochano, A., Fornós, J.J., González, A., Luzón, A., Martín, J.M., Pardo, G., Payros, A., Pérez, A., Pomar, L., Rodríguez, J.M. y Villena, J. (2002): Tertiary. En: *The Geology of Spain* (W. Gibbons y T. Moreno, Eds.), Geol. Soc. (London), 293-334.
- Angulo, A., Bracero, C. y Muñoz, A. (2000): Caracterización de las Unidades Tectosedimentarias de la Comarca de La Bureba (Burgos, España) y su correlación con las cuencas terciarias del Ebro y Duero. *Geotemas*, 1 (2): 19-23.
- Arenas, C. (1993): Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental). Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 858 p.
- Arenas, C., Millán, H., Pardo, G y Pocoví, A. (2001): Ebro Basin continental sedimentation associated with late compressional Pyrenean tectonics (north-eastern Iberia): controls on basin margin fans and fluvial systems. *Basin Research*, 13: 65-90.
- Arlegui, L.E. (1996): Diaclasas, fallas y campo de esfuerzos en el sector central de la cuenca del Ebro. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 650 p.
- Arlegui, L.E. y Simón, J.L. (1998): Reliability of paleostress analysis from fault striations in near multidirectional extension stress fields. Example from the Ebro Basin, Spain. *Jour. Struct. Geol.*, 20: 827-840.
- Arlegui, L.E. y Simón, J.L. (2001): Geometry and distribution of regional joint sets in a nonhomogeneous stress field: case study in the Ebro basin (Spain). *Jour. Struct. Geol.*, 23: 297-313.
- Arlegui, L.E., Soriano, A. y Simón, J.L. (1994): Un sistema regional de fracturas NW-SE en el Centro de la cuenca del Ebro. Com. III Congr. Grupo Español del Terciario, 39-43.
- Arnal, I., Calvet, F., Márquez, L., Márquez-Aliaga, A. y Solé de Porta, N. (2002): La plataforma carbonatada (Formaciones Imón e Isábena) del Triásico superior del Noroeste de la Península Ibérica. *Acta Geol. Hisp.*, 37: 299-328.
- Arnal, I., Calvet, F., Márquez, L., Solé de Porta, N. y Trifonova, E. (1994): Estratigrafía y sedimentología de la Formación Isábena (Retiense), Pirineos centrales y orientales. III Col. *Estratigr. Paleogeogr. Pérm. Trias. Esp.*, Resúmenes: 11-12.
- Bachu, S y Carroll, J.J., (2004) In situ phase and thermodynamic properties of resident brine and acid gases (CO₂ and H₂S) injected into geological formations in western Canada, In: *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologie*. Vol. 1: Peer-reviewed Papers and Plenary Presentations, Vancouver, BC, September 5-9, 2004.
- Calvet, F (1989): Sistemas de rampas carbonatadas del Triásico medio, Catalánides NE España. XII Congr. Esp. Sedim., 43-53.
- Calvet, F. y Anglada, E. (1987): El Triásico del Pirineo: Análisis estratigráfico, cronoestratigráfico y sedimentológico. Informe, IGME, 96 p.
- Calvet, F., March, M. y Pedrosa, A. (1987): Estratigrafía, sedimentología y diagénesis del Muschelkalk superior de los Catalánides. *Cuad. Geol. Ibérica*, 11: 171-197.
- Calvet, F., Solé de Porta, N. y Salvany, J.M. (1993): Cronoestratigrafía (Palinología) del Triásico Sudpirenaico y del Pirineo Vasco-Cantábrico. *Acta Geol. Hisp.*, 28, 4: 33-48.
- Cámara, P. (1997): The Basque-Cantabrian basin's Mesozoic tectono-sedimentary evolution. *Mém. Soc. Géol. France*, 171: 187-191.
- Cámara, P y Klimowitz, J. (1985): Interpretación geodinámica de la vertiente centro-occidental surpirenaica (cuencas de Jaca-Tremp). *Estudios Geol.*, 41: 391-404.
- CIEMAT (2006): Almacenamiento Geológico de CO₂: Criterios de selección de emplazamientos. IRuiz, C., Recreo, F., Prado, P., Campos, R., Pelayo, M., de la Losa, A., Hurtado, A., Lomba, L., Pérez del Villar, L., Martínez, R., Ortiz, G., Sastre, J. (2007- V2). Informe Técnico CIEMAT 1085, 99 pp.

- Cortés, A.L. (1999): Evolución tectónica reciente de la Cordillera Ibérica, cuenca del Ebro y Pirineo centro-occidental. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 409 p.
- Cortés, A.L. y Casas Sainz, A.M. (2000): Una nueva hipótesis para el sistema de fosas interiores de la Cordillera Ibérica. *Geotemas*, 1: 59-62.
- CSN (1998): Proyecto SIGMA: Análisis del estado de esfuerzos tectónicos reciente y actual en la Península Ibérica. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección Otros Documentos, 10.1998, 239 p.
- CSN (2006): Proyecto PRIOR: Determinación de Fallas de Primer Orden mediante análisis integrado de datos geológicos. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección Otros Documentos. 312pp.
- De Vicente, G. Stich, D. Giner, J. Muñoz Martín, A. Morales, J (2004).: Tectónica activa y sismotectónica del antepaís Ibérico. En: Vera Ed. *Geología de España*:. Cap. 7: Estructura alpina del antepaís Ibérico. P 587.
- García-Castellanos, D., Vergés, J., Gaspar-Escribano, J. y Cloetingh, S. (2003): Interplay between tectonics, climate and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia). *Jour. Geophys. Res.*, 108, B7, 2357, doi:10.1029/2002JB002073.
- Garrido-Megías, A. (1973): Estudio geológico y relación entre tectónica y sedimentación del Secundario y Terciario de la vertiente meridional pirenaica en su zona central (Provincias de Huesca y Lérida). Tesis Doctoral, Univ. Granada, 395 p.
- Garrido-Megías, A. y Ríos, L.M. (1972): Síntesis geológica del Secundario y Terciario entre los ríos Cinca y Segre (Pirineo Central de la vertiente surpirenaica, provincias de Huesca y Lérida). *Bol. Geol. Min.*, 83: 1-47.
- Gisbert J., Martí J. y Gascón F. (1985): Guía de la excursión al Stephaniense, Pérmico y Triásico inferior del Pirineo catalán. II Col. de Estratigrafía y Paleogeografía del Pérmico y Triásico de España. La Seu d'Urgell, 79 p.
- González, A. (1989): Análisis tectosedimentario del Terciario del borde SE de la Depresión del Ebro (sector bajoaragonés) y Cubetas Ibéricas Marginales. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 507 p.
- ITGE (1990): Documentos sobre la Geología del subsuelo de España. Tomo VI: Ebro-Pirineos. Madrid, 36 p, 49 planos.
- Klimowitz, J. (1992): Estratigrafía y disposición estructural del Terciario inferior en el subsuelo del sector central de la cuenca del Ebro. *Acta Geol. Hisp.*, 27: 117-125.
- Klimowitz J. y Torrecusa, S. (1990): Nota sobre la estratigrafía y facies de la serie triásica en el Alóctono Surpirenaico. En: Formaciones evaporíticas de la cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la Zona de Levante (F. Orti y J.M. Salvany, Eds.), ENRESA – GPPG, Univ. Barcelona: 29-33.
- Lanaja, J.M., Querol Muller, R y Navarro Alvargonzález, A. (1987): Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la Geología de España. IGME, Madrid, 465 p.
- Luzón, A. (2001): Análisis Tectosedimentario de los materiales terciarios continentales del sector central de la cuenca del Ebro (provincias de Huesca y Zaragoza). Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 465 p.
- Luzón, A. y González, A. (2000): Sedimentology and evolution of a Paleogene-Neogene Shallow carbonate lacustrine system, Ebro basin, northeastern Spain. En: *Lake basins through space and time* (E.H. Gierlowski-Kordesch y K.R. Kelts, Eds.), Amer. Assoc. Petrol. Geol., *Studies in Geology*, 46: 407-416.
- Luzón A., González, A., Muñoz, A. y Sánchez-Valverde, B. (2002): Upper Oligocene-Lower Miocene shallowing-upward lacustrine sequences controlled by periodic and non-periodic processes (Ebro Basin, northeastern Spain). *Jour. Paleolimnology*, 28: 441-456
- Muñoz, A. (1993): Análisis del Pérmico y Triásico en el subsuelo del tercio noroccidental de la Cordillera Ibérica y áreas adyacentes. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 374 p.
- Muñoz, A. (1992): Análisis tectosedimentario del Terciario del sector occidental de la cuenca del Ebro (Comunidad de La Rioja). *Inst. Estudios Riojanos, Logroño. Ciencias de la Tierra*, 15, 347 p.
- Muñoz, A., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Pardo, G., Pérez, A. y Villena, J. (2002): Ebro Basin (northeastern Spain). En: *The Geology of Spain* (W. Gibbons y T. Moreno, Eds.), *Geol. Soc. (London)*, 301-309.

- Muñoz-Jiménez, A. y Casas Sainz, A.M. (1997): The Rioja Trough (N Spain), tectosedimentary evolution of a symmetric foreland basin. *Basin Research*, 9: 65-85.
- Nelms et al., (2004): Evaluation of oil reservoir characteristics to Asses North Dakota Carbon Dioxide miscible flooding potential. 12th Williston Basin Horizontal Well and Petroleum Conference. Minoth, North Dakota.
- Pardo, G. Arenas, C. González, A. Luzón, A. Muñoz, A. Pérez, A. Pérez-Rivarés, FJ. Vázquez-Urbez. M. y Villena, J. (2004): La cuenca del Ebro. En: Vera Ed. *Geología de España*:. Cap. 6: Cuenas Cenozoicas. 533-542pp.
- Pérez, A. (1989): Estratigrafía y sedimentología del Terciario del borde meridional de la Depresión del Ebro (sector riojano y aragonés) y cubetas de Muniesa y Montalbán. Tesis Doctoral, Univ. Zaragoza, 525 p.
- Pérez, A., Azanza, B., Cuenca, G., Pardo, G. y Villena, J. (1985): Nuevos datos estratigráficos y paleontológicos sobre el Terciario del borde meridional de la Depresión del Ebro (provincia de Zaragoza). *Estudios Geol.*, 41: 405-411.
- Puigdefàbregas, C., Muñoz, J.A., y Vergés, J., (1992): Thrusting and foreland basin evolution in the Southern Pyrenees. En: *Thrust Tectonics* (K.R. McClay, Ed.), Chapman & Hall, Londres, 247-254.
- Puigdefàbregas, C. y Soler, M. (1973): Estructura de las Sierras Exteriores Pirenaicas en el corte del río Gallego (provincia de Huesca). *Pirineos*, 109: 5-15.
- Puigdefàbregas, C. y Souquet, P. (1986): Tecto-sedimentary cycles and depositional sequences of the Mesozoic and Tertiary from the Pyrenees. *Tectonophysics*, 129: 173-203.
- Quirantes, J. (1978): Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario Continental de los Monegros. Publicación 681. Institución Fernando el Católico, Zaragoza 2007.
- Ramón, X. Aurell, M. y Meléndez, G. (1992): Stratigraphy and associated unconformities in the Middle to Upper Jurassic on the south central Pyrenees, Spain. II Congr. Geol. España, Simposios, 2: 161-167.
- Riba, O., Reguant, S. y Villena, J. (1983): Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. En: *Geología de España*. Libro Jubilar J.M. Ríos (J.A. Comba, Coord.), IGME, Madrid, 2: 131-159.
- Robador, A. y García-Senz, J. (2004): El Cretácico inferior de la vertiente surpirenaica. En: Vera ed. *Geología de España*. Cap. 3: La cordillera pirenaica. Pp 285.
- Salvany, J.M. (1986): El Keuper dels Catalànids. *Petrologia i sedimentologia*. Tesis de Licenciatura, Univ. Barcelona, 128 p.
- Salvany, J.M. (1989): Los sistemas lacustres evaporíticos del sector Navarro-Riojano de la cuenca del Ebro. *Acta Geol. Hisp.*, 24: 231-241.
- Salvany, J.M. (1990): Introducción a las evaporitas triásicas de las cadenas periféricas de la cuenca del Ebro: Catalánides, Pirineo y Región Cantábrica. En: *Formaciones evaporíticas de la cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la Zona de Levante* (F. Ortí y J.M. Salvany, Eds.). ENRESA- Univ. Barcelona: 9-20.
- Salvany, J.M. y Bastida, J. (1994): Características litoestratigráficas de las facies Keuper de la Zona Surpirenaica entre los ríos Segre y Noguera Ribagorzana (provincia de Lléida). III Col. *Estratigr. Paleogeogr. Pérmico y Triásico de España*, Cuenca, 111-112.
- Salvany J.M. y Bastida, J. (2004): Análisis litoestratigráfico del Keuper surpirenaico central. *Rev. Soc. Geol. España*. 17: (en prensa).
- Séguret, M. (1972): Étude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. Caractère sedymentaire, rôle de la compression et de la gravité. Tesis Doctoral, Univ. Montpellier, 155 p.
- Séguret, M., Labaume, P. y Madariaga, R. (1984): Eocene seismicity in the Pyrenees from megaturbidites of the South Pyrenean Basin (Spain). *Mar. Geol.*, 55: 117-131.
- Sopeña, A., López, J., Arche, A., Pérez-Arlucea, M., Ramos, A., Virgili, C. y Hernando, S. (1988): Permian and Triassic rift basins of the Iberian Peninsula. En: *Triassic-Jurassic rifting continental breakup and the origin of the Atlantic Ocean and Passive Margins*. Part B, (W. Manspeizer, Ed.), *Developments in Geotectonics*, Elsevier, 757-786.
- Souquet, P. (1986): Els Pirineus (Jurásic). En *Historia Natural de Paisos Catalans*, I. *Geología* (P.Santanach, coord.) *Enciclopedia Catalana*, S.A. Barcelona I: 307-320.

- Vargas, H. (2002): Análisis y comparación de la subsidencia entre las cuencas Ibérica y Ebro central durante el pérmico y triásico y su relación con el relleno sedimentario. Tesis Doctoral. UCM.
- Vergés, J. (1993): Estudi geològic del vessant sud del Pirineu oriental i central. Evolució cinemàtica en 3D. Tesis Doctoral, Univ. Barcelona, 203 p.
- Vergés, J. (2003): Evolución de los sistemas de rampas oblicuas de los Pirineos meridionales: fallas del Segre y Pamplona. Bol. Geol. Min., 114: 87-101.
- Vergés, J., Fernández, M. y Martínez, A. (2002): The Pyrenean orogen: pre- syn- and post-collisional evolution. Journal of the Virtual Explorer, 8: 57-76.
- Vergés, J. y Martínez, A. (1988): Corte compensado del Pirineo oriental: Geometría de las cuencas de antepaís y edades de emplazamiento de los mantos de corrimiento. Acta Geol. Hisp., 23: 95-106.
- Vergés, J., Muñoz, J.A. y Martínez, A. (1992): South Pyrenean fold and thrust belt: The role of foreland evaporitic levels in thrust geometry. En: Thrust Tectonics (M.R. McClay, Ed.), Chapman & Hall, Londres, 255-264.
- Villena, J., Pardo, G., Pérez, A., Muñoz, A. y González, A. (1996a): The Tertiary of the Iberian margin of the Ebro basin: sequence stratigraphy. En: Tertiary Basins of Spain, (P.F. Friend y C.J. Dabrio Eds.), Cambridge Univ. Press, 77-82.
- Villena J., Pardo, G., Pérez, A., Muñoz, A. y González, A. (1996b): The Tertiary of the Iberian margin of the Ebro basin: paleogeography and tectonic control. En: Tertiary Basins of Spain (P.F. Friend y C.J. Dabrio, Eds), Cambridge Univ. Press, 83-88.
- Virgili, C., Sopeña, A., Ramos, A., Arche, A. y Hernando, S. (1983): El relleno posthercínico y el comienzo de la sedimentación mesozoica. En: Libro Jubilar J.M. Ríos (J.A. Comba Coord.), Geología de España. IGME, Madrid, 25-36.