



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Caracterización Geológica y Petrofísica Mediante Adquisición e Interpretación de Diagrafías en Formaciones con Potencial como Sello y Almacén de CO₂ en Cuencas de la Península Ibérica

Ana Isabel López Barrera

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Caracterización Geológica y Petrofísica Mediante Adquisición e Interpretación de Diagrafías en Formaciones con Potencial como Sello y Almacén de CO₂ en Cuencas de la Península Ibérica

Ana Isabel López Barrera

Tesis Doctoral

Barcelona, 2015

Directores:

Beatriz Benjumea Moreno

José Luíz García-Lobón

*Unitat de Tècniques Geofísiques.
Institut Cartogràfic i Geològic de
Catalunya (ICGC).*

*Área de Investigación del Subsuelo y
Almacenamiento Geológicos.
Instituto Geológico y Minero de
España (IGME)*

Tutor:

Alejandro Marcuello Pascual

*Departament de Geodinàmica i
Geofísica (UB).*

Esta tesis ha sido realizada gracias a la beca predoctoral FPI del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), BOE-A-2009-3569.

La parte final de la tesis ha sido llevada a cabo gracias al convenio específico de cooperación formativa entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Institut Geològic de Catalunya (IGC) para la dirección conjunta de la misma.

IN MEMORIAM

A Susa, porque hay ángeles que a veces no tienen alas...Uno, hace tiempo, ya sí.

Agradecimientos

Quiero expresar, en primer lugar, mi más sincera y enorme gratitud a la persona que ha hecho posible sacar este proyecto adelante hasta su culminación, mi directora de tesis, Beatriz Benjumea. Gracias por tener tanta paciencia y haber confiado en mí, cediendo siempre generosa, humilde y amablemente tu valioso y escaso tiempo.

En segundo lugar, agradezco al IGME la financiación de esta tesis a través de la beca que me fue concedida, así como el apoyo recibido a lo largo de 4 años. Quiero agradecer muy especialmente a mi director de tesis, José Luís García-Lobón, la confianza depositada tanto a nivel profesional como personal, y su siempre disponibilidad a pesar de la distancia.

Al ICGC, y en concreto a todas las personas de la *Unitat de Tècniques Geofísiques*, les doy las gracias por haberme aceptado en la parte más decisiva de esta tesis y haberme hecho sentir como una más de su equipo, en especial a Sara Figueras y Anna Gabàs, que siempre han tenido palabras amables de ánimo.

Gracias por su apoyo a mi tutor de tesis de la UB, Alejandro Marcuello. A Juan Diego Martín también le quiero expresar mi enorme gratitud por haberme prestado altruistamente su tiempo, sus conocimientos en el estudio de láminas delgadas y su siempre amabilidad.

Debo agradecer al Instituto Jaume Almera el haber propiciado el inicio de esta tesis, y haberme facilitado el apoyo material que necesité. Gracias al equipo de DRX de dicho centro, a Soledad Jiménez y en especial a Josep Elvira, por su buen hacer con los difractogramas. Y al resto del equipo de técnicos...Miguel, Marc, Oscar... también gracias. Mi tiempo en el Almera no hubiera sido igual sin todos ellos.

I would like to express my sincere thanks to Jean-Luc Mari, from IFP School, for the time and patience. Your help in the field of acoustic well logging has been very useful in this work.

No me quiero olvidar de Enrique Romero y Rodrigo Gómez, del Laboratorio de Geotecnia de la UPC, por el tiempo dedicado a mis humildes ensayos. Gracias a ambos.

Agradezco la siempre amable disponibilidad de Isabel Reguera, del IGME en Tres Cantos, así como a Félix Rubio sus valiosas correcciones. También quiero darle las gracias al equipo de la litoteca del IGME en Peñarroya, por su siempre excelente predisposición a la hora de facilitarme el trabajo con los testigos.

A todas esas personas que en algún momento de esta tesis me han apoyado más allá del ámbito académico, es decir, el humano, regalándome generosamente eso que escasea, el tiempo, y animándome directa o indirectamente, quiero agradecerles también desde estas líneas. Tened por seguro que habéis dejado en mí algo bueno de vuestro tiempo fugaz.

Miguel... más allá de toda tu ayuda técnica, de haber compartido mis alegrías y penas, siempre me quedará tu inconmensurable amistad (¡casi nada!), aquellos viajes interminables a Antequera y por supuesto tus genuinos chistes...Y es que estos años han dado para mucho. Qué gran suerte el haberte conocido. La gratitud se me queda corta.

Hay otra personita gracias a la cual aprendí que el miedo se puede transformar en coraje, y eso no es fácil. Gracias Raquel por tantos grandes momentos de luz y risas donde siempre había oscuridad y penas. Solo los mediocres se sirven de la difamación como única arma para salir adelante, así que punto en la pared y ¡aúpa!, que por algo somos del norte.

No me olvido tampoco de Camino, de Candela, de Jordi o de Rubén. Muchas gracias por vuestra ayuda desinteresada. Por supuesto, esta tesis va también dedicada a vosotros. Os merecéis todos los méritos que algún día os intentaron quitar.

Gracias José por tu habilidad con el GIS, ese programa hostil que no me quiere (aunque me querrá, te lo aseguro). También te quiero dar las gracias a ti, Bernat, por tu gran sentido del deber y tu nivel de implicación siempre que lo he necesitado...vales mucho más de lo que piensas.

Desde esta punta de Barcelona, y siempre mirando al norte, agradezco vuestro apoyo y loca amistad...Vicky, Marisol, Miní, M.J. y Alberto...Los 6 jinetes volverán a cabalgar juntos. También quiero agradecer al equipo N126: Andreu, Facu y Montse, tantos buenos momentos durante todo este tiempo a menudo lleno de sombras; Facu, tus incansables palabras de ánimos entre mate y café han dado su fruto. El *hogar* merece ser venerado siempre. Amén.

Ili, tu ánimos no han caído en saco roto, muchas gracias. Laura, la misma gratitud por tu optimismo cuando se necesitaba. Y desde Aragón me voy a Sarriá...Gracias Luis porque, a tu manera, los malos momentos han sido más llevaderos: compartimos además de amor gatuno, una proclamada inconformidad social, y a veces, quejarse de todo y de todos es una vía de escape que ayuda a sobrevivir, y más en una tesis.

Existe alguien que me ha estimulado y apoyado incondicionalmente, escuchándome, aconsejándome y, sobre todo, tolerando estoicamente mis cambios de humor y mis ausencias mentales. Mi cómplice, mi gurú personal y probablemente la persona más generosa que conozco: Xavi, moltes gràcies per la teva grandesa de cor.

Por último, quiero agradecer a toda mi familia el haberse preocupado por mí durante toda esta odisea, especialmente a mi familia catalana por el cariño recibido. El esfuerzo, las lágrimas y alegrías, las horas de insomnio, el tesón, la energía y hasta el último minuto de luz invertidos en este trabajo, van dedicados principalmente a dos personas pilares en mi vida, y a las que les debo el esfuerzo de toda una vida de trabajo y dedicación: mis padres... *Gracias porque sois todo lo bueno que hay en min. Esta tesis é vosa.*

Do what you can, with what you have, where you are.

Theodore Roosevelt

LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABLAS... ..	XVII
RESUMEN.....	XXI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MARCO GENERAL DE LA TESIS	4
1.2 ZONAS DE ESTUDIO	7
1.3 OBJETIVOS	10
1.4 PARÁMETROS DE IDONEIDAD EN FORMACIONES SELLO Y ALMACÉN	11
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS	14
2. METODOLOGÍA.....	17
2.1 DIAGRAFÍAS	17
2.1.1 Fundamentos	17
2.1.2 Tratamiento y procesado de datos	21
2.1.2.1 <i>Procesado del registro de imagen óptica</i>	<i>22</i>
2.1.2.2 <i>Procesado del registro de imagen acústica</i>	<i>22</i>
2.1.2.3 <i>Procesado del registro sónico de onda completa</i>	<i>23</i>
2.2 OTRAS TÉCNICAS DE ESTUDIO: LABORATORIO Y CAMPO	26
2.2.1 Microscopía Óptica de Polarización. Estudio petrográfico mediante Láminas Delgadas	27
2.2.2 Difracción de Rayos X (DRX).....	28
2.2.3 Ensayo de conductividad hidráulica en laboratorio	28
2.2.4 Ensayo de permeabilidad Lugeon	30
2.3 INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA	32
2.3.1 Estimación litológica mediante registros geofísicos	32
2.3.1.1 <i>Registro de Radioactividad Gamma Natural Total y Espectrometría de Rayos Gamma Naturales</i>	<i>32</i>
2.3.1.2 <i>Registro de resistividad eléctrica.....</i>	<i>35</i>
2.3.1.3 <i>Registro sónico de onda completa</i>	<i>36</i>
2.3.1.4 <i>Registro de imagen óptica.....</i>	<i>36</i>
2.3.1.5 <i>Registro de densidad</i>	<i>36</i>
2.3.2 Estimación litológica mediante integración de datos geofísicos	37

2.3.2.1	<i>Análisis multi-registro. Zonación</i>	37
2.3.2.2	<i>Cross-Plot</i>	38
2.3.3	Estudio de muestras en polvo mediante Difracción de Rayos X (DRX)	38
2.3.4	Estudio petrográfico de muestras en lámina delgada.....	39
2.3.4.1	<i>Estudio petrográfico en formaciones detríticas o siliciclásticas</i>	39
2.3.4.2	<i>Estudio petrográfico en formaciones carbonatadas</i>	40
2.4	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PETROFÍSICOS	42
2.4.1	Volumen de arcillosidad.....	42
2.4.2	Porosidad	43
2.4.2.1	<i>Métodos empleados para determinar la porosidad</i>	46
2.4.2.2	<i>Correcciones por arcillosidad</i>	52
2.4.3	Permeabilidad	53
2.4.3.1	<i>Métodos empleados para determinar la permeabilidad</i>	54
2.5	INTEGRACIÓN DE SONDEOS ANTIGUOS DE EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS AL ESTUDIO ACTUAL	62
2.6	FLUJO DE TRABAJO	63
3.	CONTEXTO GEOLÓGICO Y CORRELACION ESTRATIGRÁFICA	67
3.1	FORMACIONES ALMACÉN CARBONATADAS Y SUS FORMACIONES CONFINANTES	67
3.1.1	Sondeo SE-4. Facies Muschelkalk inferior y Facies Muschelkalk medio	67
3.1.1.1	<i>Correlación estratigráfica mediante diagrfías entre los sondeos SE-4 y Reus-1.</i>	69
3.1.2	Sondeo SB-4. Formación Las Ventanas y Formación Torremendo	73
3.1.2.1	<i>Correlación estratigráfica entre los sondeos SB-4 y Benejúzar-1</i>	75
3.2	FORMACIONES ALMACÉN DETRÍTICAS Y SUS FORMACIONES CONFINANTES	79
3.2.1	Sondeo SE-3. Formación Areniscas de Arén, y Formación Tremp (Garum) y Formación Posa.....	79
3.2.1.1	<i>Correlación estratigráfica mediante diagrfías entre el sondeo SE-3 y los sondeos Cajigar-1 y Monesma-1</i>	81
3.2.2	Sondeo SB-1. Facies Keuper	85
3.2.2.1	<i>Correlación estratigráfica mediante diagrfías entre el sondeo SB-1 y los sondeos Salobral-1 y Carcelén-1</i>	89
4.	INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES CARBONATADAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES	93
4.1	SONDEO SE-4 (ARBOLÍ – TARRAGONA) Y SONDEO REUS-1 (REUS – TARRAGONA)	93
4.1.1	Interpretación litológica de la facies Muschelkalk medio (M2) y la facies Muschelkalk inferior (M1) en el sondeo SE-4	95

4.1.2	Interpretación litológica de la facies Muschelkalk medio (M2) y la facies Muschelkalk inferior (M1) en el sondeo Reus-1	109
4.1.3	Conclusiones	117
4.2	SONDEO SB-4 (BACAROT – ALICANTE) Y SONDEO BENEJÚZAR-1 (BENEJÚZAR – ALICANTE).....	121
4.2.1	Interpretación litológica de la Formación Torremendo y la Formación Las Ventanas en el sondeo SB-4	121
4.2.2	Interpretación litológica de la Formación Torremendo y la Formación Pujálvarez en el sondeo Benejúzar-1	132
4.2.3	Conclusiones	135
5.	CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FORMACIONES CARBONATADAS RESERVORIO	139
5.1	CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LA FACIES MUSCHELKALK INFERIOR EN SE-4 Y REUS-1	139
5.1.1	Porosidad y permeabilidad en el sondeo SE-4	140
5.1.2	Valoraciones petrofísicas en el sondeo Reus-1	149
5.1.3	Conclusiones	151
5.2	CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LA FORMACIÓN LAS VENTANAS EN SB-4 Y LA FORMACIÓN PUJÁLVAZ EN BENEJÚZAR-1	156
5.2.1	Porosidad y permeabilidad en el sondeo SB-4	156
5.2.2	Valoraciones petrofísicas en el sondeo Benejúzar-1.....	166
5.2.3	Conclusiones	166
6.	INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES DETRÍTICAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES.....	171
6.1	SONDEO SE-3 (ORRIT – LLEIDA) Y SONDEOS CAJIGAR-1 Y MONESMA-1 (HUESCA)	171
6.1.1	Interpretación litológica de la facies Garum y Formación Posa y de la Formación Areniscas de Arén en el sondeo SE-3	172
6.1.2	Interpretación litológica en el sondeo Cajigar-1	183
6.1.3	Interpretación litológica en el sondeo Monesma-1	187
6.1.4	Conclusiones	190
6.2	SONDEO SB-1 (ALCARAZ – ALBACETE) Y SONDEOS SALOBRAL-1 Y CARCELÉN-1 (ALBACETE).....	195
6.2.1	Interpretación litológica de la facies Keuper arcilloso y de la facies Keuper arenoso en el sondeo SB-1	196
6.2.2	Interpretación litológica en el sondeo Salobral-1	202
6.2.3	Interpretación litológica en el sondeo Carcelén-1	205
6.2.4	Conclusiones	207

7. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FACIES DETRÍTICAS RESERVORIO	213
7.1 CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LA FORMACIÓN ARENISCAS DE ARÉN EN SE-3 Y EN CAJIGAR-1 Y MONESMA-1	213
7.1.1 Porosidad y permeabilidad en el sondeo SE-3	214
7.1.2 Valoraciones petrofísicas en el sondeo Cajigar-1.....	222
7.1.3 Valoraciones petrofísicas en el sondeo Monesma-1	223
7.1.4 Conclusiones	224
7.2 CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LA FACIES KEUPER ARENOSO EN SB-1 Y DE LA FACIES KEUPER ARCILLOSO EN SALOBRAL-1 Y CARCELÉN-1	229
7.2.1 Porosidad y permeabilidad en el sondeo SB-1.....	229
7.2.2 Valoraciones petrofísicas en los sondeos Salobral-1 y Carcelén-1.....	232
7.2.3 Conclusiones	235
8. DISCUSIÓN.....	239
8.1 VALORACIÓN GENERAL DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS ESTIMADOS	239
8.2 DEPÓSITOS CARBONATADOS (SE-4 Y SB-4)	245
8.3 DEPÓSITOS CLÁSTICOS (SE-3 Y SB-1)	249
9. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	255
9.1 CONCLUSIONES	255
9.2 LÍNEAS FUTURAS	257
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	259
ANEXOS	
ANEXO I. SONDEOS SD-4 Y SB-3	281
ANEXO II. DETALLES DE LA PERFORACIÓN Y DE LA ADQUISICION DE DATOS EN LOS SONDEOS SOMEROS. ESTIMACIÓN DEL CÁLIPER ACÚSTICO	291
ANEXO III. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X	299

LISTA DE FIGURAS

INTRODUCCIÓN

FIGURA 1. 1. CUMBRES DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. FUENTE: NACIONES UNIDAS Y ELABORACIÓN PROPIA.	2
FIGURA 1.2. LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA DE TODOS LOS SONDEOS TESTIFICADOS DURANTE EL DESARROLLO DE ESTA TESIS (MODIFICADO DE IGME).	9

METODOLOGÍA

FIGURA 2. 1. DIFERENTES MODOS DE NORMALIZACIÓN APLICADOS A LA IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO, DE IZQUIERDA A DERECHA: REGISTRO ORIGINAL (AMPL), NORMALIZACIÓN ESTÁTICA (NORM STATIC), NORMALIZACIÓN DINÁMICA EN 1 DIMENSIÓN (NORM DIM1) Y MODO "HIGH PASS",	23
FIGURA 2. 2. VENTANA DE FILTRO DE FRECUENCIAS DE IMAGEN SÓNICA DE ONDA COMPLETA (SUB-VENTANA SUPERIOR: TRAZA SIN PROCESAR EN NEGRO, TRAZA FILTRADA EN AZUL; SUB-VENTANA INFERIOR: ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE LA TRAZA).	24
FIGURA 2. 3. PROCESO DE SEMBLANZA: PARA CADA MUESTRA DEL CONJUNTO DE DATOS EN PROFUNDIDAD SE DIBUJA UN DIAGRAMA COMO ÉSTE; UN ABANICO DE LÍNEAS CON DIFERENTES PENDIENTES.	24
FIGURA 2. 4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PROCESO DE SEMBLANZA (HALDORSEN <i>ET AL</i> , 2006). A) REGISTRO DE LAS TRAZAS SÍSMICAS, SIMILAR AL DE LA FIGURA 2.3. B) CONTORNOS DE MÁXIMOS DE COHERENCIA ENTRE LOS TRENES DE ONDA. C) GRÁFICO STC DE RETARDO OBTENIDO EN PROFUNDIDAD.	25
FIGURA 2. 5. CÁMARA TRIAXIAL PERTENECIENTE AL EQUIPO TRIAXIAL UTILIZADO EN LOS ENSAYOS DE GRADIENTE HIDRÁULICO EN ESTA TESIS. A LA DERECHA, EJEMPLO DE PROBETA UTILIZADA EN DICHO ENSAYO.	30
FIGURA 2. 6. ESQUEMA DE ENSAYO LUGEON. (A) OBTURADOR SIMPLE. (B) OBTURADOR DOBLE. PARTES: 1= TRAMO ENSAYADO. 2= OBTURADORES. (MODIFICADO DE GONZÁLEZ <i>ET AL</i> , 2002).	31
FIGURA 2. 7. DISTRIBUCIÓN DEL THORIO Y DEL URANIO EN LOS SEDIMENTOS, Y SU ORIGEN EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN Th/U (ADAMS & WEAVER, 1958).	34
FIGURA 2. 8. RANGOS DE RESISTIVIDADES EN ALGUNAS ROCAS Y MINERALES (MODIFICADO DE KOBR <i>ET AL</i> , 2005). RESISTIVIDADES EN OHM·M.	35
FIGURA 2. 9. RANGOS DE DENSIDAD TEÓRICOS SEGÚN LITOLOGÍAS (JACKSON & TALBOT, 1986).	37
FIGURA 2. 10. TIPOS DE ROCAS DETRÍTICAS EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE COMPONENTES DE CUARZO, FELDESPATO Y FRAGMENTOS DE ROCA, Y EL PORCENTAJE DE MATRIZ (MODIFICADO DE PETTIJOHN, 1975).	40
FIGURA 2. 11. CLASIFICACIÓN DE CARBONATOS SEGÚN DUNHAM (1962) EN FUNCIÓN DE LA TEXTURA (PARTE SUPERIOR) Y SEGÚN FOLK (1962) EN FUNCIÓN DE LOS COMPONENTES PETROGRÁFICOS (PARTE INFERIOR). LA CLASIFICACIÓN DE FOLK NO ES APLICABLE A SEDIMENTOS. (MODIFICADO DE ALONSO, 2006).	41
FIGURA 2. 12. DIFERENTES TIPOS DE POROSIDAD EN UNA ROCA (CLARK, 1969).	44
FIGURA 2. 13. EJEMPLO DE DOS TRAZAS CORRESPONDIENTES A LA LLEGADA DE LA SEÑAL SÓNICA A LOS RECEPTORES RX2-1A Y RX3-1A, CON LAS LÍNEAS CORRESPONDIENTES A LA DETECCIÓN DE LOS TRES PRIMEROS PULSOS DE ONDA (LÍNEAS ROJA, NARANJA, AZUL).	61
FIGURA 2. 14. FLUJO DE TRABAJO BÁSICO DESARROLLADO EN ESTA TESIS.	66

CONTEXTO GEOLÓGICO Y CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA

- FIGURA 3. 1. LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA DE LOS SONDEOS SE-4 Y REUS-1. ESCALA 1:50000. SE INDICAN LOS DOS CORTES GEOLÓGICOS I-I' Y II-II' (MOSTRADOS EN DETALLE EN LA FIGURA 3.2). LEYENDA LITOLÓGICA EN FIGURA 3.2. 69
- FIGURA 3. 2. CORTES GEOLÓGICOS REALIZADOS EN DIRECCIÓN NW – SE (I-I') Y W – E (II-II'), MOSTRADOS EN LA FIGURA 3.1. SE HA PROYECTADO LA LOCALIZACIÓN APROXIMADA DE LOS DOS SONDEOS. ESCALA 1:50000. 70
- FIGURA 3. 3. CORRELACIÓN ENTRE LOS REGISTROS GR PERTENECIENTES A LOS SONDEOS SE-4 Y REUS-1. LA ESCALA VERTICAL ES LA MISMA PARA AMBOS SONDEOS. NO ESTÁN A ESCALA HORIZONTAL. LA PROFUNDIDAD VIENE DADA EN METROS... 72
- FIGURA 3. 4. ESQUEMA GEOLÓGICO DE LOS DOMINIOS PRINCIPALES DE LA CORDILLERA BÉTICA Y LOCALIZACIÓN DEL SONDEO SB-4 EN LA CUENCA DEL BAJO SEGURA (MODIFICADO DE VERA, 2004)..... 73
- FIGURA 3. 5. REPRESENTACIÓN SOBRE MAPA GEOLÓGICO DE LA UBICACIÓN DEL SONDEO SOMERO SB-4 Y EL SONDEO PROFUNDO DE PETRÓLEO BENEJÚZAR-1 EN LA CUENCA DEL BAJO SEGURA. SERIE ESTRATIGRÁFICA CORRESPONDIENTE A LA ZONA DEL BAJO SEGURA (MODIFICADO DE VERA, 2004). ESCALA 1:100000. LEYENDA LITOLÓGICA EN FIGURA 3.6. 75
- FIGURA 3. 6. LEYENDA LITOLÓGICA DEL MAPA DE LA FIGURA 3.5 Y DE LA FIGURA 3.15..... 76
- FIGURA 3. 7. CORRELACIÓN CRONOESTRATIGRÁFICA ENTRE LOS SONDEOS SB-4 Y BENEJÚZAR-1. LA LÍNEA NARANJA (—) INDICA EL LÍMITE ENTRE LA FM. TORREMENDO Y LA FM. LAS VENTANAS EN SB-4, Y LA FM. TORREMENDO Y FM. PUJÁLVAZ EN EL SONDEO DE PETRÓLEO. LOS REGISTROS PRESENTAN DIFERENTE ESCALA VERTICAL (INDICADA EN EL DIBUJO), Y NO ESTÁN A ESCALA HORIZONTAL. LA PROFUNDIDAD DE LOS SONDEOS VIENE DADA EN METROS..... 78
- FIGURA 3. 8. LOCALIZACIÓN DEL SONDEO SE-3 EN UN MAPA GEOLÓGICO AMPLIADO DE LA UNIDAD SURPIRENAICA CENTRAL, Y UNA PARTE DE LA VERTIENTE SURPIRENAICA OCCIDENTAL (MODIFICADO DE TEIXELL, 1992). 80
- FIGURA 3. 9. LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA DE LOS TRES SONDEOS CORRELACIONADOS ENTRE SÍ: SE-3, CAJIGAR-1 Y MONESMA-1., Y CORTE GEOLÓGICO I-II-III. ESCALA 1:50000. LEYENDA LITOLÓGICA EN FIGURA 3.10..... 82
- FIGURA 3. 10. CORTES GEOLÓGICOS REALIZADOS EN DIRECCIÓN S-N (I-II-III), MOSTRADOS EN LA FIGURA 3.9. ESCALA 1:25000. FUENTE: ICGC..... 83
- FIGURA 3. 11. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA MEDIANTE DIAGRAFÍAS (GR, SÓNICO) ENTRE LOS SONDEOS ANTIGUOS Y PROFUNDOS DE PETRÓLEO CAJIGAR-1 Y MONESMA-1, Y EL SONDEO SOMERO SE-3. SE HA CORRELACIONADO LA FACIES GARUM DE LA FORMACIÓN TREMP, Y LA FM. ARENISCAS DE ARÉN EN LOS TRES SONDEOS. SE INDICAN LAS DISTANCIAS ENTRE LOS TRES SONDEOS. LA ESCALA VERTICAL ES LA MISMA PARA LOS TRES, Y NO ESTÁN A ESCALA HORIZONTAL..... 84
- FIGURA 3. 12. LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA DEL SONDEO SB-1 (PUNTO ROJO) (MODIFICADO DE VERA, 2004)..... 86
- FIGURA 3. 13. UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS TRIÁSICAS ENTRE LA COBERTERA TABULAR (BORDE DEL MACIZO IBÉRICO) Y EL PREBÉTICO (VERA, 2004). EL SONDEO SB1 SE SITÚA EN LA COBERTERA TABULAR. 87
- FIGURA 3. 14. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA Y ESQUEMA GEOLÓGICO REGIONAL (MARGEN SUPERIOR IZQUIERDA) DONDE SE SITÚA EL SONDEO SB-1 (PUNTO AMARILLO). EN LA PARTE INFERIOR CORTE GEOLÓGICO A-B PRÓXIMO AL SONDEO SB-1, INDICADO MEDIANTE LÍNEA AMARILLA SOBRE EL MAPA. MODIFICADO DE MAGNA50, IGME. ESCALA 1:50000..... 88
- FIGURA 3. 15. REPRESENTACIÓN, SOBRE MAPA GEOLÓGICO, DE LA UBICACIÓN DEL SONDEO SOMERO SB-1, Y LOS SONDEOS PROFUNDOS Y ANTIGUOS DE PETRÓLEO SALOBRAI-1 Y CARCELÉN-1. ESCALA 1:100000. LEYENDA LITOLÓGICA EN LA FIGURA 3.6. 89
- FIGURA 3. 16. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA MEDIANTE REGISTRO DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) Y SÓNICO (DT) ENTRE LOS SONDEOS SB-1, SALOBRAI-1 Y CARCELÉN-1. LA DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE SONDEOS NO ESTÁ A ESCALA, Y LA ESCALA VERTICAL ES LA MISMA. LA PROFUNDIDAD VIENE DADA EN METROS..... 91

INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES CARBONATADAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES

- FIGURA 4. 1. REPRESENTACIÓN, MEDIANTE HISTOGRAMA, DE LAS FRECUENCIAS DE VALORES DEL REGISTRO DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) Y EL REGISTRO DE RESISTIVIDAD NORMAL LARGA (RES64N) EN LA TOTALIDAD DEL SONDEO SE-4..... 95
- FIGURA 4. 2. CROSS-PLOT DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE AL REGISTRO DE RESISTIVIDAD NORMAL LARGA (RES64N) Y EL VALOR DE Vp (COLORES), ENTRE LOS 19 Y 106 M DE PROFUNDIDAD DEL SONDEO SE-4. SE HAN DIFERENCIADO DOS GRUPOS DE PUNTOS, RESALTADOS EN COLOR VERDE Y NARANJA. 96
- FIGURA 4. 3. REGISTROS PERTENECIENTES A LA TOTALIDAD DEL SONDEO SE-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPERACÚSTICO, RESISTIVIDAD NORMAL CORTA (RES16N) Y LARGA (RES64N), REGISTRO SÓNICO EN EL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), IMAGEN ACÚSTICA DEL SONDEO (ABI) Y COLUMNA DE ZONACIÓN SEGÚN EL CROSS-PLOT DE LA FIGURA 4.1..... 97
- FIGURA 4. 4. CROSS-PLOT DEL REGISTRO DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE AL DE RESISTIVIDAD NORMAL PROFUNDA (RES64N) Y VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) PARA LA FACIES M2 DEL SONDEO SE-4 (TRAMO 11 – 67 M).. 98
- FIGURA 4. 5. REGISTROS EN LA FACIES M2 DEL SONDEO SE-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, VALORES ESPECTROMÉTRICOS U, K Y Th Y LAS RELACIONES CUALITATIVAS ENTRE SÍ, RESISTIVIDAD NORMAL LARGA (RES64N), LLEGADA DE LA SEÑAL SÓNICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), VELOCIDAD ESTIMADA DE ONDAS P (Vp), IMAGEN ACÚSTICA (ABI) Y ÓPTICA DE LA PARED DEL SONDEO, COLUMNA DE ZONACIÓN A PARTIR DEL CROSS-PLOT Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES A LAS QUE SE HAN REALIZADO ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X, Y DOS ZOOM DE LA IMAGEN ACÚSTICA Y ÓPTICA DE DOS TRAMOS (37 – 42 Y 61 – 66.5 M). 99
- FIGURA 4. 6. FOTO DE UNA MUESTRA DE TESTIGO ENTRE 23.7 Y 24 M PERTENECIENTE A LA FACIES M2 DEL SONDEO SE-4 (LA FRACTURA OBSERVADA ES POSTERIOR AL REGISTRO GEOFÍSICO). REGISTROS, DE IZQUIERDA A DERECHA: CÁLIPER ACÚSTICO, IMAGEN 3D A PARTIR DE LA IMAGEN ÓPTICA, IMAGEN ÓPTICA, IMAGEN ACÚSTICA (AMPLITUD) DE LA PARED DEL SONDEO E IDENTIFICACIÓN DE LAMINACIONES (LÍNEAS VERDES) Y FRACTURAS (LÍNEAS ROJAS). 101
- FIGURA 4. 7. ZONA DE TRANSICIÓN ENTRE M2 Y M1 EN EL SONDEO SE-4. DIAGRAFÍAS, DE IZQUIERDA A DERECHA: CÁLIPER ACÚSTICO, RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), PERFIL 3D DEL REGISTRO DE IMAGEN ACÚSTICA, REGISTRO DE IMAGEN ÓPTICA. SE MARCA CON LÍNEA ROJA DISCONTINUA EL LÍMITE ENTRE AMBAS FACIES..... 103
- FIGURA 4. 8. CROSS-PLOT DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE A RESISTIVIDAD NORMAL PROFUNDA (RES64N) Y VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) PARA LA FACIES M1 DEL SONDEO SE-4. SE HAN DIFERENCIADO DOS GRUPOS DE PUNTOS (C, D). 104
- FIGURA 4. 9. REGISTROS EN LA FACIES M1 DE SE-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CALIPER ACÚSTICO, ESPECTROMETRÍA DE K, U Y Th Y SUS RELACIONES Th/K, Th/U y U/K, RESISTIVIDAD NORMAL PROFUNDA (RES64N) EN ESCALA LOGARÍTMICA, VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), LLEGADA DEL TREN DE ONDAS AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), IMAGEN ACÚSTICA DE LA PARED DEL SONDEO (ABI), COLUMNA CON LA ZONACIÓN ESTABLECIDA A PARTIR DEL CROSS-PLOT Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA LOS ESTUDIOS REALIZADOS MEDIANTE DRX Y PARA ANÁLISIS EN LÁMINA DELGADA, ASÍ COMO UN EJEMPLO DE IMAGEN ACÚSTICA ENTRE LOS 74.5 Y LOS 79 M DE PROFUNDIDAD. 106
- FIGURA 4. 10. FOTOGRAFÍAS DE LAS LÁMINAS DELGADAS ESTUDIADAS EN LA FACIES M1 DEL SONDEO SE-4, CUYA PROFUNDIDAD SE HAN MENCIONADO EN LA FIGURA 4.9. 107
- FIGURA 4. 11. A) CROSS-PLOT DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE A LA VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) Y RESISTIVIDAD LATERAL PROFUNDA (LLD) ENTRE LOS 2039 Y 2150 M DE PROFUNDIDAD. SE HAN DISTINGUIDO DOS GRUPOS DE PUNTOS (M1, M2). B) REGISTROS, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR),

- RESISTIVIDADES LATERAL PROFUNDA (LLD) Y LATERAL SOMERA (LLS), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), COLUMNA DE ZONACIÓN EXTRAÍDA DEL CROSS-PLOT Y COLUMNA CRONOESTRATIGRÁFICA..... 110
- FIGURA 4. 12. CROSS-PLOT DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) Y RESISTIVIDAD LATERAL PROFUNDA (LLD) FRENTE A LA DENSIDAD APARENTE (RHOB) PARA LA FACIES MUSCHELKALK M2 EN EL SONDEO REUS-1: SE HAN DIFERENCIADO 2 GRUPOS DE PUNTOS (A, B). DIAGRAFÍAS PARA EL TRAMO ESTUDIADO, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER MECÁNICO, PERFIL DE RESISTIVIDAD LATERAL PROFUNDO (LLD) Y SOMERO (LLS), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), DENSIDAD APARENTE (RHOB) Y CURVA DE CORRECCIÓN POR DENSIDAD (DRHO), COLUMNA CON LA ZONACIÓN ESTABLECIDA (ZM2) Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES DE LOS ANÁLISIS DE DRX REALIZADOS, Y DOS FOTOS DE RIPIOS. 113
- FIGURA 4. 13. CROSS-PLOT DE LA VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) Y RESISTIVIDAD LATERAL PROFUNDA (LLD) FRENTE AL VALOR DE LA DENSIDAD APARENTE (RHOB) PARA EL TRAMO 2110 – 2147 M DEL SONDEO REUS-1, CORRESPONDIENTE A LA FACIES M1. SE HAN DISTINGUIDO DOS GRUPOS DE PUNTOS (C, D)..... 115
- FIGURA 4. 14. DIAGRAFÍAS EN EL TRAMO ESTUDIADO DE LA FACIES M1 DEL SONDEO REUS-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER MECÁNICO, PERFIL DE RESISTIVIDAD LATERAL PROFUNDA (LLD) Y SOMERA (LLS) EN ESCALA LOGARÍTMICA, VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), DENSIDAD APARENTE (RHOB) Y DENSIDAD CORREGIDA (DRHO), COLUMNA DE ZONACIÓN A PARTIR DEL CROSS-PLOT(ZM1) Y LA COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES DE LOS ANÁLISIS DE DRX REALIZADOS. 116
- FIGURA 4. 15. CROSS-PLOTS RESULTANTES PARA LAS FACIES M2 Y M1 DEL SONDEO SE-4 (IMAGEN SUPERIOR) Y REUS-1 (INFERIOR), CON LOS REGISTROS DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE A VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) Y RESISTIVIDAD NORMAL (IMAGEN SUPERIOR) Y LATERAL (INFERIOR). SE HAN DIFERENCIADO DOS GRUPOS DE PUNTOS EN AMBOS SONDEOS..... 119
- FIGURA 4. 16. (B) HISTOGRAMA DE VALORES DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) EN EL TRAMO 30 – 167 M DEL SONDEO SB-4. SE HAN DIFERENCIADO DOS GRUPOS DE FRECUENCIAS DE GR, RESALTADAS CON CÍRCULOS NARANJA Y VERDE. (A) REGISTROS DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), IMAGEN ACÚSTICA DE LA PARED DEL SONDEO (ABI) Y COLUMNA DE ZONACIÓN ESTABLECIDA A PARTIR DEL HISTOGRAMA..... 122
- FIGURA 4. 17. REGISTROS EN LA FM. MARGAS DEL TAP EN EL SONDEO SB-4, DE IZQUIERDA A DERECHA:RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL, CÁLIPER ACÚSTICO, VALORES DE ESPECTROMETRÍA DEL U, Th Y K Y LAS RELACIONES Th/K, Th/U Y U/K, VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), LLEGADA DE LA SEÑAL ACÚSTICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), IMAGEN ACÚSTICA Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. CROSS-PLOT (MARGEN SUPERIOR DERECHA) DE VELOCIDAD DE ONDAS P FRENTE A GR, ENTRE LOS 30Y 107 M. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES A LAS QUE SE TOMARON MUESTRAS PARA ANALIZAR MEDIANTE DRX, ASÍ COMO UN EJEMPLO DE IMAGEN ACÚSTICA CON LAS ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS Y FRACTURAS IDENTIFICADAS ENTRE 85 Y 96 M DE PROFUNDIDAD..... 124
- FIGURA 4. 18. CROSS-PLOT DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) PARA LA FORMACIÓN CALIZAS DE LAS VENTANAS DEL SONDEO SB-4. SE HAN DIFERENCIADO DOS GRUPOS DE PUNTOS(C,D).. 125
- FIGURA 4. 19. DIAGRAFÍAS EN LA FM. CALIZAS DE LAS VENTANAS EN EL SONDEO SB-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, ESPECTROMETRÍA DE K, U Y Th Y LAS RELACIONES CUALITATIVAS Th/K, Th/U Y U/K, VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), LLEGADA DE LA SEÑAL SÓNICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), IMAGEN ACÚSTICA (ABI), COLUMNA DE ZONACIÓN (ZONA A) Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES A LAS QUE SE TOMARON MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE DRX Y LÁMINA DELGADA, Y UN EJEMPLO DE IMAGEN ACÚSTICA CORRESPONDIENTE AL TRAMO 106.5 – 108.6 M. 127
- FIGURA 4. 20. FOTOGRAFÍAS DE LAS SEIS MUESTRAS EN LÁMINAS DELGADAS ESTUDIADAS EN LA FM. CALIZAS DE LAS VENTANAS DEL SONDEO SB-4. SE INDICA LA PROFUNDIDAD A LA QUE FUERON TOMADAS EN LA FIGURA 4.18. LAS FOTOS A, B, D Y F CORRESPONDEN A UNA CALIZA PACKSTONE BIOCLÁSTICA, Y LAS FOTOS C Y E, A UNA CALIZA GRAINSTONE BIOCLÁSTICA. 128

FIGURA 4. 21. FOTOGRAFÍA DEL TESTIGO DONDE SE TOMÓ LA MUESTRA MBAC-22A A LOS 117.9 M DE PROFUNDIDAD. SE PUEDEN OBSERVAR CON NITIDEZ LOS NUMEROSOS ONCOIDES PRESENTES.	129
FIGURA 4. 22. REGISTROS ENTRE 120 Y 144 M EN EL SONDEO SB-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: GR, SP Y CÁLIPER ACÚSTICO, RELACIONES ESPECTRALES TH/K, TH/U Y U/K EN UN TRAMO DE CALCARENITA. SEÑALADOS SOBRE ÉSTA ÚLTIMA, SE MUESTRA UNA FOTOGRAFÍA DEL TESTIGO ENTRE 130 Y 130.3 M, Y EL PUNTO DONDE SE TOMÓ LA MUESTRA MBAC-25A. EN LA FOTO DE LA IZQUIERDA Y SEÑALADOS CON FLECHAS SE OBSERVAN DOS TRAZAS DE OSTREIDOS.	131
FIGURA 4. 23. (A) CROSS-PLOT DEL REGISTRO RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE A VELOCIDAD DE ONDAS P (VP) Y RESISTIVIDAD NORMAL PROFUNDA (RES64N) PARA EL TRAMO 330 – 916 M DE PROFUNDIDAD EN EL SONDEO BENEJÚZAR-1. (B) REGISTROS EN ESE MISMO TRAMO, DE IZQUIERDA A DERECHA, GR, RESISTIVIDAD NORMAL CORTA (RES16N) Y NORMAL PROFUNDA (RES64N) Y VELOCIDAD DE ONDAS P, COLUMNA DE ZONACIÓN ESTABLECIDA A PARTIR DEL CROSS-PLOT, E INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA.	134
FIGURA 4. 24. CROSS-PLOT DE LOS REGISTROS DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL Y VELOCIDAD DE ONDAS P PARA LA FM. MARGAS DE TORREMENDO Y FM. CALIZAS DE LAS VENTANAS DEL SONDEO SB-4 (SUPERIOR), Y FM. TORREMENDO Y FM. PUJÁLVAREZ DEL SONDEO BENEJÚZAR-1 (INFERIOR).	137

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FORMACIONES CARBONATADAS RESERVORIO

FIGURA 5. 1. DIAGRAFÍAS EN LA FACIES M1 DEL SONDEO SE-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, VOLUMEN DE ARCILLOSIDAD (VSH), POROSIDAD SÓNICA (PORO SONIC), VALORES DE POROSIDAD SÓNICA MÍNIMA, MÁXIMA Y MEDIA ESTABLECIDOS A PARTIR DE ZONACIÓN, COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA, POROSIDADES EN LÁMINA DELGADA (POR LD) CON LAS REFERENCIAS DE LAS MUESTRAS, POROSIDAD DE LABORATORIO (PORLAB), CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LABORATORIO (K LAB) Y PERMEABILIDAD LUGEON (AMBAS EN CM/S). FIGURA SUPERIOR DERECHA: GRÁFICOS DE PERMEABILIDAD LUGEON EN DOS TRAMOS DE PROFUNDIDAD (I = 75 – 80 M, II = 95 – 100 M). FIGURA INFERIOR DERECHA: CURVA DE CONSOLIDACIÓN OBTENIDA EN EL ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LABORATORIO PARA UNA MUESTRA TOMADA A 100 M DE PROFUNDIDAD.	141
FIGURA 5. 2. (A) IMAGEN ACÚSTICA PERTENECIENTE AL TRAMO 74.1 - 75 M EN LA FACIES M1 DEL SONDEO SE-4, INTERPRETADO COMO CALIZA, DONDE SE OBSERVA LA IDENTIFICACIÓN DE FRACTURAS Y DE ESTILOLITOS. (B) DIAGRAFÍA DE LA SEÑAL SÓNICA REGISTRADA EN EL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A) DESDE LOS 69 HASTA LOS 106 M, CON UNA FOTO DE UN TRAMO DE TESTIGO (IZQUIERDA) DONDE SE PUEDE OBSERVAR LA PRESENCIA DE PEQUEÑAS VACUOLAS (VUGS) Y UNA IMAGEN ACÚSTICA AMPLIADA CON LA IDENTIFICACIÓN DE ESCASAS LAMINACIONES (LÍNEAS VERDES) Y DE ABUNDANTE FRACTURACIÓN (ROJAS), PARA EL TRAMO 70.5 - 74 M DE PROFUNDIDAD (DERECHA).	142
FIGURA 5. 3. ESTIMACIÓN DE LA POROSIDAD EN LÁMINA DELGADA DE TRES MUESTRAS PERTENECIENTES A LA FACIES M1 DEL SONDEO SE-4: TRES MUESTRAS DE DOLOMÍA MICRÍTICA CON REFERENCIAS MARB-7A, MARB-16A Y MARB-19A, TOMADAS A LOS 86.2, 93.5 Y 100 M DE PROFUNDIDAD RESPECTIVAMENTE, Y UNA MUESTRA DE CALIZA MICRÍTICA (REF.: MARB-9A) TOMADA A LOS 74 M. TODAS LAS LÁMINAS FUERON TEÑIDAS CON AZUL DE METILENO PARA PODER IDENTIFICAR MEJOR LA POROSIDAD. LAS IMÁGENES A LA IZQUIERDA SON LAS ÁREAS ESCANEADAS DE LAS LÁMINAS, LAS IMÁGENES CENTRALES ES LA MISMA IMAGEN PERO CON LA ESTIMACIÓN DE LA POROSIDAD (EN NEGRO) (AMBAS A ESCALA. 2 MM), Y LAS IMÁGENES DE LA IZQUIERDA SON LAS FOTOGRAFÍAS TOMADAS AL MICROSCOPIO EN UN PUNTO ALEATORIO DE LA MUESTRA (ESCALA: 0.5 MM O 500 MM).	144
FIGURA 5. 4. FACIES MUSCHELKALK INFERIOR (M1) DEL SONDEO SE-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: PROYECCIÓN POLAR DE ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS (LAMINACIÓN = VERDE, FRACTURACIÓN = ROJO); PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA EQUIAREALDE LAS FRACTURAS IDENTIFICADAS; REPRESENTACIÓN MEDIANTE HISTOGRAMA DE LAS FRECUENCIAS DE LOS BUZAMIENTOS DE FRACTURAS.	146

- FIGURA 5. 5. DE IZQUIERDA A DERECHA, PARÁMETRO Ik-SEIS OBTENIDO A PARTIR DEL ESTUDIO DE ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA ACÚSTICA, ATENUACIÓN, ÍNDICE DE FORMA IC (SHAPEINDEX), POROSIDAD SÓNICA, LLEGADA DE LA SEÑAL SÓNICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), VELOCIDAD DE ONDAS P (VP), IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO (AMPLITUD ABI) Y FRACTURAS IDENTIFICADAS A PARTIR DE ÉL, VALORACIÓN DE PERMEABILIDAD LUGEON SEGÚN OLAYA Y SOPEÑA (1991) (PRÁCTICAMENTE IMPERMEABLE = PI), Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA..... 149
- FIGURA 5. 6. REGISTROS EN EL TRAMO 2110 – 2147 M (FACIES M1) DEL SONDEO REUS-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), VOLUMEN DE ARCILLOSIDAD (VSH), POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP), DIÁMETRO DE PERFORACIÓN, CÁLIPER MECÁNICO, RESISTIVIDAD LATERAL PROFUNDA (LLD) Y LATERAL SOMERA (LLS), VELOCIDAD DE ONDAS P (VP), POROSIDAD SÓNICA (POROS SONIC), POROSIDAD ESTIMADA A PARTIR DEL REGISTRO DE DENSIDAD APARENTE (DPOR) Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. 150
- FIGURA 5. 7. REGISTROS DISPONIBLES EN LA FM. CALIZAS DE LAS VENTANAS DEL SONDEO SB-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: VOLUMEN DE ARCILLOSIDAD (VSH), POROSIDAD SÓNICA ESTIMADA Y GRÁFICOS DE POROSIDAD SÓNICA MÍNIMA, MÁXIMA Y MEDIA ESTIMADAS A PARTIR DE ZONACIÓN, COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA, POROSIDAD A PARTIR DE LÁMINA DELGADA (POR LD) Y REFERENCIAS DE LAS MUESTRAS, POROSIDAD ESTIMADA EN LABORATORIO (POR LAB), CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LABORATORIO (K LAB) Y PERMEABILIDAD LUGEON (K LUGEON). SE INDICA LA VALORACIÓN DE LA PERMEABILIDAD LUGEON SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE OLALLA & SOPEÑA (1991): MUY IMPERMEABLE (MI), PERMEABLE (P) Y MUY PERMEABLE (MP). 157
- FIGURA 5. 8. ESTIMACIÓN DE LA POROSIDAD A PARTIR DEL ESTUDIO DE SEIS MUESTRAS EN LÁMINAS DELGADAS PERTENECIENTES A LA FORMACIÓN CALIZAS DE LAS VENTANAS DEL SONDEO SB-4. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES DE LA MUESTRA AL LADO DE CADA LÁMINA: (A) MUESTRA TOMADA A LOS 107.4 M DE PROFUNDIDAD (REF. MBAC-15A).(B) MUESTRA TOMADA A LOS 112 M DE PROFUNDIDAD (REF. MBAC-18A), TEÑIDA DE ROJO DE ALIZARINA PARA DISTINGUIR EL CARBONATO; EL COLOR ROSADO ENTRE LOS FRAGMENTOS DE BIOCLASTOS CORRESPONDE A LA RESINA EPOXI, Y POR TANTO A LA POROSIDAD. (C) MUESTRA PERTENECIENTE A LOS 118 M DE PROFUNDIDAD (REF. MBAC-22A).(D) MUESTRA A LOS 124.2 M (REF. MBAC-25A).(E) MUESTRA A LOS 155.7 M (REF. MBAC-28A), PERTENECIENTE A UNA GRAINSTONE BIOCLÁSTICA. (F) MUESTRA TOMADA A LOS 167 M DE PROFUNDIDAD (REF. MBAC-29A). LAS LÁMINAS A, C, D Y F CORRESPONDEN A CALIZAS PACKSTONE BIOCLÁSTICAS Y FUERON TEÑIDAS CON AZUL DE METILENO PARA DISTINGUIR MEJOR LA POROSIDAD. LAS MUESTRAS B Y E CORRESPONDEN A CALIZAS GRAINSTONE BIOCLÁSTICAS. ESCALA DE 2 MM EN TODAS. 159
- FIGURA 5. 9. IDENTIFICACIÓN ESTRUCTURAL EN LA FM. LAS VENTANAS DEL SONDEO SOMERO SB-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: PROYECCIÓN POLAR DE LAS ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS (VERDE) Y FRACTURAS (ROJO) IDENTIFICADAS, PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA EQUIAREAL (SCHMIDT) DE LAS FRACTURAS, Y REPRESENTACIÓN, MEDIANTE HISTOGRAMA, DE LAS FRECUENCIAS DE LOS BUZAMIENTOS DE FRACTURAS. 160
- FIGURA 5. 10. CURVAS PRESIÓN-ABSORCIÓN OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD LUGEON REALIZADOS EN LOS TRAMOS 105 – 110 M Y 135 – 140 M DE PROFUNDIDAD EN LAS CALIZAS DE LAS VENTANAS DEL SONDEO SB-4. 161
- FIGURA 5. 11. CURVAS DEL CONSOLIDACIÓN OBTENIDAS MEDIANTE EL ENSAYO DE PERMEABILIDAD HIDRÁULICA CONTROLADA PARA DOS MUESTRAS DE LA FM. CALIZAS DE LAS VENTANAS EN EL SONDEO SB-4: IZQUIERDA, MUESTRA A LOS 107.2 M (CALIZA ARENOSA) Y DERECHA, 118.1 M DE PROFUNDIDAD (CALIZA MARGOSA)..... 163
- FIGURA 5. 12. TRAMO 107– 141 M EN EL SONDEO SB-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: PARÁMETRO Ik-SEIS ESTIMADO, ATENUACIÓN, ÍNDICE DE FORMA (IC) O SHAPE INDEX, POROSIDAD SÓNICA, LLEGADA DE LA SEÑAL ACÚSTICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), VELOCIDAD DE ONDAS P (VP) Y ONDAS S (VS), IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO (AMPLITUD ABI) Y FRACTURAS (LÍNEAS ROJAS) IDENTIFICADAS A PARTIR DE LA IMAGEN, TIPOLOGÍA DE LOS TRAMOS ENSAYADOS MEDIANTE LUGEON SEGÚN OLAYA & SOPEÑA (1991) (M.I. = MUY IMPERMEABLE; P = PERMEABLE), Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. 165

INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES DETRÍTICAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES

- FIGURA 6. 1. REGISTROS EN EL SONDEO SE-3, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, RESISTIVIDAD NORMAL LARGA (RES64N) Y CORTA (RES16N), IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO (ABI), COLUMNA CRONOESTRATIGRÁFICA Y COLUMNA DE ZONACIÓN SEGÚN EL CROSS-PLOT REALIZADA ENTRE LOS 11 Y LOS 160.3 M DE PROFUNDIDAD. 173
- FIGURA 6. 2. REGISTROS EN LA ZONA CONFINANTE DEL SONDEO SE-3, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, VALORES DE ESPECTROMETRÍA (U, Th Y K) Y LAS RELACIONES ESPECTROMÉTRICAS (Th/K, U/K, Th/U), RESISTIVIDAD NORMAL CORTA (RES16N) Y NORMAL LARGA (RES64N), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), REGISTRO DE SEÑAL SÓNICA EN EL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), IMAGEN ACÚSTICA (ABI), COLUMNA DE ZONACIÓN A PARTIR DEL CROSS-PLOT Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. CROSS-PLOT: GR FRENTE A RES64N PARA LA FACIES GARUM Y FORMACIÓN POSA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES A LAS QUE SE TOMARON MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE DRX Y LÁMINA DELGADA, ASÍ COMO LA IMAGEN ACÚSTICA ENTRE LOS 94 Y 102.5 M DE PROFUNDIDAD. 175
- FIGURA 6. 3. FOTOGRAFÍAS DE LAS DOS MUESTRAS ESTUDIADAS EN LÁMINA DELGADA EN LA FORMACIÓN SELLO DEL SONDEO SE-3. LA MUESTRA CON REFERENCIA MORR-5S FUE TOMADA A LOS 76 M DE PROFUNDIDAD, Y PERTENECE A LA FACIES GARUM, Y LA MUESTRA MORR-19S, TOMADA A LOS 131 M, SE LOCALIZA EN LA FORMACIÓN POSA. AMBAS FOTOS ESTÁN TOMADAS SIN NICOLÉS CRUZADOS. 177
- FIGURA 6. 4. IMAGEN ACÚSTICA ENTRE 126 Y 138 M EN LA ZONA DE TRANSICIÓN, IDENTIFICADA COMO LA FM. POSA DEL SONDEO SE-3. SE APRECIA LAMINACIÓN PARALELA Y SUBHORIZONTAL. EN LOS REGISTROS SE CORRESPONDE CON UN INCREMENTO DE LA VELOCIDAD DE ONDAS P Y GR 178
- FIGURA 6. 5. HISTOGRAMAS DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) A LA IZQUIERDA Y DE VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) A LA DERECHA, EN LA FM. ARENISCAS DE ARÉN DEL SONDEO SE-3. COMO SE PUEDE OBSERVAR, PRESENTAN UNA DISTRIBUCIÓN MARCADAMENTE UNIMODAL. 179
- FIGURA 6. 6. REGISTROS EN LA FM. ARENISCAS DE ARÉN DEL SONDEO SE-3, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, ESPECTROMETRÍA DE K, U Y Th, Y RELACIONES Th/K, U/K, Th/U, RESISTIVIDAD NORMAL CORTA (RES16N) Y NORMAL PROFUNDA (RES64N), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), LLEGADA DE LA SEÑAL SÓNICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), IMAGEN ACÚSTICA (ABI), COLUMNA DE ZONACIÓN A PARTIR DEL CROSS-PLOT Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES DE LA TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE DRX Y LÁMINA DELGADA, Y UN EJEMPLO DE IMAGEN ACÚSTICA CORRESPONDIENTE AL TRAMO 140 – 144 M. 180
- FIGURA 6. 7. FOTOGRAFÍAS DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS EN LÁMINA DELGADA EN LA FORMACIÓN ARENISCAS DE ARÉN DEL SONDEO SE-3. LA MUESTRA CON REFERENCIA MORR-22A FUE TOMADA A LOS 134 M DE PROFUNDIDAD; MORR-23A, A LOS 137 m; MORR-24A A LOS 139 m; MORR-27A FUE TOMADA A LOS 148.5 m; MORR-28A A LOS 150 m; Y LA MUESTRA MORR-31A FUE TOMADA A LOS 158 M DE PROFUNDIDAD. TODAS LAS FOTOS, EXCEPTUANDO MORR-31A, SE HAN TOMADO CON NICOLÉS CRUZADOS. 182
- FIGURA 6. 8. REGISTROS EN EL TRAMO 1160 - 1320 M DEL SONDEO CAJIGAR-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) Y COLUMNA DE ZONACIÓN ESTABLECIDA A PARTIR DEL CROSS-PLOT DE GR FRENTE A Vp EN ESE MISMO TRAMO. SE HAN DIFERENCIADO DOS GRUPOS DE PUNTOS RESALTADOS EN COLOR GRIS Y NARANJA, IDENTIFICADOS COMO LA FORMACIÓN SELLO Y FORMACIÓN ALMACÉN RESPECTIVAMENTE. ... 184
- FIGURA 6. 9. CROSS-PLOTS DE LOS REGISTROS DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) Y VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) PARA LA FACIES GARUM (CROSS-PLOT SUPERIOR) Y LA FM. ARENISCAS DE ARÉN (CROSS-PLOT INFERIOR) EN CAJIGAR-1. 186
- FIGURA 6. 10. REGISTROS EN EL TRAMO 932 - 1235 M EN EL SONDEO MONESMA-1: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER MECÁNICO, RESISTIVIDAD NORMAL CORTA AMPLIFICADA (ASN), COLUMNA DE ZONACIÓN A PARTIR DEL

CROSS-PLOT Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. CROSS-PLOT: REGISTRO DE GR FRENTE A ASN, DONDE SE HAN DIFERENCIADO DOS GRUPOS DE PUNTOS.....	189
FIGURA 6. 11. CORRELACIÓN MEDIANTE DIAGRAFÍAS ESTABLECIDA ENTRE EL SONDEO SOMERO SE-3 Y LOS SONDEOS PROFUNDOS DE PETRÓLEO CAJIGAR-1 Y MONESMA-1.	191
FIGURA 6. 12. CROSS-PLOTS DEL REGISTRO DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) FRENTE A VELOCIDAD DE ONDAS P (VP) EN LOS SONDEOS SE-3, CAJIGAR-1 Y MONESMA-1.....	192
FIGURA 6. 13. REGISTROS EN LA FACIES KEUPER ARCILLOSA Y FACIES KEUPER ARENOSA DEL SONDEO SB-1 (TRAMO 11 – 87.7 M), DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, ENTUBACIÓN, PERFILES DE ESPECTROMETRÍA Y LAS RELACIONES TH/K, TH/U Y U/K, RESISTIVIDAD NORMAL LARGA (RES64N) Y CORTA (RES16N), IMAGEN ACÚSTICA DEL SONDEO (AMPLITUD), COLUMNA DE ZONACIÓN A PARTIR DEL CROSS-PLOT(GR FRENTE A RES64N) Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA JUNTO CON LA MINERALOGÍA PREDOMINANTE (C = CALCITA, Y = YESO, M = MICA, CHL = CLORITA, Q = CUARZO). ESQUINA SUPERIOR DERECHA: HISTOGRAMA DE VALORES GR. SE INDICAN SOBRE LA COLUMNA LITOLÓGICA, LAS PROFUNDIDADES A LAS QUE SE HAN REALIZADO ENSAYOS DE DRX, Y ESTUDIOS EN LÁMINA DELGADA. SE MUESTRA UNA IMAGEN ACÚSTICA ENTRE LOS 80 Y 87.6 M.	198
FIGURA 6. 14. FOTOGRAFÍAS DE MUESTRAS EN LÁMINA DELGADA TOMADAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES DE LA FACIES KEUPER ARENOSA EN EL SONDEO SB-1.TODAS CON NICOLES CRUZADOS Y ESCALA 0.5 MM.	202
FIGURA 6. 15. DIAGRAFÍAS PARA EL TRAMO 1073 - 1157 M DE PROFUNDIDAD DEL SONDEO SALOBRAL-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER MECÁNICO, VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), COLUMNA LITOLÓGICA, COLUMNA DE ZONACIÓN ESTABLECIDA A PARTIR DEL CROSS-PLOT Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. CROSS-PLOT DE RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR) Y VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) PARA DICHO TRAMO. SE HAN DIFERENCIADO 2 GRUPOS DE PUNTOS (A, B).	204
FIGURA 6. 16. REGISTROS EN EL TRAMO 2098 - 2170 M DE PROFUNDIDAD EN EL SONDEO CARCELÉN-1. DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER MECÁNICO, VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), COLUMNA DE ZONACIÓN A PARTIR DEL CROSS-PLOT GR-Vp DE LA DERECHA, Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. EN EL CROSS-PLOT SE HAN DISTINGUIDO DOS GRUPOS DE PUNTOS (A, B).....	206
FIGURA 6. 17. REGISTROS EN LOS SONDEOS, DE IZQUIERDA A DERECHA, SB-1, SALOBRAL-1Y CARCELÉN-1, CON LOS TRAMOS CORRELACIONADOS E INTERPRETADOS LITOLÓGICAMENTE (RECUADRO AZUL). RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER, ENTUBACIÓN, RESISTIVIDAD NORMAL CORTA (RES16N) Y NORMAL LARGA (RES64N) Y VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp).....	210

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FACIES DETRÍTICAS RESERVORIO

FIGURA 7. 1. REGISTROS PARA EL TRAMO 129 – 165 M EN EL SONDEO SE-3, DE IZQUIERDA A DERECHA: LLEGADA DE LA SEÑAL SÓNICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), VALOR ESTIMADO DE POROSIDAD SÓNICA, COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA, PROFUNDIDADES A LAS QUE SE TOMARON MUESTRAS PARA ANÁLISIS EN LÁMINA DELGADA (POROS LD) Y SUS REFERENCIAS, POROSIDAD Y PERMEABILIDAD EN LABORATORIO (POROS LAB, K LAB), Y LOS ENSAYOS LUGEON EN CAMPO (K LUGEON). A LA DERECHA GRÁFICAS RESULTANTES DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD LUGEON, CORRESPONDIENTES A LOS TRAMOS 130-135 M, 145-150 M Y 160-165 M. EN LA PARTE INFERIOR LA CURVA DE ESTABILIZACIÓN DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN LABORATORIO CORRESPONDIENTE A UNA MUESTRA TOMADA A LA PROFUNDIDAD DE 145.8 M.....	215
FIGURA 7. 2. ESTUDIO DE LA POROSIDAD AL MICROSCOPIO MEDIANTE LÁMINAS DELGADAS TOMADAS A LAS PROFUNDIDADES DE 134 M, 136.9 M, 148.5 M Y 158.4 M (MORR-22A, MORR-23A, MORR-27A Y MORR-31A RESPECTIVAMENTE). A LA IZQUIERDA FOTO DE LÁMINA ORIGINAL Y A LA DERECHA LA POROSIDAD ESTIMADA (EN COLOR NEGRO).	216

- FIGURA 7. 3. FM. ARENISCAS DE ARÉN EN EL SONDEO SE-3, DE IZQUIERDA A DERECHA: PROYECCIÓN POLAR DE LAS ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS (FRACTURAS = ROJO, LAMINACIÓN / ESTRATIFICACIÓN = VERDE), PROYECCIÓN EQUIAREAL DE LAS FRACTURAS, Y REPRESENTACIÓN, MEDIANTE HISTOGRAMA, DE LA FRECUENCIA DE LOS BUZAMIENTOS DE LAS FRACTURAS IDENTIFICADAS. 217
- FIGURA 7. 4. IMAGEN ACÚSTICA EN EL TRAMO 149.5 – 152 M DE LA FM. ARENISCAS DE ARÉN DEL SONDEO SE-3. SE HAN IDENTIFICADO MUY POCAS ESTRUCTURAS, SOLO DOS FRACTURAS DE ALTO ÁNGULO (LÍNEA ROJA) Y MUY POCAS LAMINACIONES (LÍNEA VERDE). ENTRE 150 Y 151 M DE PROFUNDIDAD SE PUEDE APRECIAR UN CAMBIO TEXTURAL QUE INDICA UN INCREMENTO DE LA GRANULOMETRÍA (SEÑALADO CON CÍRCULO DISCONTINUO), Y ESTÁ REFLEJADO POR UN INCREMENTO DE LA IRREGULARIDAD EN EL PERFIL DEL CÁLIPER. 218
- FIGURA 7. 5. TRAMO 134 – 160 M EN LA FORMACIÓN RESERVORIO DEL SONDEO SE-3, DE IZQUIERDA DE DERECHA: PARÁMETRO K-SEIS (NORMALIZADO), ATENUACIÓN, ÍNDICE DE FORMA O SHAPE INDEX (Ic), POROSIDAD SÓNICA, SEÑAL SÓNICA REGISTRADA EN EL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), VELOCIDAD DE ONDAS P ESTIMADA (Vp), IMAGEN ACÚSTICA (AMPLITUD ABI) CON LAS FRACTURAS IDENTIFICADAS A PARTIR DE ÉL, Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LOS VALORES DE PERMEABILIDAD ESTIMADA EN LABORATORIO (KLAB), PERMEABILIDAD LUGEON (K UL) Y, ADEMÁS LA CLASIFICACIÓN LUGEON SEGÚN OLALLA & SOPEÑA, 1991 (M.I. = MUY IMPERMEABLE; P.I. = PRÁCTICAMENTE IMPERMEABLE). 221
- FIGURA 7. 6. REGISTROS EN LA ZONA PERTENECIENTE A LA FM. ARENISCAS DE ARÉN DEL SONDEO CAJIGAR-1, CORRELACIONADA CON LA HOMÓLOGA DEL SONDEO SE-3, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), PERFIL DE POROSIDAD SÓNICA ESTIMADA Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE RESALTA LA ZONA DE ARENISCAS CON MAYOR POROSIDAD SÓNICA. 222
- FIGURA 7. 7. REGISTROS PERTENECIENTES AL SONDEO MONESMA-1 PARA EL TRAMO 1180 – 1235 M, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), POTENCIAL NATURAL (SP), CÁLIPER MECÁNICO, POROSIDAD NEUTRÓN Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. 223
- FIGURA 7. 8. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD SÓNICA CON RESPECTO A LA VARIACIÓN DE PRESIÓN, EN EXPERIMENTOS SOBRE ARENISCAS (INSTITUTO FRANCÉS DEL PETRÓLEO, SERRA, 2004). 225
- FIGURA 7. 9. REGISTROS EN EL TRAMO 66 – 88.6 M DE PROFUNDIDAD EN EL SONDEO SB-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: IMAGEN ACÚSTICA Y FRACTURAS IDENTIFICADAS, COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA Y MINERALOGÍA IDENTIFICADA, POROSIDAD A PARTIR DE MUESTRAS EN LÁMINA DELGADA (POROS LD), CON LAS FOTOS DE LAS LÁMINAS Y SU POROSIDAD EN NEGRO A LA DERECHA, Y ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON EN CAMPO (K LUGEON), CON EL GRÁFICO OBTENIDO A LA DERECHA. 230
- FIGURA 7. 10. FACIES ARENOSA DEL KEUPER DEL SONDEO SB-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: PROYECCIÓN POLAR DE LAS ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS (ESTRATIFICACIÓN / LAMINACIÓN = VERDE; FRACTURAS = ROJO); PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA EQUIAREAL DE LOS PLANOS DE FRACTURACIÓN IDENTIFICADOS A PARTIR DEL REGISTRO DE IMAGEN ACÚSTICA. SE REPRESENTA, MEDIANTE HISTOGRAMA, LA FRECUENCIA DE LOS BUZAMIENTOS DE LAS FRACTURAS IDENTIFICADAS. 231
- FIGURA 7. 11. REGISTROS EN EL TRAMO 1074 – 1140 M DE PROFUNDIDAD EN LA FACIES KEUPER DEL SONDEO SALOBRAL-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER MECÁNICO, VALOR ESTIMADO DE POROSIDAD SÓNICA, POROSIDAD SÓNICA CORREGIDA POR ARCILLOSIDAD (POROS WCRR) Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. 233
- FIGURA 7. 12. REGISTROS EN LA FACIES KEUPER PARA EL TRAMO 2095 – 2163 M EN EL SONDEO CARCELÉN-1, DE IZQUIERDA A DERECHA: POTENCIAL NATURAL (SP), CÁLIPER MECÁNICO, DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN, POROSIDAD NEUTRÓN, POROSIDAD SÓNICA Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. 234

DISCUSIÓN

FIGURA 8. 1. IDENTIFICACIÓN DE LA LLEGADA DE LA PRIMERA Y SEGUNDA SEÑAL EN LOS RECEPTORES 2 Y 3 (RX2-1A Y RX3-1A RESPECTIVAMENTE), Y REGISTROS, DE IZQUIERDA A DERECHA: SEÑAL SÓNICA EN EL RECEPTOR 2 (RX2-1A) Y RECEPTOR 3 (RX3-1A), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) Y ONDAS S (Vs), INDICE DE FORMA (Ic) EN CADA UNO DE LOS RECEPTORES (Ic RX2, Ic RX3), ATENUACIÓN EN DECIBELIOS Y EN DECIBELIOS/CM, FRECUENCIA SOBRE EL RECEPTOR 2 (FREQRX2), POROSIDAD SÓNICA Y FINALMENTE, FACTOR K-SEIS.	244
FIGURA 8. 2. RESULTADOS DE PERMEABILIDAD LUGEON (k) Y DE POROSIDAD (LÁMINA DELGADA) PARA LAS FORMACIONES RESERVORIO DE LOS SONDEOS SE-4 Y SB-4.	249
FIGURA 8. 3. GRADO DE SELECCIÓN DE LOS SEDIMENTOS EN LÁMINA DELGADA EN DOS MUESTRAS PERTENECIENTES A LAS ARENISCAS DE LA FACIES KEUPER ARENOSO DEL SONDEO SB-1 Y A LAS ARENISCAS DE LA FM. ARÉN DEL SONDEO SE-3 (MODIFICADO DE PETTIJOHN, 1975).	251
FIGURA 8. 4. EVOLUCIÓN DE LA POROSIDAD CON LA PROFUNDIDAD (MODIFICADO DE HAYES, 1979).	252
FIGURA 8. 5. ESTRUCTURA ANTICLINAL DE OLSON. SE INDICA LA POSICIÓN DEL SONDEO SURPIRENAICA-1 (IGME, 2014).	253

ANEXOS**ANEXO I**

FIGURA A1- 1. IZQUIERDA: ESQUEMA GEOLÓGICO DE LOS DOMINIOS PRINCIPALES DE LA CORDILLERA CANTÁBRICA Y LOCALIZACIÓN DEL SONDEO SD-4 (CÍRCULO ROJO) (MODIFICADO DE VERA, 2004). DERECHA: ESQUEMA SINTÉTICO DE LAS UNIDADES PALEOGEOGRÁFICAS DE LA CUENCA MESO-TERCIARIA DE ASTURIAS, DONDE SE PUEDE OBSERVAR LA CUENCA DE GIJÓN-VILLAVICIOSA (MODIFICADO DEL MAGNA50, HOJA 15, IGME).	284
FIGURA A1- 2. REGISTROS EN EL SONDEO SD-4, DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), INDUCCIÓN ELÉCTRICA (CONDUCTIVIDAD) Y DE RESISTIVIDAD, SEÑAL SÓNICA RECIBIDA EN EL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp) Y DE ONDAS S (Vs), Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES A LAS QUE SE TOMARON MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE DRX Y PARA LÁMINA DELGADA CON 4 FOTOGRAFÍAS DE LAS MISMAS, Y AMPLIACIÓN DE UN EJEMPLO DE IMAGEN ÓPTICA TOMADA ENTRE LOS 135 Y 141.7 M DE PROFUNDIDAD. SE MUESTRA UNA FOTO DE TESTIGO CON LA PRESENCIA DE UNA CAVIDAD DE TAMAÑO CASI CENTIMÉTRICO.	286
FIGURA A1- 3. LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA DEL SONDEO SB-3 (MODIFICADO DE VERA 2004).	288
FIGURA A1- 4. TRAMO 8 - 72 M DE LA FM. DETRÍTICO BASAL EN EL SONDEO SB-3. REGISTROS DE IZQUIERDA A DERECHA: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), CÁLIPER ACÚSTICO, ESPECTROMETRÍA DE K, U Y Th, Y RELACIONES Th/K, Th/U Y U/K, RESISTIVIDAD NORMAL CORTA (RES16N) Y LARGA (RES64N), VELOCIDAD DE ONDAS P (Vp), LLEGADA DE LA SEÑAL SÓNICA AL PRIMER RECEPTOR (RX1-1A), IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO Y COLUMNA LITOLÓGICA INTERPRETADA. SE INDICAN LAS PROFUNDIDADES DONDE SE TOMARON MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE DRX, Y LA IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO ENTRE LOS 57 Y LOS 71 M DE PROFUNDIDAD.	290

ANEXO II

FIGURA A2- 1. FOTOGRAFÍA REALIZADA DURANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN EL SONDEO SB-3, LOCALIZADO EN CANTILLANA (SEVILLA).	294
FIGURA A2- 2. FOTOGRAFÍA REALIZADA DURANTE LA TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA EN EL SONDEO SB-4, LOCALIZADO EN BACAROT (ALICANTE).	294

FIGURA A2- 3. FOTOS DURANTE LAS PRUEBAS PREVIAS A LA TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA DEL SONDEO SE-3, EN ORRIT (LLEIDA). EN LA FOTO DE LA DERECHA, SE PUEDE OBSERVAR AL FONDO, EL AFLORAMIENTO DE LAS LUTITAS ROJAS DE LA FACIES GARUM PERTENECIENTES A LA PARTE FINAL DE LA FORMACIÓN TREMP. 294

FIGURA A2- 4. FOTO DE LA TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA EN EL SONDEO SE-4, LOCALIZADO EN ARBOLÍ (TARRAGONA), MOMENTOS DESPUÉS DE HABERSE FINALIZADO LA PERFORACIÓN..... 295

FIGURA A2- 5. FOTOGRAFÍAS REALIZADA DURANTE LA TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA DEL SONDEO SD-4, LOCALIZADO EN GIJÓN (ASTURIAS). 295

FIGURA A2- 6. A) SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS DATOS DATOS DE TRAVEL TIME NO CENTRALIZADOS (IZQUIERDA) Y DESPUÉS DE HABER APLICADO EL PROCESO DE CENTRALIZADO (DERECHA). B) LAS MISMAS SECCIONES, EN TRANSVERSAL. 296

FIGURA A2- 7. ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FLUIDO A PARTIR DEL REGISTRO DE IMAGEN ACÚSTICA. 297

FIGURA A2- 8. EJEMPLO DE REGISTRO ACÚSTICO (IZQUIERDA) Y SU VISUALIZACIÓN 3D (DERECHA). EN LA IMAGEN 3D SE APRECIA UNA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SONDEO (MARGEN DERECHO SUPERIOR) Y LA SECCIÓN PLANAR CORRESPONDIENTE (MARGEN DERECHO INFERIOR), ADEMÁS DE UNA ESCALA DE AMPLITUDES (MARGEN IZQUIERDO INFERIOR). 297

LISTA DE TABLAS

INTRODUCCIÓN

TABLA 1. 1. SONDEOS TESTIFICADOS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO CON SUS RESPECTIVAS LITOLOGÍAS Y ESTRATIGRAFÍAS EN LAS ZONAS SELLO Y ALMACÉN.	8
TABLA 1. 2. RESUMEN DE CRITERIOS A TENER EN CUENTA EN EL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO Y SELLADO DE CO ₂ (MODIFICADO DE CHADWICK ET AL, 2008).....	14

METODOLOGÍA

TABLA 2. 1. TÉCNICAS DE TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA UTILIZADAS EN ESTA TESIS Y SU APLICACIÓN EN EL ÁMBITO SELLO-ALMACÉN, ASÍ COMO LAS CORRECCIONES APLICADAS A CADA UNO DE ELLOS. (*) BAJO CONDICIONES ESPECIALES DE SONDEO.....	18
TABLA 2. 2. RELACIÓN DE DISTANCIAS ENTRE EL TRANSMISOR TX Y LOS RECEPTORES DE LA SONDA RX.....	25
TABLA 2. 3. COMPARACIÓN DE POROSIDADES Y OTROS PARÁMETROS EN ARENISCAS Y CALIZAS ANTES Y POSTERIORMENTE AL PROCESO DE DIAGÉNESIS (ALONSO, 2006).....	46
TABLA 2. 4. RESPUESTA DE ALGUNOS REGISTROS GEOFÍSICOS A DIFERENTES TIPOS DE POROSIDAD (MODIFICADO DE KEYS, 1989).....	47
TABLA 2. 5. RANGOS DE TIEMPOS DE TRÁNSITO DE MATRIZ TEÓRICOS, Y EL VALOR MÁS COMÚNMENTE UTILIZADO (MODIFICADO DE SCHLUMBERGER WELL SERVICES, 2003).....	49
TABLA 2. 6. CLASIFICACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS EN FUNCIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN UNIDADES LUGEON (UL) Y DE LA PRESIÓN SOMETIDA (KPA), SEGÚN OLALLA & SOPEÑA (1991).	59

INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES CARBONATADAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES

TABLA 4. 1. REGISTROS ESTUDIADOS EN LOS SONDEOS SE-4: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), IMAGEN ÓPTICA Y ACÚSTICA DE SONDEO (OBI, ABI) Y REGISTRO SÓNICO DE ONDA COMPLETA (FWS). SE INDICA LOS TRAMOS TESTIFICADOS Y EL NÚMERO DE MUESTRAS ANALIZADAS MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) Y LÁMINA DELGADA (LD) EN LA FACIES M2 (MUSCHELKALK MEDIO) Y M1 (MUSCHELKALK INFERIOR) COMO APOYO A LA INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA MEDIANTE LAS DIAGRAFÍAS.....	93
TABLA 4. 2. REGISTROS DISPONIBLES EN EL SONDEO REUS-1: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), INTERVALTRANSIT TIME (DT), RESISTIVIDAD LATERAL PROFUNDA (LLD), RESISTIVIDAD LATERAL SOMERA (LLS), POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP), BULK DENSITY (RHOB) Y CÁLIPER MECÁNICO. SE INDICA EL NÚMERO DE MUESTRAS (RIPIOS) ANALIZADAS MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) EN LAS FACIES CORRELACIONADAS CON LAS DEL SONDEO SE-4 (MUSCHELKALK MEDIO Y MUSCHELKALK INFERIOR).	94
TABLA 4. 3. PARÁMETROS ESTIMADOS Y REGISTRADOS EN LOS SONDEOS SE-4 Y REUS-1: VSH = VOLUMEN DE ARCILLOSIDAD; VP = VELOCIDAD DE ONDAS P; RT = RESISTIVIDAD NORMAL PROFUNDA; SP = POTENCIAL ESPONTÁNEO.	120
TABLA 4. 4. REGISTROS ADQUIRIDOS EN EL SONDEO SB-4; RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO (ABI), REGISTRO SÓNICO DE ONDA COMPLETA (FWS), Y MUESTRAS ANALIZADAS, MEDIANTE DIFRACCIÓN DE	

RAYOS X (DRX) Y MEDIANTE LÁMINA DELGADA (LD) EN LA FM. TORREMENDO Y FM. LAS VENTANAS DEL SONDEO SOMERO SB-4.	121
TABLA 4. 5. PARÁMETROS ESTIMADOS Y REGISTRADOS EN LOS SONDES SB-4 Y BENEJÚZAR-1. VSH = VOLUMEN DE ARCILLAS; VP = VELOCIDAD DE ONDAS P; SP = POTENCIAL ESPONTÁNEO.	138

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FORMACIONES CARBONATADAS RESERVORIO

TABLA 5. 1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS LUGEON, EN UNIDADES LUGEON (U.L.) Y CM/S, REALIZADOS EN LA FACIES M1 DEL SONDEO SE-4 (P.I.= PRÁCTICAMENTE IMPERMEABLE).	147
TABLA 5. 2. TABLA RESUMEN DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS ESTIMADOS EN LA FACIES MUSCHELKALK INFERIOR DEL SONDEO SE-4 Y DEL TRAMO 2110 – 2147 M DE REUS-1; POROSIDAD SÓNICA (ϕ_s), POROSIDAD POR DENSIDAD (ϕ_D), POROSIDAD EN LÁMINA DELGADA (ϕ_{LD}), POROSIDAD TOTAL EN LABORATORIO (ϕ_{TLAB}), PERMEABILIDAD ESTIMADA EN LABORATORIO (K LAB), PERMEABILIDAD LUGEON (K LUGEON).	152
TABLA 5. 3. VALORACIONES DE LAS FORMACIONES SELLO Y ALMACÉN EN LAS FACIES M2 Y M1 DE LOS SONDEOS SE-4 Y REUS-1 (ϕ_T =POROSIDAD TOTAL, ϕ_E = POROSIDAD EFECTIVA).	155
TABLA 5. 4. RESULTADOS DE PERMEABILIDAD LUGEON, EN UNIDADES LUGEON (U.L.) Y CM/S, DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA FM. LAS VENTANAS EN EL SONDEO SB-4 (MI =MUY IMPERMEABLE; P=PERMEABLE; MP= MUY PERMEABLE). 162	
TABLA 5. 5. VALORES ESTIMADOS EN LA FM. CALIZAS DE LAS VENTANAS DE SB-4 Y EN LA EQUIVALENTE, FM. PUJÁLVAZ DEL SONDEO BENEJÚZAR-1: POROSIDAD SÓNICA (ϕ_s), POROSIDAD NEUTRÓN (ϕ_N), POROSIDAD POR DENSIDAD (ϕ_D), POROSIDAD EN LÁMINA DELGADA (ϕ_{LD}), POROSIDAD EN LABORATORIO (ϕ_{TLAB}), Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LABORATORIO (K LAB) Y PERMEABILIDAD LUGEON (K LUGEON).	167
TABLA 5. 6. PARÁMETROS ESTIMADOS PARA LA VALORACIÓN DE LA FORMACIÓN SELLO Y FORMACIÓN ALMACÉN DE LOS SONDEOS SB-4 Y BENEJÚZAR-1 (ϕ_T =POROSIDAD TOTAL, ϕ_E = POROSIDAD EFECTIVA).	169

INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES DETRÍTICAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES

TABLA 6. 1. REGISTROS ADQUIRIDOS EN ESTA TESIS EN EL SONDEO SE-3: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO (ABI) Y REGISTRO SÓNICO DE ONDA COMPLETA (FWS). SE INDICA EL NÚMERO DE MUESTRAS ANALIZADAS MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) Y EN LÁMINA DELGADA (LD) EN LA FACIES GARUM Y FM. POSA Y EN LA FM. ARENISCAS DE ARÉN.	171
TABLA 6. 2. REGISTROS DISPONIBLES PARA EL ESTUDIO DEL SONDEO MONESMA-1: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), RESISTIVIDAD NORMAL CORTA AMPLIFICADA (ASN), POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP), CÁLIPER MECÁNICO Y REGISTRO DE POROSIDAD NEUTRÓN.	172
TABLA 6. 3. PARÁMETROS REGISTRADOS Y ESTIMADOS EN LOS SONDEOS SE-3, CAJIGAR-1 Y MONESMA-1. LOS RANGOS DE VALORES SIGNIFICAN EL MÍNIMO Y EL MÁXIMO MOSTRADO. VSH = VOLUMEN DE ARCILLOSIDAD; VP = VELOCIDAD DE ONDAS P; RT = RESISTIVIDAD NORMAL PROFUNDA; SP = POTENCIAL ESTÁNDAR.	194
TABLA 6. 4. REGISTROS ADQUIRIDOS EN ESTA TESIS (RANGOS DE PROFUNDIDAD) EN LA FACIES KEUPER ARCILLOSO Y FACIES KEUPER ARENOSO DEL SONDEO SB-1: RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), IMAGEN ACÚSTICA DE SONDEO (ABI). SE INDICA EL NÚMERO DE MUESTRAS TOMADAS PARA ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) Y LÁMINA DELGADA (LD).	195

TABLA 6. 5. LISTA DE REGISTROS DISPONIBLES EN LOS SONDEOS PROFUNDOS DE PETRÓLEO SALOBRAL-1 Y CARCELÉN-1. RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL (GR), INTERVALTRANSIT TIME (DT), POTENCIAL ESPONTÁNEO (SP), CÁLIPER, POROSIDAD NEUTRÓN.	195
--	-----

TABLA 6. 6. PARÁMETROS EN LOS SONDEOS SB-1, SALOBRAL-1 Y CARCELÉN-1. VSH = RADIOACTIVIDAD GAMMA NATURAL; VP = VELOCIDAD DE ONDAS P; RT = RESISTIVIDAD NORMAL PROFUNDA; SP = POTENCIAL ESPONTÁNEO.	211
--	-----

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FACIES DETRÍTICAS RESERVORIO

TABLA 7. 1. RESULTADOS DE PERMEABILIDAD LUGEON, EN UNIDADES LUGEON (U.L.) Y CM/S, PARA LOS TRAMOS ENSAYADOS EN LA FM. ARENISCAS DE ARÉN DEL SONDEO SE-3. CLASIFICACIÓN SEGÚN OLAYA & SOPEÑA (1991) (M.I.: MUY IMPERMEABLE, P.I.: PRÁCTICAMENTE IMPERMEABLE).	219
---	-----

TABLA 7. 2. RANGOS DE VALORES DE ALGUNOS DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS ESTIMADOS PARA LOS PARES FORMACIÓN CONFINANTE (FACIES GARUM) Y FORMACIÓN RESERVORIO (FM. ARENISCAS DE ARÉN) EN LOS SONDEOS SE-3 Y LOS TRAMOS ESTUDIADOS DE LOS SONDEOS DE PETRÓLEO CAJIGAR-1 Y MONESMA-1 (ϕ_s = POROSIDAD SÓNICA; ϕ_N = POROSIDAD NEUTRÓN; ϕ_{TLAB} = POROSIDAD TOTAL EN LABORATORIO; KW = CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA; K LUGEON = PERMEABILIDAD POR LUGEON).	224
---	-----

TABLA 7. 3. RESULTADOS OBTENIDOS Y VALORACIONES EN LAS FORMACIONES CONFINANTES Y RESERVORIOS DE SE-3, CAJIGAR-1 Y MONESMA-1 ESTUDIADAS (ϕ_T = POROSIDAD TOTAL; ϕ_s = POROSIDAD SÓNICA; ϕ_N = POROSIDAD NEUTRÓN).	227
---	-----

TABLA 7. 4. TABLA CON RESULTADOS DE PERMEABILIDAD LUGEON, EN UNIDADES LUGEON (U.L.) Y CM/S, DEL TRAMO ENSAYADO EN LA FACIES KEUPER ARENOSO DEL SONDEO SB-1 (M.I. = MUY IMPERMEABLE).	232
---	-----

TABLA 7. 5. RANGOS ESTIMADOS DE POROSIDAD NEUTRÓN (ϕ_N), SÓNICA (ϕ_s) Y POROSIDAD A PARTIR DE LÁMINA DELGADA (ϕ_{LD}) EN LAS FACIES KEUPER DEL SONDEO SB-1 Y LOS TRAMOS CORRELACIONADOS DE LOS SONDEOS PROFUNDOS SALOBRAL-1 Y CARCELÉN-1. SE MUESTRA EL RESULTADO DEL ENSAYO LUGEON REALIZADO EN LA FACIES KEUPER ARENOSA DEL SONDEO SOMERO SB-1. LOS VALORES DE POROSIDAD EN SB-1 ESTÁN DADOS PARA LAS ARENISCAS ...	235
--	-----

TABLA 7. 6. VALORACIONES EN LAS FORMACIONES SELLO Y ALMACÉN DE LOS TRAMOS ESTUDIADOS EN LOS SONDEOS SB-1, SALOBRAL-1 Y CARCELÉN-1 (ϕ_{LD} = POROSIDAD A PARTIR DE LÁMINA DELGADA).	237
---	-----

DISCUSIÓN

TABLA 8. 1. COMPARACIÓN DE VARIABLES QUE VAN A INFLUIR EN LA CALIDAD DE UN RESERVORIO DE CARBONATOS Y DE ARENISCAS (MODIFICADO DE CHOQUETTE & PRAY, 1970).	240
---	-----

ANEXOS

ANEXO I

TABLA A1- 1. REGISTROS ADQUIRIDOS EN LOS SONDEOS SD-4 Y SB-3 (GR = NATURAL GAMMA RAY, ABI = ACOUSTIC BOREHOLE IMAGE, OBI = OPTICAL BOREHOLE IMAGE, FWS = FULL WAVE SONIC, SP = SPONTANEOUS POTENTIAL, INDUC = INDUCCIÓN ELÉCTRICA Y RES = RESISTIVIDAD). SE INDICA EL NÚMERO DE MUESTRAS ANALIZADAS: DRX = DIFRACCIÓN DE RAYOS X, LD = LÁMINA DELGADA, LUGEON = ENSAYO DE PERMEABILIDAD LUGEON.	283
--	-----

ANEXO II

TABLA A2- 1. DIÁMETROS DE PERFORACIÓN Y DE ENTUBACIÓN PARA TODOS LOS SONDEOS SOMEROS TESTIFICADOS, ASÍ COMO LAS PROFUNDIDADES DE PERFORACIÓN Y DE TESTIFICACIÓN, Y EL NIVEL DEL AGUA EN EL MOMENTO DE REALIZAR LAS MEDIDAS.....	293
---	-----

ANEXO III

TABLA A3- 1. RESULTADOS DE DRX EN LAS MUESTRAS ANALIZADAS DEL SONDEO SE-4. (*) LA CLASIFICACIÓN NO RESULTA CONCLUYENTE AL NO APARECER REFLEJADAS EN EL DIFRACTOGRAMA TODAS LAS REFLEXIONES CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE MINERAL.....	301
TABLA A3- 2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS DE MUESTRAS EN POLVO MEDIANTE DRX PARA EL TRAMO ESTUDIADO DEL SONDEO REUS-1. (*) LA CLASIFICACIÓN NO RESULTA CONCLUYENTE AL NO APARECER REFLEJADAS EN EL DIFRACTOGRAMA TODAS LAS REFLEXIONES CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE MINERAL.....	301
TABLA A3- 3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ANÁLISIS MEDIANTE DRX DE MUESTRAS EN POLVO PERTENECIENTES AL SONDEO SB-4. (*) LA IDENTIFICACIÓN NO RESULTA CONCLUYENTE AL NO APARECER REFLEJADAS EN EL DIFRACTOGRAMA TODAS LAS REFLEXIONES CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE MINERAL.....	302
TABLA A3- 4. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE DRX EN EL SONDEO SE-3. (*) LA IDENTIFICACIÓN NO RESULTA CONCLUYENTE AL NO APARECER REFLEJADAS EN EL DIFRACTOGRAMA TODAS LAS REFLEXIONES CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE MINERAL.....	302
TABLA A3- 5. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ANÁLISIS MEDIANTE DRX EN EL SONDEO SB-1. (*) LA IDENTIFICACIÓN NO RESULTA CONCLUYENTE AL NO APARECER REFLEJADAS EN EL DIFRACTOGRAMA TODAS LAS REFLEXIONES CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE MINERAL.....	303
TABLA A3- 6. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS MEDIANTE DRX EN MUESTRAS TOMADAS EN SB-3. (*) LA IDENTIFICACIÓN NO RESULTA CONCLUYENTE AL NO APARECER REFLEJADAS EN EL DIFRACTOGRAMA TODAS LAS REFLEXIONES CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE MINERAL, Y SER SUS INTENSIDADES MUY BAJAS.....	303
TABLA A3- 7. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ANÁLISIS MEDIANTE DRX EN EL SONDEO SD-4. (*) LA IDENTIFICACIÓN NO RESULTA CONCLUYENTE AL NO APARECER REFLEJADAS EN EL DIFRACTOGRAMA TODAS LAS REFLEXIONES CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE MINERAL, Y SER SUS INTENSIDADES MUY BAJAS.....	304

RESUMEN

Los estudios extraídos de los trabajos de testificación geofísica de sondeos constituyen, en el ámbito del estudio de almacenamiento geológico de CO₂, una herramienta muy útil debido a las múltiples ventajas que su aplicación reporta. Estos estudios, conjuntamente con los obtenidos en superficie, son imprescindibles para obtener información estratigráfica y estructural de una cuenca sedimentaria. La tecnología actual permite, además, determinar la distribución y caracterización de facies y secuencias, las heterogeneidades entre sondeos y las propiedades petrofísicas.

En esta tesis doctoral se presentan los resultados obtenidos a partir de la interpretación litológica y caracterización petrofísica de formaciones geológicas favorables para el sellado y almacén geológico de CO₂ en diversas cuencas de la Península Ibérica, mediante el estudio de diagrfías y diversas técnicas complementarias.

La metodología seguida comprende el estudio e interpretación conjunta de registros geofísicos de sondeos (diagrfías) pertenecientes a sondeos someros tipo “*Slimhole*”, los cuales fueron testificados dentro del proyecto en que se engloba dicha tesis (ALGECO2, 2009), y de registros pertenecientes a sondeos antiguos y profundos de petróleo. Para completar dicha interpretación se han utilizado otras técnicas como ensayos de campo y de laboratorio, análisis al microscopio de muestras en lámina delgada y de Difracción de Rayos X.

Mediante el registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) principalmente, se llevó a cabo una correlación estratigráfica entre las formaciones de los sondeos someros y las formaciones análogas en los sondeos profundos próximos. Posteriormente, se procedió a estudiar en paralelo la litología y la petrofísica de cada uno de ellos, para poder establecer analogías entre las diversas formaciones en superficie y en profundidad.

El análisis e interpretación de los registros de imagen de sondeo ha permitido determinar la frecuencia de fracturación localizando en profundidad zonas con debilitamiento estructural, susceptibles de ser permeables, estableciendo la idoneidad de la zona sello y almacén.

A partir del registro sónico de onda completa y aplicando una técnica reciente mediante el estudio de la atenuación de las ondas sónicas, se ha estimado el parámetro I_k-Seis según la metodología de Mari & Guillemot (2012). Los atributos acústicos, necesarios para calcular dicho parámetro, han comprendido la atenuación (Att) y la amplitud (A) de la señal acústica, por lo que fue necesario un estudio pormenorizado de las señales sónicas registradas. Este

parámetro acústico ha permitido localizar zonas permeables a lo largo de las formaciones estudiadas en los sondeos someros.

La caracterización petrofísica de las formaciones geológicas almacén se ha complementado con la realización de ensayos en laboratorio de conductividad hidráulica en célula triaxial, obteniéndose el valor de la permeabilidad hidráulica (K_w), la porosidad efectiva (ϕ_e) y porosidad total (ϕ_t). La permeabilidad obtenida en laboratorio han sido correlacionada con la estimada en campo a partir de ensayos de permeabilidad Lugeon, con las identificaciones estructurales de la pared del sondeo llevadas a cabo a partir de la imagen acústica de sondeo, y con las observaciones de permeabilidad a partir de las diagráffas y del análisis de la atenuación de las ondas sísmicas. Finalmente, estos datos han sido integrados en el conjunto de resultados derivados del estudio de la porosidad.

Se han obtenido resultados óptimos para las formaciones sello en la mayoría de los casos estudiados, tanto en extensión lateral como en potencia. En el caso de las formaciones reservorio también muestran buena continuidad lateral, aunque los parámetros petrofísicos estudiados han indicado resultados muy variables: las permeabilidades obtenidas son más bajas de lo esperado, y los valores de porosidad, que muestran una gran variación, se presentan más optimistas en el caso de las formaciones carbonatadas.

Los resultados obtenidos confirman la elevada heterogeneidad existente en las distintas formaciones geológicas estudiadas tanto en los sondeos someros como en los sondeos profundos, constatando así la idoneidad de las técnicas aplicadas. Los estudios litológicos y petrofísicos locales, con sus diferentes escalas, han resultado ser fundamentales a la hora de profundizar en el conocimiento, a nivel de cuenca, de las formaciones sello y reservorio, cuya interrelación no siempre es unívoca. La naturaleza de una formación sello o reservorio depende en gran medida de su historia geológica, y como tal, podrá presentar características muy diferentes de una cuenca sedimentaria a otra, mostrando en consecuencia, propiedades tan distintas como variables hayas actuado a lo largo de su génesis y evolución. La metodología presentada cubre una buena parte del abanico de posibilidades de estudio que pueden llevarse a cabo dentro de una cuenca sedimentaria, constituyendo un primer paso para una evaluación completa y rigurosa de un potencial par sello- almacén de CO_2 .

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la geología del subsuelo en las últimas décadas ha experimentado un enorme crecimiento gracias al desarrollo de nuevas tecnologías. Paralelamente, se ha producido un aumento continuo de la población y con ello, las necesidades de suministros, lo que ha forzado a la búsqueda de nuevos yacimientos energéticos y de almacenamientos estratégicos que aseguren esos suministros.

El modelo energético global se caracteriza por un crecimiento constante del consumo de energía, basado principalmente en los combustibles fósiles y, por tanto, con un carácter marcadamente insostenible a largo plazo, tanto por los riesgos de cantidad y precio que puedan presentarse, como por el coste medioambiental a través del cambio climático.

El origen del cambio climático radica en la emisión masiva a la atmósfera de los gases de efecto invernadero (GEI), y es muy probable que la causa se deba a emisiones antropogénicas (IPCC, 2007). Arrhenius (1896) ya mostró cómo el incremento de CO₂ en la atmósfera podía alterar la temperatura en la superficie de la Tierra. El último informe del IPCC (2014) hace referencia a la evaluación de los aspectos socioeconómicos del cambio climático y sus consecuencias para el desarrollo sostenible, los aspectos regionales, la gestión de riesgos y la elaboración de una respuesta mediante la adaptación y la mitigación.

Si las tendencias actuales de producción y consumo de energía persisten, la temperatura global se incrementará. Por ello, desde diversos organismos internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (AIE) o la Comisión Europea, se plantea como objetivo las reducciones de emisiones coherentes con la limitación del incremento de temperatura (2°C).

La solución pasa por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, bien de forma directa mejorando la eficiencia energética, o bien mediante la implantación de tecnologías que ayuden a combatir el exceso de gases, a través, por ejemplo, del uso de energías renovables, o de la captura y almacenamiento de CO₂.

Para afrontar la problemática del cambio climático se firmó en 1997, el Protocolo de Kyoto, en el que, basándose en los principios de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, los países industrializados se comprometían a reducir sus emisiones de GEI,

estableciendo un marco de compromisos de control de emisiones a la atmósfera. Dicho protocolo entró en vigor en 2005.

Desde la 13ª Conferencia de las Partes (COP13) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en Bali en 2007, se ha estado trabajando para alcanzar un acuerdo internacional que fijara un marco que lo sustituyera. En la Figura 1.1, se pueden ver las diferentes cumbres sobre el cambio climático, desarrolladas desde el año 1972 hasta la que será la futura cumbre, a finales del 2015 en París.

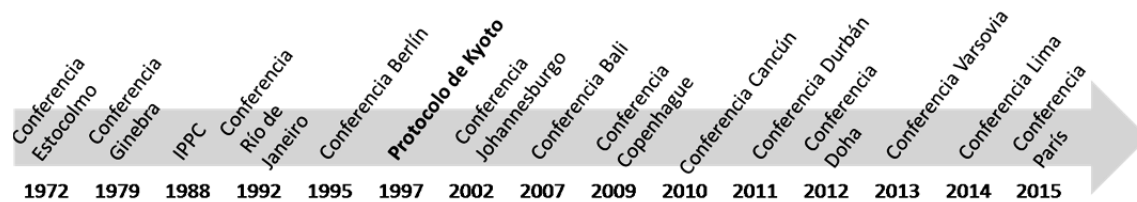


Figura 1. 1. Cumbres de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Fuente: Naciones Unidas y elaboración propia.

En 2009, el Consejo Europeo fijó el objetivo de reducir las emisiones internas de gases de efecto invernadero (GEI) un 40 % antes de 2030, y un 80 % antes de 2050 (dichos niveles calculados respecto a los niveles de 1990). En 2011, se firmó un estudio iniciado por la Comisión Europea para apoyar este objetivo, denominado *Energy Roadmap 2050* - Hoja de Ruta de la Energía para 2050 (Roadmap 2050).

En enero de 2014, la Comisión Europea publicó una Comunicación sobre el futuro marco europeo para el año 2030 en materia de cambio climático y energía (*Energy and Climate Framework for 2030*), planteando una reducción obligatoria del 40% de emisiones de CO₂ para ese año, y la posibilidad de establecer también objetivos para las energías renovables.

La captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CAC) puede contribuir significativamente en la lucha contra el cambio climático, pero conviene tener en cuenta el impacto sobre la salud humana o sobre el entorno que ello puede tener. Los lugares de almacenamiento deben estar localizados a profundidades donde la presión predominante mantenga el CO₂ en un estado supercrítico, es decir, iguales o superiores a los 800 m; en este caso el CO₂ ocupa mucho menos espacio en el subsuelo que en superficie (Holloway, 2007).

El almacenamiento estratégico de gas natural es una de las actividades industriales más semejantes al almacenamiento geológico de CO₂. Históricamente, muchas de las tecnologías utilizadas para la evaluación de hidrocarburos se han empleado en la búsqueda de almacenes estratégicos de gas natural, y son las que también se utilizan en la búsqueda y caracterización

de almacenes de CO₂ antropogénico. Entre las muchas técnicas de estudio aplicadas a este campo, se encuentra el uso de técnicas de testificación geofísica de sondeos (diagrafías).

La testificación geofísica de sondeos consiste en medir *in situ* diferentes parámetros físicos como: la resistividad eléctrica del material, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas o la temperatura y conductividad del fluido. Los parámetros físicos se miden de forma continua o puntualmente mediante diferentes sondas (sensores) que se desplazan a lo largo del sondeo. El conjunto de medidas de un parámetro en todo el rango de profundidad investigado constituye una diagrafía o *log*.

Las diagrafías son fundamentales para el reconocimiento de la geología del subsuelo; su interpretación es básica en el análisis sedimentológico y estratigráfico, permitiendo con ello establecer la serie litológica, estratigrafía, las facies o la identificación de discontinuidades. A partir de su interpretación, se pueden establecer las unidades sedimentarias correspondientes, pudiendo llegar a identificar la evolución lateral y espacial de dichas unidades. Los registros de imagen son utilizados comúnmente para reconocimiento de estructuras sedimentarias, definiendo así la litología, o el mantenimiento y seguimiento de las condiciones en las que se encuentra la entubación, los fenómenos de corrosión, etc.

El desarrollo más importante en el campo de la testificación geofísica se ha realizado en el ámbito de la exploración-explotación de hidrocarburos para la caracterización de reservorios (Schlumberger, 1987). La aplicación de los registros de sondeos al almacenamiento de CO₂ resulta ventajosa pues permite una gran parte de la caracterización de una formación geológica como reservorio o como sello para almacenamiento del dióxido de carbono. En los últimos años, su aplicación también se ha extendido al campo de la hidrogeología y minería (Keys, 1989; Kirsch, 2009). Los trabajos desarrollados en el campo de las diagrafías y relacionados con la captura, inyección y almacenamiento de CO₂ son numerosos (Xue *et al.*, 2005; Norden *et al.*, 2010; Ivanova *et al.*, 2012; Pradhan *et al.*, 2015).

Los usos convencionales de las diagrafías incluyen la estimación de la conductividad hidráulica de los niveles de un acuífero, o, mediante el uso de registros de resistividad o potencial espontáneo, establecer los límites de capas litológicas o diferenciar la zona invadida de la que no lo está, además de establecer las zonas saturadas de agua mediante el cálculo del factor de formación. Otras aplicaciones más específicas, en el plano ya petrofísico, son el cálculo de la porosidad de una formación mediante los registros neutrónicos o sónicos, la identificación del sistema de fracturación que permite la estimación de la permeabilidad de la formación geológica, o el nivel de saturación de una roca.

Para una completa caracterización, los datos obtenidos a partir de una interpretación y caracterización petrofísica de diagrfias, deben ser completados con estudios geofísicos en superficie, petrográficos y mineralógicos, ensayos en laboratorio, y finalmente la realización de modelos que permitan predecir el comportamiento futuro de la formación geológica como almacén o sello. Estos estudios son imprescindibles para obtener información estratigráfica y estructural de una cuenca sedimentaria, clave en el ámbito del estudio de almacenamiento geológico de CO₂. La caracterización petrofísica y geológica de un reservorio de CO₂ comparte la metodología propia de los estudios en sondeos: establecimiento de cambios litológicos y estratigráficos, obtención de parámetros petrofísicos e hidroquímicos, identificación de niveles permeables y no permeables, de niveles porosos, distribución y caracterización de facies y secuencias, etc.

1.1 Marco general de la tesis

Para poder cumplir los compromisos adquiridos en el Protocolo de Kyoto, se pusieron en marcha en diferentes países, políticas para impulsar diferentes estudios de captura, transporte y almacenamiento de CO₂.

En 2009, la Comisión Europea creó el Programa Energético Europeo para la Recuperación (EEPR) mediante el cual se establecía ayudas de financiación a proyectos energéticos en tres sectores: gas y electricidad, energía eólica marina y proyectos de captura y almacenamiento de CO₂. De un total de 59 proyectos que recibieron dicha financiación, 6 de ellos están relacionados con el almacenamiento y captura de CO₂: Belchatow (Polonia), Porto Tolle (Italia) y Jaenschwalde (Alemania), ya finalizados, y Rotterdam (Países Bajos), Don Valley (UK) y Compostilla (España), aún en proceso.

A nivel europeo, algunos de los proyectos destacables son el proyecto HYPOGEN (instalación de generación de hidrógeno y electricidad a partir de combustibles fósiles con captura y secuestro de CO₂), el proyecto CASTOR, inaugurado en 2006 en Dinamarca (ensayos de captación de emisiones de CO₂ procedente de las chimeneas de una central térmica de carbón para almacenamiento en el subsuelo), o el proyecto Geocapacity, también iniciado en el año 2006, para la evaluación de la capacidad europea para el Almacenamiento Geológico de CO₂ en 13 países europeos, entre ellos España a través del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

En España, dentro del Programa Nacional de Energía, bajo el proyecto PSE-CO₂, cuyo objetivo principal era disminuir el impacto ambiental, social y económico derivado de las emisiones de gases de efecto invernadero, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) junto con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), coordinaron en 2007 el subproyecto Almacenamiento geológico de CO₂: Criterios de selección de emplazamientos (Ruiz *et al.*, 2007; García Lobón *et al.*, 2011).

El proyecto OXYCFB300 Compostilla, en León, dirigido por Endesa y como socio, CIUDEN, es otro de los proyectos a nivel nacional, cuyo objetivo principal es validar una tecnología a nivel industrial que permitirá renovar las actuales centrales térmicas de combustibles fósiles a partir de 2020 empleando carbones locales, combustibles importados y biomasa. Por otra parte, mediante el proyecto Hontomín, desarrollado en Burgos, también a cargo de CIUDEN, se estudia el almacenamiento de CO₂ en un acuífero salino profundo (Ogaya *et al.*, 2014; Alcalde *et al.* 2014; Otero *et al.*, 2015).

Dentro de los estudios de caracterización de reservorios de CO₂ impulsados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), cabe destacar el realizado junto a la empresa GESSAL en la Cordillera Cantábrica (IGME, 2007). En este estudio, se analizaron la información de los pozos de exploración de hidrocarburos con el fin de evaluar el potencial de almacenamiento de CO₂ de las rocas del subsuelo de la cuenca Vasco Cantábrica. La misma institución presenta el proyecto “Síntesis de la Infraestructura Geológica del Subsuelo de la Cibertera Sedimentaria del Territorio Español”, cuyo objetivo es profundizar en el conocimiento de la naturaleza geológica, estructura y propiedades físicas del subsuelo, y poder determinar su capacidad como almacenamiento geológico de diversas sustancias, especialmente dióxido de carbono con el fin de reducir su concentración en la atmósfera.

Desde abril del 2013, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) forma parte del CO2GeoNet (*The European Network of Excellence on the Geological Storage of CO₂*), una red europea que proporciona información científica sobre la seguridad y eficiencia del almacenamiento geológico de CO₂, y que se engloba dentro del Programa Marco europeo de Competitividad e Innovación (CIP).

Finalmente, como antecedente básico de esta tesis, es preciso señalar que el IGME ha llevado a cabo un programa de Geología del Subsuelo y Almacenamiento Geológico de CO₂ en España, según su Plan Estratégico 2008-2012, cuyo objetivo general es profundizar en el conocimiento de la estructura y propiedades físicas del subsuelo, integrando información geológica, hidrogeológica y geofísica, y como objetivo particular determinar la capacidad,

localización espacial y caracterización geométrica, petrofísica e hidráulica de las formaciones geológicas susceptibles de ser utilizadas como almacén de CO₂, así como establecer el comportamiento del terreno como reservorio geológico. El programa abarca aspectos de investigación y de desarrollo de métodos de modelización geológica en 3D, de análisis estructural, de registros geofísicos, etc. El programa se ha plasmado en el denominado Plan de Selección y Caracterización de Áreas y Estructuras Favorables para el Almacenamiento Geológico de CO₂ en España (Plan ALGECO2, 2009-2014), que ha recibido el apoyo financiero del Instituto para la Reestructuración de la Minería del Carbón y el Desarrollo Alternativo de las Comarcas Mineras IRMC.

El primer año del Plan ALGECO2 (2009-2010) ha resultado en la ejecución de una serie de tareas, entre las que se encuentran principalmente dos (IGME, 2010):

Tarea 1. Identificación de pares formaciones almacén-sello con características litológicas, espesor, estructura y profundidad convenientes para ser potenciales almacenes geológicos de CO₂, así como de los tipos de trampas (almacenes) en cada región estudiada. La condición inicial, aunque no excluyente de otras posibilidades, es que las áreas seleccionadas tuvieran una estructuración tectónica sencilla y fácilmente modelable, situadas en un contexto geodinámico estable y socioeconómico aceptable, y que incluyan una o varias formaciones geológicas con espesor, extensión, capacidad de almacenamiento, aislamiento y estanqueidad suficientes (principalmente formaciones peninsulares profundas permeables con agua salada). También en este punto se incluye el análisis e interpretación de la información procedente de sondeos de petróleo.

Tarea 2. Realización de sondeos cortos con recuperación de testigo continuo. Testificación geofísica avanzada para caracterización petrofísica de los pares almacén-sello de las áreas seleccionadas. Estudios de porosidad y permeabilidad in situ y en laboratorio.

El trabajo realizado en esta tesis deriva de la necesidad de profundizar en el conocimiento de la naturaleza geológica, la estructura y las propiedades físicas del subsuelo sedimentario en las cuencas sedimentarias objeto del Plan ALGECO2. En particular, se enmarca en la segunda tarea de este proyecto. Los datos con los que se cuenta para la realización del trabajo de investigación son: nuevos datos geofísicos adquiridos en los sondeos cortos realizados en el Plan ALGECO2 junto con el testigo continuo, datos de laboratorio de muestras de estos testigos (láminas delgadas, Difracción de Rayos X, cálculo de porosidad y permeabilidad), ensayos de conductividad hidráulica en estos sondeos y datos geofísicos de sondeos de petróleo de las zonas de estudio.

Los registros de los antiguos sondeos petrolíferos han sido proporcionados por el Instituto Geológico y Minero de España, para comparar los parámetros petrofísicos de las diferentes facies identificadas en cada sondeo.

1.2 Zonas de estudio

Las formaciones geológicas más adecuadas, desde un punto de vista petrofísico, para el almacenamiento del CO₂ en estado supercrítico, son rocas sedimentarias porosas y permeables, típicamente las formaciones carbonatadas y, sobre todo, las detríticas o siliciclásticas. La razón de su interés radica básicamente en su porosidad y también en su permeabilidad; las rocas detríticas suelen presentar porosidad de tipo primario, y son más homogéneas que las carbonatadas. Estas últimas suelen presentar un sistema poroso con una estructura compleja y muy variable (Choquette & Pray, 1970), normalmente de tipo secundario o diagenético, y normalmente se presentan en menor proporción que en las rocas detríticas.

Las zonas de estudio en esta tesis se sitúan dentro de la Península Ibérica, y abarcan diferentes dominios geológicos regionales estudiados en el Plan ALGECO2. En cada una de estas zonas, se realizó la perforación de un sondeo para atravesar las unidades geológicas seleccionadas por su interés especial, a priori, para el almacenamiento y sellado de CO₂ (IGME, 2009, 2010). Estas unidades fueron seleccionadas por el IGME a partir de las columnas litológicas de los sondeos petrolíferos y del análisis de la estratigrafía regional pero sin tener en cuenta los parámetros cuantitativos petrofísicos. En la Tabla 1.1, se puede ver un resumen de las formaciones geológicas interesantes como sello y como almacén en cada uno de los sondeos testificados, así como las unidades estratigráficas que atravesaron.

Tabla 1. 1. Sondeos testificados en las zonas de estudio con sus respectivas litologías y estratigrafías en las zonas sello y almacén.

Sondeo	Edad	Sello		Almacén	
		Estratigrafía	Litología	Estratigrafía	Litología
SE-4	Triásico Medio - Superior	Muschelkalk Medio	Arcillas, lutitas y evaporitas	Muschelkalk Inferior	Calizas micríticas y dolomíticas, dolomicritas
SB-4	Mioceno	Margas de Torremendo	Margas	Calizas de Las Ventanas	Calizas arenosas y margosas, bioclásticas
SE-3	Cretácico Superior	Garum (Fm. Tresp) y Posa	Lutitas, arcillas y margas	Arenisca de Arén	Areniscas calcáreas
SB-1	Triásico Superior	Facies Keuper arcilloso	Arcillas y margas	Keuper arenoso y Areniscas de Manuel	Areniscas, arenas y lutitas arenosas

Los sondeos someros testificados dentro del Plan ALGECO2 fueron (Figura 1.2): el sondeo SE-3 (Orrit – Lleida) en la Cadena Pirenaica y SE-4 (Arbolí – Tarragona) en la Cordillera Costero-Catalana, el sondeo SB-1 (Alcaraz – Albacete) situado en la Cobertera Tabular, el sondeo SB-4 (Bacarot – Alicante) perteneciente a la Cordillera Bética, el sondeo SB-3 (Lora del Río – Sevilla) localizado en la Cuenca del Guadalquivir, y el sondeo SD-4 (Gijón – Asturias), situado en la Cuenca Mesoterciaria Asturiana, concretamente en la Cuenca de Gijón-Villaviciosa. En esta tesis, se presentan los resultados correspondientes a cuatro de ellos: SE-3, SE-4, SB-1 y SB-4, por estar situados en cuencas con datos complementarios de diagráfias correspondientes a sondeos de petróleo. Sin embargo, un resumen de la información obtenida y analizada de los otros dos sondeos (SB-3 y SD-4) se presentará en los Anexos de la memoria de la tesis.

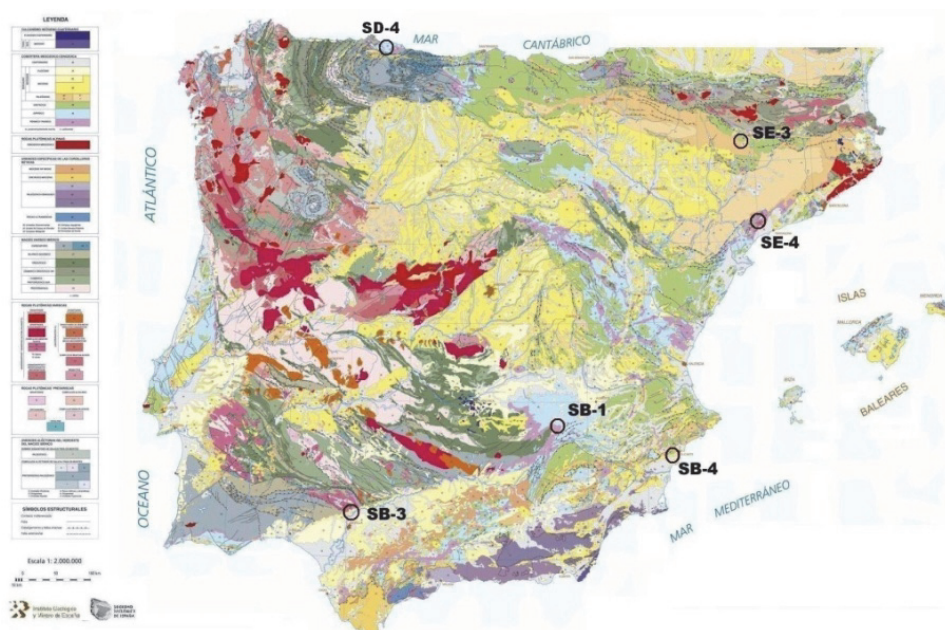


Figura 1.2. Localización geológica en la Península Ibérica de todos los sondeos testificados durante el desarrollo de esta tesis (modificado de IGME).

Las unidades geológicas de interés en cada sondeo estudiado son las siguientes:

En el Prebético y Subbético, en relación con el sondeo SB-1 (Figura 1.2), son interesantes como tramos confinantes o sellos, las arcillas y evaporitas del Triásico superior en la facies Keuper y evaporitas del Lías en sectores del Prebético. Y como tramo almacén resultan de interés las areniscas del Buntsandstein y las dolomías del Muschelkalk. En la Cuenca del Bajo segura, donde se ubica el sondeo SB-4, es interesante estudiar, como formación sello, las lutitas del Messiniense-Pliocuaternario cortadas por éste, y como formación almacén, los carbonatos del Triásico.

En la Zona Surpirenaica, una de las formaciones objetivo como formación sello y que es cortada por el sondeo SE-3, son las lutitas del tránsito Cretácico-Terciario (facies Garum y Formación Tresp) aunque no en todos los sectores constituye un buen sello debido a su espesor variable. Como formación almacén resultan interesantes las facies carbonatadas y tramos arenosos del Cretácico superior (Formación Areniscas de Arén).

El sondeo SE-4, situado en la Cordillera Costero-Catalana, ha cortado como formación confinante los tramos lutítico-evaporíticos de la facies Muschelkalk medio, y como formación almacén los carbonatos de la facies Muschelkalk inferior.

Las formaciones geológicas correspondientes al almacén se han agrupado en carbonatadas (SE-4 y SB-4) y detríticas (SE-3 y SB-1).

1.3 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es aportar nueva información litológica y petrofísica de cada una de las zonas de estudio “a priori” favorables para el almacenamiento y sellado de CO₂, complementando la información ya existente (IGME, 2009, 2010). Esta información pretende ser más concisa, detallada y extensa que la disponible, de forma que su estudio y análisis conduzca finalmente a definir las características más importantes en cuanto a establecer la condición de idoneidad para la inyección y almacenamiento de CO₂ en la formación geológica. Se aportan estudios litológicos más detallados de las formaciones geológicas estudiadas, así como nueva información de parámetros petrofísicos, obtenidos mediante la realización de análisis y estudios hasta ahora no llevados a cabo en dichas formaciones.

Los objetivos parciales de la tesis son:

- Descripción y estimación de los parámetros petrofísicos a través de diagráfias de las formaciones geológicas consideradas almacén y sello atravesadas por los sondeos actuales perforados con motivo del Plan ALGECO2. Integración de datos de descripción de testigos, análisis de laboratorio y estudio de láminas delgadas al microscopio para mejorar la caracterización petrofísica.
- Determinación de la frecuencia de fracturación a partir de registros de imagen en los sondeos estudiados, para localizar zonas de debilitamiento estructural que causen inestabilidad a la formación sello o almacén.
- Establecimiento de zonas o niveles geológicos porosos y permeables óptimos como formaciones almacén, y formaciones impermeables suprayacentes óptimas como formaciones sello. En este sentido, la tesis aborda y adapta una técnica reciente de análisis de la atenuación de las ondas sínicas y su relación con la permeabilidad. Este punto constituye un avance metodológico en la caracterización de reservorios.
- Integración de los datos puntuales de sondeos actuales someros con los de sondeos antiguos y profundos de exploración petrolífera para establecer una correlación geofísica y estratigráfica entre ellos. El objetivo es tener un conocimiento más completo de las formaciones geológicas objeto de estudio que se encuentran a gran profundidad

(>800 m por lo general), analizando en detalle las formaciones análogas localizadas en superficie. El estudio de las formaciones geológicas someras permite un estudio detallado de las propiedades sedimentológicas, texturales, composicionales o petrofísicas de una formación geológica análoga profunda.

- Realización de un seguimiento areal en el subsuelo de la formación geológica de interés para establecer una interpretación estratigráfica en extensión, definiendo así la continuidad, evolución lateral y potencia de las formaciones almacén y formaciones sello, mediante la correlación estratigráfica de estas formaciones en los sondeos someros con las análogas en los sondeos profundos de petróleo.

1.4 Parámetros de idoneidad en formaciones sello y almacén

Entre las diferentes opciones de almacenamiento geológico de CO₂ existentes, destacan tres: yacimientos agotados de hidrocarburos, niveles de carbón inexplorables, y formaciones geológicas permeables y profundas con elevado contenido en sales disueltas. El almacenamiento en acuíferos profundos y salinos parece la opción más apropiada en el territorio español por la gran abundancia de cuencas sedimentarias existentes (Pérez-Estaún *et al.*, 2009).

En el marco del Subproyecto denominado “Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂”, se establecen los criterios generales de selección de emplazamientos (Ruiz *et al.*, 2007). Dichos criterios fueron aplicados posteriormente para seleccionar formaciones, áreas y estructuras favorables para almacenar CO₂ en el territorio nacional.

A grandes rasgos, los criterios que se siguieron para la selección de formaciones geológicas, estructuras y áreas favorables, a nivel de cuenca, en el almacenamiento geológico de CO₂ fueron los presentados en 2009 en el Congreso Nacional de Medio Ambiente (Conama), y fueron: criterios geológicos (tectónicos, geotérmicos y de presión, e hidrodinámicos), y criterios económicos y de seguridad. A continuación, se explican brevemente los criterios geológicos generales.

- Criterios tectónicos: determinadas zonas geológicas (cratones, etc.) no son favorables porque las rocas que los forman no poseen ni la porosidad ni la permeabilidad adecuadas (Bachu, 2000). Las cuencas sedimentarias son zonas apropiadas por la existencia de poca fracturación y por las propiedades petrofísicas de las rocas que las componen. Las cuencas

más idóneas son las formadas en el interior o en los bordes pasivos de las placas continentales (Benson & Cook, 2005), que no estén muy plegadas o fracturadas, que se encuentren lejos de cinturones de plegamiento, y que no presenten diagénesis importante (IPCC, 2005).

- Estratigráficos: un almacén de CO₂ debe poseer estanqueidad, por ejemplo una trampa estratigráfica, y debe estar limitada a techo por una formación impermeable adecuada.
- Litológicos: dependiendo de si la formación geológica actuará como sello o como almacén de CO₂, deberá poseer unas condiciones determinadas de porosidad y de permeabilidad.
- Criterios geotérmicos y de presión de la cuenca: este factor influye en la profundidad de inyección, comportamiento y capacidad de almacén del CO₂. Cuencas con un gradiente geotérmico por debajo de 25°C/Km son favorables pues permiten más fácilmente la inyección del CO₂ en condiciones supercríticas (Ruiz *et al.*, 2007).
- Criterios hidrodinámicos: serán favorables para el almacenamiento de CO₂ aquellas cuencas que incluyan acuíferos de escala regional con una permeabilidad y porosidad adecuadas para favorecer su inyección y almacenamiento. Estas características se suelen encontrar en cuencas intracratónicas elevadas y erosionadas (Bachu, 2000), y las cuencas continentales donde el sistema de flujo hidrogeológico está controlado por la topografía principalmente.

A nivel particular, las condiciones idóneas para que una formación geológica se pueda considerar como una potencial formación sello son las siguientes:

- Litología: las rocas que actúan como confinantes necesitan poseer unas condiciones de porosidad y permeabilidad para impedir que el fluido migre hacia la superficie o hacia otras formaciones permeables, es decir, poros de pequeño tamaño. Las rocas siliciclásticas de grano fino (arcillas, lutitas, etc.), las rocas evaporíticas (yeso, anhidrita, etc.) y las rocas ricas en materia orgánica, serán las más idóneas. También pueden actuar de sello rocas como conglomerados compactos, areniscas o calizas arcillosas, pero suelen ser de menor importancia debido a su escasa calidad.
- Ductilidad: las rocas sello suelen ser mayor adaptables a las rupturas y las deformaciones que las litologías más frágiles (por ejemplo dolomías). Las evaporitas son un buen ejemplo

de rocas dúctiles a partir de una cierta profundidad (más de 1 km), puesto que la ductilidad depende de la temperatura y de la presión.

- Continuidad lateral y espesor: la extensión lateral, al igual que el espesor, han de ser lo suficientemente grandes como para almacenar la cantidad de CO₂ estipulada. No debe estar fracturado o fallado; la existencia de fracturación dificulta la continuidad de las formaciones sello. Asimismo, se considera óptimo un espesor de 100 m o superior, no debiendo ser inferior a 20 m (Chadwick *et al.*, 2008).

Por su parte, a nivel particular, los criterios geológicos de selección de una potencial formación almacén se detallan a continuación. En la tabla 1.2, se muestra un resumen (Chadwick *et al.*, 2008):

- Profundidad: se considera óptima la profundidad superior a los 800 m, puesto que permite el almacenamiento de CO₂ en estado supercrítico. A pequeñas profundidades el almacenamiento es menos eficiente (densidad menor del CO₂) que a mayores profundidades (Bachu, 2007).
- Litología: una formación geológica idónea como almacén ha de presentar niveles de porosidad y de permeabilidad elevados. Este tipo de comportamiento suele darse preferentemente en las areniscas, y en las rocas carbonatadas tales como calizas fracturadas.
- Un espesor mayor de 50 m y no inferior a 20 m.
- Porosidad y salinidad por encima del 10 % y de 10 g/l respectivamente.
- Permeabilidad; se considera positiva cuando supera los 300 mD.

Tabla 1. 2. Resumen de criterios a tener en cuenta en el almacenamiento geológico y sellado de CO₂ (modificado de Chadwick *et al.*, 2008).

		Indicadores positivos	Indicadores cuestionables
PROPIEDADES RESERVORIO	Profundidad	> 1000 m < 2500 m	< 800 m > 2500 m
	Espesor (neto)	> 50 m	< 20 m
	Porosidad	> 20 %	< 10 %
	Permeabilidad	> 300 mD	< 10 - 100 mD
	Salinidad	> 100 g/l	< 10 g/l
PROPIEDADES SELLO	Continuidad lateral	No fallada	Variaciones laterales
	Espesor	> 100 m	< 20 m

1.5 Estructura de la tesis

Este trabajo se estructura en nueve apartados.

El Capítulo 1 define los objetivos de la tesis, además del marco general en el que se desarrolla la misma. Lo completa un resumen de los parámetros de idoneidad para las formaciones sello y almacén de CO₂.

En el Capítulo 2, se establece la metodología seguida en la tesis, con las diferentes etapas que han constituido el trabajo. Se describen brevemente las correcciones aplicadas a los registros geofísicos así como el flujo del procesado que es necesario aplicar a los datos de diagrfías en bruto para su optimización. Posteriormente, se incluyen la interpretación litológica y la caracterización petrofísica que se ha llevado a cabo y, en base a esta información, lograr una evaluación petrofísica general de las formaciones reservorio y formaciones sello. Para finalizar con la metodología, el último apartado trata de la correlación estratigráfica entre sondeos actuales perforados con motivo del Plan ALGECO2 y sondeos antiguos de petróleo, basada en el uso de diagrfías.

En el capítulo 3, se presenta resumidamente el contexto geológico de las formaciones geológicas estudiadas tanto en los sondeos testificados como en los sondeos profundos. Se detallan las correlaciones estratigráficas mediante diagrfías, llevadas a cabo entre las formaciones geológicas de los sondeos someros y las análogas en los sondeos profundos de petróleo.

Los capítulos 4 a 7 describen el estudio de los sondeos estudiados aplicando la metodología expuesta anteriormente. Se expone en detalle la interpretación litológica que se ha llevado a cabo, y finalmente la caracterización petrofísica de la formación sello y formación almacén. Las conclusiones litológicas y petrofísicas en cada sondeo se exponen al final del capítulo correspondiente.

En el Capítulo 8, se desarrolla la discusión referente a los resultados obtenidos, y en el Capítulo 9, se mencionan las conclusiones generales, además de algunas líneas futuras de trabajo.

En los diferentes Anexos, se exponen algunos de los detalles técnicos de las perforaciones de los sondeos estudiados, algunas fotografías tomadas durante la adquisición de datos en campo, y se resumen las interpretaciones de las diagráfias llevadas a cabo en los sondeos SD-4 y SB-3. Los resultados específicos de los diferentes análisis de Difracción de Rayos X también se especifican en este apartado de Anexos, además de la estimación del *cáliper* a partir del registro de imagen acústica.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se expone de forma detallada, en 5 apartados, la metodología llevada a cabo en esta tesis. Se explica el fundamento de la principal técnica empleada, las diagrfías, y los diferentes procesados a los que se han sometido los registros. Se explican de forma resumida el resto de técnicas empleadas, tanto a nivel microscópico, como a mayor escala. A continuación, se detallan los métodos de interpretación litológica seguidos, así como la metodología aplicada en la consecución de la caracterización petrofísica. La integración de datos de sondeos profundos mediante correlación estratigráfica es desarrollada al final del capítulo. Finalmente, se ha introducido un breve esquema del flujo de trabajo desarrollado.

2.1 Diagrfías

La testificación geofísica proporciona registros continuos *in situ* de propiedades físicas o imágenes de la formación geológica atravesada y en tiempo real, pudiendo hacer una reconstrucción de ésta, y una valoración de los fluidos presentes, así como las posibles variaciones de los parámetros físico-químicos, además de la orientación e inclinación de las estructuras y del perfil del sondeo en sí mismo.

2.1.1 Fundamentos

En la Tabla 2.1, se presenta un sumario de las técnicas de testificación geofísicas utilizadas en algunos de los sondeos estudiados, así como las correcciones aplicadas en cada caso, y la interpretación obtenida de ellos.

Todos los registros fueron corregidos por profundidad, de forma que se tomó como buena la profundidad registrada correspondiente al primer registro realizado en cada rutina de trabajo. A continuación, se expone de forma resumida el principio de medida de cada una de las sondas de la Tabla 2.1.

La sonda de Radioactividad Gamma Natural (GR) registra la radioactividad emitida de forma espontánea por algunos elementos radiactivos presentes en la formación rocosa, esencialmente ^{40}K , ^{238}U y ^{232}Th . Esta medida la transforma en impulsos eléctricos de amplitud proporcional a la energía de la radiación gamma incidente. Permite obtener información

litológica, sobre todo los niveles de arcilla o las evaporitas (en general, valores altos y bajos respectivamente).

Tabla 2. 1. Técnicas de testificación geofísica utilizadas en esta tesis y su aplicación en el ámbito sello-almacén, así como las correcciones aplicadas a cada uno de ellos. (*) Bajo condiciones especiales de sondeo.

Registro	Interpretación – Aplicaciones	Corrección
Radioactividad Gamma Natural (GR)	Secuencias litológicas, volumen de arcillosidad, correlación estratigráfica	Profundidad
Resistividad (RES)	Litología, permeabilidad, saturación de agua	Profundidad
Potencial espontáneo (SP)	Permeabilidad	Profundidad
Imagen óptica de sondeo (OBI)	Litología, estructuras sedimentarias y fracturas*, dirección y buzamiento	Centrado. Profundidad. Calidad de imagen.
Imagen acústica de sondeo (ABI)	Estructuras sedimentarias y fracturas, dirección y buzamiento, permeabilidad superficial, diámetro de sondeo (<i>cáliper</i> acústico)	Centrado. Profundidad. Calidad de imagen.
Sónico de onda completa (FWS)	Litología, porosidad sónica, discontinuidades, permeabilidad	Profundidad. Calidad de imagen
Densidad (RHOB)	Litología, porosidad	Arcillosidad
Neutrón (NPHI)	Porosidad	Arcillosidad

El registro de resistividad eléctrica (RES) se basa en la medida de la resistencia que ofrece un material a que pase a través suyo una corriente eléctrica. Es una medida directa que consiste en suministrar corriente a la formación, mediante dos electrodos, y medir, mediante otros dos electrodos, la diferencia de potencial. El valor medido dependerá de las distancias de esos electrodos, de la distribución de resistividades en la roca y de la corriente suministrada. Existen numerosos dispositivos de medición; en los sondeos someros estudiados en esta tesis se utilizó el dispositivo Normal Corto o somero (RES16N) y Normal Largo o profundo (RES64N) principalmente.

El registro de potencial espontáneo (SP) registra, mediante la diferencia de potencial entre un electrodo móvil en la sonda y otro fijo situado en la superficie, el potencial eléctrico (voltaje) producido por el agua de la formación geológica, el fluido conductivo de perforación y ciertas

rocas. Su registro permite diferenciar rocas potencialmente permeables y porosas de arcillas no permeables.

El registro de imagen óptica (OBI) consiste en obtener una imagen óptica orientada de la pared del sondeo, realizada a través de una cámara digital de alta resolución que, gracias a un espejo cónico situado debajo, captura la reflexión de la pared del sondeo en los 360°. La sonda posee un sensor de orientación consistente en un magnetómetro y tres acelerómetros, mediante los cuales es posible conocer la inclinación del sondeo con respecto a la vertical y su azimut. Dependiendo de las condiciones del sondeo, habrá que editar la imagen para mejorarla.

El registro de imagen acústica (ABI) también lleva un sensor de orientación por lo que se pueden generar imágenes orientadas. La sonda, para generar esta imagen de los 360° de la pared del sondeo, emite un pulso ultrasónico (1.2 MHz de frecuencia) que viaja hasta la formación, y regresa registrando así el tiempo de tránsito (*Travel Time*) y la Amplitud de la onda acústica reflejada en la pared, generando la imagen. La principal aplicación de esta sonda es la identificación de estructuras sedimentarias y de fracturas (planos), aun cuando el sondeo esté entubado en PVC (no metal).

El uso más común del registro sónico de onda completa (FWS) está relacionado con la estimación de la porosidad de formación y la litología, aunque también es posible inferir presiones de poro anormalmente elevadas y estimar las propiedades mecánicas de la formación rocosa (módulos de deformación). Se utiliza además en la detección de fracturas (Ellis & Singer, 2008). De forma muy resumida, el principio de medición se basa en la emisión de pulsos sónicos de alta frecuencia (p.e. 20 kHz) por parte de un transmisor en modo monopolo (T), que genera secuencialmente ondas de compresión que se transmiten a través del fluido presente en el sondeo ya través de la formación, y son nuevamente registradas por los receptores (RX1-RX2-RX3). Mediante el cálculo del tiempo de tránsito y la distancia recorrida, se estiman las velocidades de propagación a través de la formación rocosa de las ondas de compresión P y de las ondas de cizalla S.

Si se asume que la formación es isotrópica y homogénea, cuando el frente de ondas alcanza la pared de la formación, parte de la energía es reflejada a través del fluido, y parte transmitida a lo largo de la formación, es decir, refractada (Haldorsen *et al.*, 2006). En un espacio bidimensional y según la Ley de Snell (Ecuación 2.1) se generan tres nuevos frentes de onda: un frente reflejado que regresa hacia el interior del sondeo a velocidad V_m (velocidad de ondas del fluido), y dos frentes refractados críticos a través de la interfaz lodo-sondeo, viajando a

través de la formación, esto es, las ondas compresionales P y las ondas de cizalla o corte S, a velocidades V_p y V_s respectivamente (Haldorsen *et al.*, 2006).

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{V_m} = \frac{\text{Sen}\theta_2}{V_p} = \frac{\text{Sen}\theta_s}{V_s} \quad (2.1)$$

θ_1 = ángulo de las ondas P incidentes y reflejadas

θ_2 = ángulo de las ondas P refractadas

θ_s = ángulo de las ondas S refractadas

Cuando la onda P refractada se hace paralela a la pared del sondeo (refractada crítica), se propaga a través de la interfaz sondeo-formación a la velocidad V_p , más rápida que la onda reflejada en el fluido del pozo. Según el Principio de Huygens, cada punto de una interfaz excitada por una onda P actúa como una fuente secundaria de ondas P en el sondeo, así como de ondas P y S en la formación. La combinación de estas ondas secundarias en el sondeo crea un nuevo frente de onda lineal, la onda cónica. Este frente de onda generada es el primero en ser registrado en los receptores como la llegada de las ondas P.

La diferencia de tiempo existente entre la llegada de las ondas P a los receptores, dividida por la distancia recorrida, es lo que se conoce como el tiempo de tránsito o retardo Δt (*slowness*), y es inversa a la velocidad, expresándose típicamente en $\mu\text{s}/\text{pies}$. Este valor sirve para obtener información sobre la velocidad de la formación geológica.

Con la identificación de la onda S sucede lo mismo, ya que las ondas S refractadas se comportan de igual modo que las ondas P refractadas. Cuando la onda S refractada se vuelve paralela a la pared del sondeo, se propaga a lo largo de la interfaz sondeo-formación como una perturbación de corte, a una velocidad V_s , y genera otra onda cónica en el fluido. Su llegada a los receptores se registra como onda P (Haldorsen *et al.*, 2006). De esta forma se explica la medición del tiempo de tránsito de las ondas de cizalla, a través de un medio, el fluido, en el que por definición no se pueden propagar.

El registro de densidad (RHOB) es una medida de la densidad aparente. Las sondas de densidad contienen una fuente radioactiva que emite rayos gamma de mediana energía hacia la pared del sondeo. Esta radiación puede considerarse como partículas de alta velocidad que colisionan contra la formación. El mecanismo de medida se basa en el principio de absorción de esos rayos gamma por el Efecto *Compton*. Los rayos dispersos que llegan al detector son

contados para indicar la densidad de la formación, de forma que la densidad de los electrones está relacionada con el volumen de densidad real, y que dependerá de la densidad de la matriz rocosa, así como la de los fluidos y de la porosidad. Las arcillas pueden afectar la lectura de densidad, de forma que cuando están a poca profundidad, y cuando se encuentran diseminadas en los poros, muestran una lectura de densidad menor que la real (Schlumberger 1987). Se suele aplicar entonces una corrección por arcillosidad.

El registro neutrón (NPHI) responde al contenido de hidrógeno en la formación rocosa. El principio de medida se basa en la emisión, por parte de la sonda, de neutrones de alta energía (neutrones rápidos), que chocarán contra la formación rocosa, perdiendo energía con cada choque. La forma mediante la cual la densidad de neutrones decrece con respecto a la distancia del emisor dependerá del fluido contenido en los poros (hidrógeno), es decir, de la porosidad (en formaciones donde no existen arcillas y los poros contengan fluido).

2.1.2 Tratamiento y procesado de datos

Todos los datos de los sondeos someros fueron adquiridos en la fase inicial de esta tesis.

Para el tratamiento, procesado e interpretación de diagrfias se utilizó el programa *WellCAD*, de la empresa ALT (*Advanced LogicTechnology S.A.*).

La respuesta de los registros geofísicos obtenidos a través de sondas geofísicas siempre se ve afectada por numerosos factores, algunos de carácter circunstancial e inherente a la perforación del sondeo y la morfología del mismo, otros debidos a los fluidos intersticiales de la formación, fallos mecánicos, etc. Casi todos ellos alteran la respuesta final de la sonda, y por tanto, su efecto debe ser evitado durante el registro.

Las correcciones aplicadas, a posteriori, fueron, de modo resumido, las siguientes:

- Correcciones de profundidad. Sucede en ocasiones que la referencia de profundidad de un registro se ve alterado por circunstancias (mecánicas o humanas) acontecidas durante los trabajos de adquisición. Lo que se hace en este caso es reajustar dicha profundidad con respecto a un registro de referencia, realizado normalmente de bajada y previamente a todos los demás registros. Si todos los registros presentan una referencia errónea, se tomarán entonces como referencia las anotaciones del perforador.

- Eliminación de ruido mediante filtrado de datos, eliminando las lecturas anómalas producidas durante el registro, reduciendo así el ruido provocado en las mismas.
- Interpolación de trazas (datos) en tramos de registro nulos, debido a alteraciones en el registro de los datos.
- Correcciones en la calidad de imagen, necesarias por un incorrecto ajuste de los parámetros de adquisición, por la descentralización de la sonda en el momento del registro, etc.

A continuación, se resume el procesado llevado a cabo en los registros de imagen y sónicos.

2.1.2.1 *Procesado del registro de imagen óptica*

Se realizaron modificaciones en los parámetros de imagen como el brillo y el contraste para poder identificar correctamente y con mayor precisión los elementos estructurales y sedimentarios, optimizando la calidad de las imágenes. El objetivo en el ajuste de ambos parámetros es conseguir una distribución de luz igual a la cobertura de la totalidad de la escala de valores disponible.

2.1.2.2 *Procesado del registro de imagen acústica*

- Filtrado de datos. Se aplicó un filtro a algunos de los registros de imagen, comúnmente al Tiempo de Tránsito (*Travel Time*), para eliminar los picos anómalos del conjunto de datos a una determinada profundidad.
- Normalizado. Tiene la finalidad de optimizar el contraste de la imagen acústica. Se han aplicado tres tipos de normalización; normalización estática, dinámica y “*high pass*”. La normalización estática calcula el histograma y la distribución acumulativa de datos teniendo en cuenta el rango total de datos del registro. La normalización dinámica permite mejorar el contraste de una imagen en una zona puntual. La normalización “*High Pass*” es una combinación de la normalización dinámica en 2 dimensiones y el tipo de filtro “*Despiking selectivo*”. Se aplicó para eliminar las tendencias de baja frecuencia radial tales como los efectos causados por la descentralización de la sonda durante el registro (por ejemplo, bandas verticales más oscuras en la imagen en la Figura 2.1).

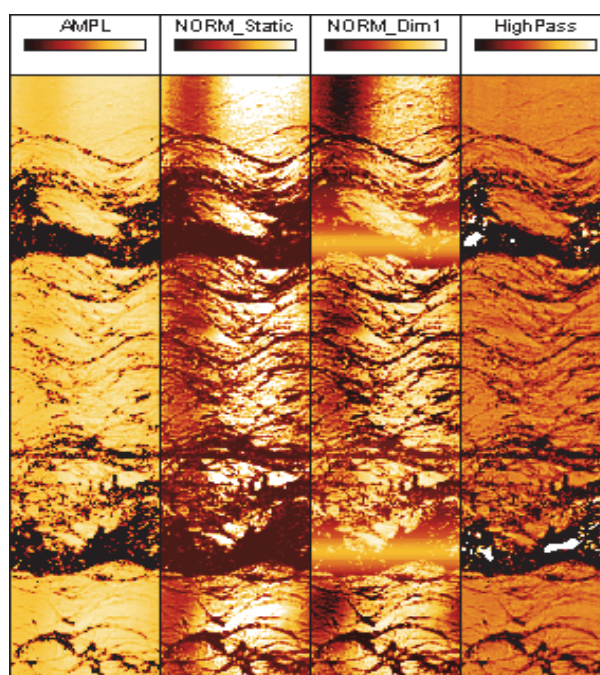


Figura 2.1. Diferentes modos de normalización aplicados a la imagen acústica de sondeo, de izquierda a derecha: registro original (AMPL), normalización estática (NORM Static), normalización dinámica en 1 dimensión (NORM Dim1) y modo "High Pass",

A partir de la imagen acústica de sondeo y del tiempo de tránsito de la señal acústica se ha estimado el *cáliper* acústico o diámetro del sondeo (Anexo II).

2.1.2.3 Procesado del registro sónico de onda completa

Se aplicaron correcciones de filtrado para eliminar el ruido registrado del conjunto de datos, y una corrección de interpolación de trazas para eliminar anomalías producidas por errores durante la adquisición, de forma que el sistema reemplaza la traza sin datos por los últimos valores de datos válidos de registro que identifica (Figura 2.2).

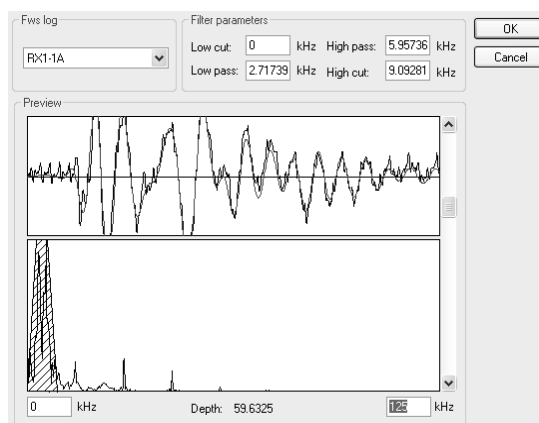


Figura 2. 2. Ventana de filtro de frecuencias de imagen sónica de onda completa (sub-ventana superior: traza sin procesar en negro, traza filtrada en azul; sub-ventana inferior: espectro de frecuencias de la traza).

Para determinar el retardo (*Slowness*) de las ondas P y ondas S a partir de las medidas de los receptores de la sonda se realizó un análisis de velocidad de los registros, mediante un proceso de correlación entre ellos (Proceso de Semblanza). Este proceso consiste en la búsqueda de semejanzas (*Semblanza* o *Coherencia*) en la forma de onda y las amplitudes de la señal acústica a lo largo de los receptores (Figura 2.3). Se calcula con el fin de obtener un valor del retardo (*slowness*) de las señales de acuerdo a un modelo matemático sólido y fiable.

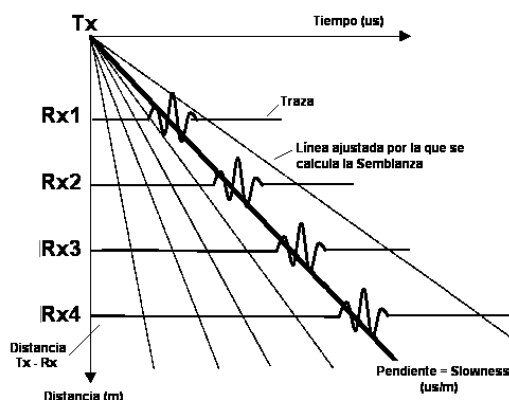


Figura 2. 3. Proceso de semblanza: para cada muestra del conjunto de datos en profundidad se dibuja un diagrama como éste; un abanico de líneas con diferentes pendientes.

Conocidas las distancias desde el transmisor T_x al receptor R_x (Tabla 2.2), y tomando las trazas sónicas de los registros correspondientes, se crea un conjunto de líneas con diferentes pendientes (Figura 2.3). La pendiente de cada línea es la relación tiempo-distancia expresada en microsegundos por metro ($\mu\text{s}/\text{m}$) o microsegundos por pies ($\mu\text{s}/\text{ft}$), y proporciona el *slowness* o lentitud.

Tabla 2. 2. Relación de distancias entre el transmisor Tx y los receptores de la sonda RX.

	TX – RX (m)
RX1-1A	0.6
RX2-1A	0.8
RX3-1A	1

A lo largo de cada una de esas líneas, se calcula un valor de coherencia utilizando las amplitudes de la señal sónica encontradas en la intersección de la línea ajustada y las trazas de datos (S_i).

El gráfico obtenido, STC (*Slowness-Time*) (Figura 2.4), muestra la coherencia para diferentes valores de retardo y tiempo (Haldorsen *et al*, 2006).

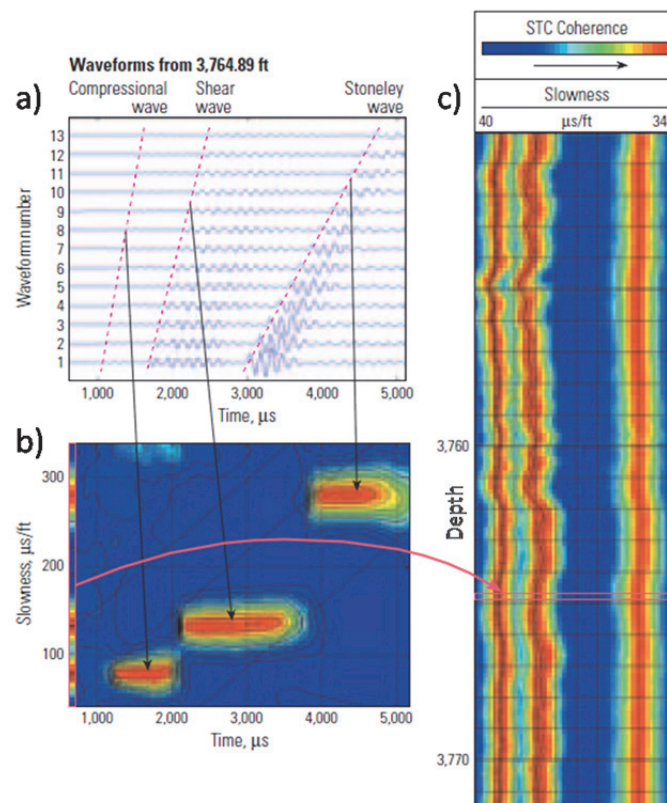


Figura 2. 4. Representación gráfica del Proceso de Semblanza (Haldorsen *et al*, 2006). a) Registro de las trazas sísmicas, similar al de la Figura 2.3. b) Contornos de máximos de coherencia entre los trenes de onda. c) Gráfico STC de retardo obtenido en profundidad.

El eje de abscisas en la Figura 2.4 representa el tiempo del tren de ondas en el receptor de referencia, y el eje de ordenadas, el retardo para cada profundidad. Los contornos de los máximos de coherencia (Figura 2.4-b) indican las regiones de mayor similitud entre los trenes de onda de los diversos receptores y el tren de ondas del receptor de referencia, normalmente el más cercano. Los máximos correspondientes al retardo de ondas de compresión, de cizalla y Stoneley, representados para cada profundidad crean un registro de retardo (Figura 2.4-c). Las dos dimensiones de un STC se comprimen en una sola dimensión proyectando los picos de coherencia en el eje de retardo. Las líneas verticales con códigos de colores para la coherencia, cuando se representan horizontalmente a su correspondiente profundidad, forman el típico output de un log sínico.

Una vez identificadas las máximas correlaciones, se procede a “interceptar” en ellas la lentitud de las ondas P y S. Una vez calculados esos valores, se transforman en velocidades V_p y V_s (m/s).

2.2 Otras técnicas de estudio: laboratorio y campo

La información obtenida a partir de muestras de testigo proporciona un apoyo a la correlación estratigráfica, así como a la interpretación de los medios deposicionales y también resulta de utilidad como calibración de los registros de diagráfias. La descripción litológica de los testigos en los sondeos someros se realizó una vez finalizadas las labores de perforación de los mismos. Posteriormente, como parte de esta tesis, se ha procedido a realizar una revisión de esta descripción litológica y de los testigos.

Además de las labores de descripción detallada de testigos, también se procedió a identificar el estado de fracturación y las estructuras sedimentarias presentes (laminación, estratificación). Esta información fue contrastada con la información obtenida a partir de las imágenes acústicas de la pared del sondeo (ABI) y los registros de radioactividad gamma natural y sínico de onda completa. Todo ello se completó con las fotos correspondientes.

La selección de muestras en los testigos de sondeo dentro de esta tesis ha tenido como objetivo el apoyo a las interpretaciones litológicas de diagráfias y al estudio puntual de la porosidad y de la permeabilidad. El número total de muestras estudiadas fue de 60, y fueron seleccionadas de forma que mostraran algún rasgo característico del intervalo a estudiar, tanto en la zona confinante como en la zona almacén. Estas muestras fueron utilizadas para realizar

los estudios de Difracción de Rayos X y para preparar las muestras que posteriormente se estudiaron a microscopio, además de los 5 ensayos de permeabilidad llevados a cabo. Por su parte, en los sondeos profundos de petróleo, se recogieron muestras para someterlas a análisis mediante DRX, y poder establecer una comparación composicional con la misma formación de los sondeos someros.

2.2.1 Microscopía Óptica de Polarización. Estudio petrográfico mediante Láminas Delgadas

El estudio de láminas delgadas ha tenido por objetivo principal la obtención de información fundamentalmente petrológica y mineralógica, de aspectos texturales (tamaño de cristal o forma), estructurales (tipo de contactos intergranulares o presencia de fracturas) y del sistema poroso (porcentaje, distribución, tipo) para contrastarlo posteriormente con los resultados obtenidos a escalas diferentes (diagráfias, ensayos de laboratorio).

El estudio se realizó en el Laboratorio Petrográfico del Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica, de la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona (UB). Para la descripción mineralógica y textural se utilizó un microscopio petrográfico de luz polarizada transmitida marca Carl Zeiss D-7082 dotado con una Cámara Digital Sony.

Una parte de las láminas fueron preparadas por los laboratorios del IGME mediante el procedimiento de preparación de láminas transparentes PTE-ET-032. Otra parte se envió a preparar al Servei de Làmina Prima de la Facultat de Geologia de la UB. Se realizaron secciones delgadas convencionales.

La caracterización petrográfica se realizó sobre muestras teñidas en lámina delgada o secciones de rocas de superficie 27x48 mm y con un espesor de 0.03 mm. Para la obtención de datos semicuantitativos de la textura y mineralogía se realizaron conteos modales; en cada preparación se realizó un conteo con el objetivo de clasificar cada muestra, poder compararlas, y así establecer relaciones con sus parámetros composicionales.

Las rocas estudiadas bajo microscopio en esta tesis han sido fundamentalmente carbonatos (calcita, dolomita) y areniscas. Debido a que las propiedades ópticas de la calcita y la dolomita son muy similares, y por tanto difíciles de distinguir ópticamente, se emplearon técnicas de tinción (rojo de Alizarina) que permite distinguir la calcita de la dolomita, así como las variedades ferrosas de estos dos minerales (Adams *et al.*, 1997). La dolomita no reacciona en

frío con ácidos diluidos, mientras que la calcita sí lo hace, produciendo un contraste de relieve entre ambos minerales (Adams *et al*, 1997). Frente a esta tinción selectiva, las rocas con texturas de grano fino, con numerosos bordes cristalinos, muestran colores de tinción más intensos que las texturas de grano grueso, con escasos bordes cristalinos. Otras láminas fueron impregnadas en resina *epoxy* teñida de Azul de Metileno, como paso previo a la elaboración de las láminas delgadas. Esta impregnación se lleva a cabo con el objeto de resaltar la porosidad efectiva y su distribución. Al observar la lámina al microscopio petrográfico, las zonas porosas se presentarán teñidas de azul.

2.2.2 Difracción de Rayos X (DRX)

La técnica de Difracción de Rayos X (DRX) se basa en hacer pasar un haz de Rayos X a través de un cristal con el material que se quiere estudiar. Este haz de luz por difracción, produce un patrón de intensidades que serán interpretadas según la ubicación de los átomos en el cristal, siguiendo la Ley de *Bragg*. Este proceso permite interpretar los resultados identificando las estructuras cristalinas de una muestra y de este modo, las fases minerales correspondientes, proporcionando información de muchas de las partículas presentes (Melgarejo, 2004). Mediante esta técnica se llega a conocer la mineralogía global (filosilicatos y no filosilicatos) de una muestra arcillosa, clasificando sus constituyentes y determinando las cantidades relativas (Hardy & Tucker, 1991).

El estudio e interpretación de DRX de las muestras de este trabajo se llevó a cabo en los laboratorios del IGME, mediante el procedimiento de ensayo del Método del Polvo Cristalino. Las medidas se hicieron con el equipo XPERT PRO de *Panalytical*, consistente en tubo de cobre (40 mA; 40 kV), monocromador de grafito, rendija automática y X'Ceerator. Para la lectura e interpretación de los difractogramas se utilizó el software *High-Score* de *Panalytical*, y la Base de Datos PDF-2 (ICDD).

2.2.3 Ensayo de conductividad hidráulica en laboratorio

Por definición, la permeabilidad (K) es la capacidad que tiene un material de permitir pasar un flujo a través de él, sin alterar su estructura interna.

La conductividad hidráulica (K_w), o análogamente permeabilidad (Kirsch, 2009), es la medida de la facilidad con la que un fluido se mueve a través de un medio poroso sujeto a un determinado gradiente de presión. Su unidad de medida es la velocidad (cm/s ó m/s).

Darcy (1856) planteó la ley que rige el movimiento del agua a través de filtros de arena no consolidada, y descubrió que el caudal que atravesaba una sección de un material en una unidad de tiempo era linealmente proporcional al gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta z$), de forma que se cumple la siguiente ecuación (Kutilek & Nielsen, 1994):

$$q = -K \left(\frac{\Delta h}{\Delta z} \right) \quad (2.2)$$

q = caudal (m^3/s) o flujo de Darcy

K = Conductividad hidráulica (m/s ó cm/s)

Δh = altura de la carga de agua (m). Se considera negativo debido a que el cambio de elevación es desde una parte superior a una inferior

Δz = altura de la columna de arena (m)

La velocidad del fluido es proporcional a la pendiente h/l (Mattheß & Ubell, 1981). Normalizando K por la viscosidad del fluido y sustituyendo la pendiente h/z por el gradiente de presión aplicado, resulta la permeabilidad (k). La unidad tradicional de medida de la permeabilidad es el Darcy (D), de forma que $1 \text{ D} = 0.98710^{-12} \text{ m}^2$. Un Darcy es la permeabilidad que permitirá el flujo de $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ de un líquido (con viscosidad de 1 centipoise) a través de un área transversal de 1 cm^2 bajo 1 atm/cm de presión. Como el Darcy es una medida muy grande, en la práctica se suele utilizar el milidarcy (mD). Para espacios porosos llenos de agua a 20°C , la permeabilidad y la conductividad hidráulica se relacionan de la siguiente forma: $1 \text{ m/s} = 1.03 \cdot 10^5 \text{ D}$ (Kirsch, 2009).

Los ensayos de permeabilidad al agua se realizaron utilizando una célula triaxial (Figura 2.5). Esta célula es un recipiente estanco (con posibilidad de apertura para colocar la muestra) con determinadas conexiones hidráulicas en su base, y un pistón de carga deslizante en la parte superior del mismo. El adaptador de base sobre el que se apoya la probeta puede ser sustituido por otros de distinta sección, siempre que sean compatibles con la célula. Se puede consultar un desarrollo amplio de esta técnica en Gómez (2009).

Los ensayos se realizaron sobre probetas de diámetro $\phi = 63$ y 93 mm y altura $h = 25$ y 27 mm (Figura 2.5). El extremo inferior de la probeta se conectó a un pistón automático GDS Instruments Ltd, que mantiene una presión de cola constante (control de presiones con una resolución de 1 kPa y control del volumen con una resolución de $0.5 \text{ mm}^3/\text{paso}$). La tensión isotrópica de confinamiento en la cámara triaxial se situó en $\sigma_i = 600 \text{ kPa}$, y la presión de agua se

incrementó hasta $u_w = 200$ kPa. El extremo superior se mantuvo a presión atmosférica, asegurando el avance del frente de hidratación desde la base y la expulsión de aire por el extremo superior.

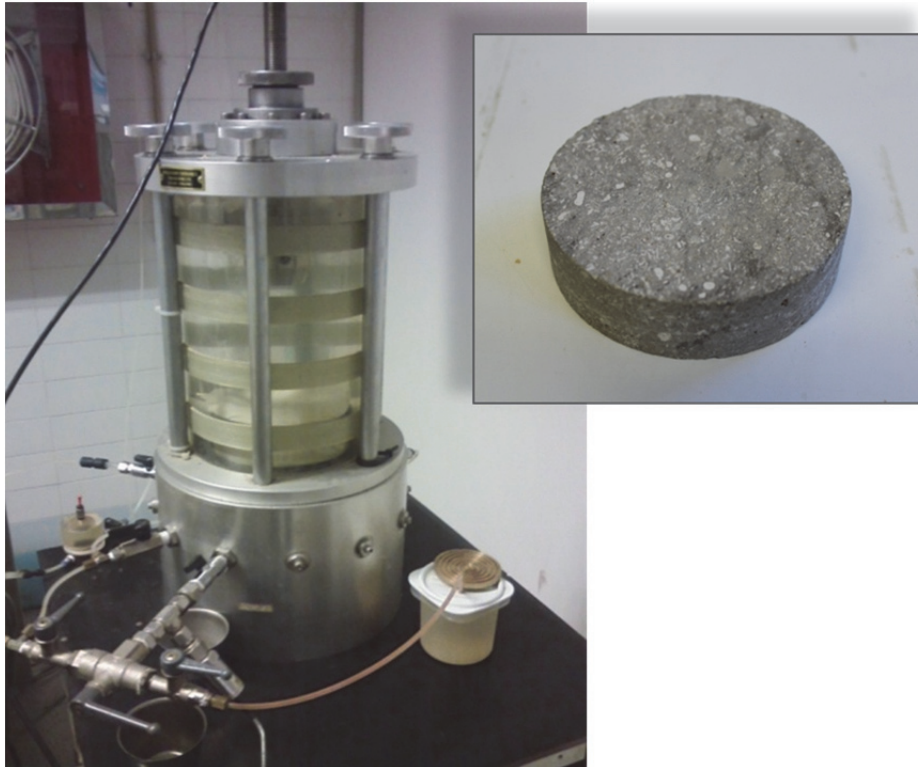


Figura 2. 5. Cámara triaxial perteneciente al equipo triaxial utilizado en los ensayos de gradiente hidráulico en esta tesis. A la derecha, ejemplo de probeta utilizada en dicho ensayo.

2.2.4 Ensayo de permeabilidad Lugeon

Uno de los ensayos más adecuados en campo para determinar la conductividad hidráulica es el test de presión de agua o ensayo Lugeon (Lugeon, 1933). Dicho ensayo consiste en inyectar agua a una determinada presión sobre una zona del sondeo, que estará aislada por uno o dos obturadores (Figura 2.6). Se mide el caudal inyectado a presión constante durante un intervalo determinado de tiempo, de 5 ó 10 minutos. Partiendo de una presión mínima, generalmente de 49 KPa (0.5 kg/cm^2), la operación se va repitiendo a escalones con aumentos progresivos de la presión en cada escalón (no deberían superarse los 490 KPa para evitar la hidro-fracturación de la roca).

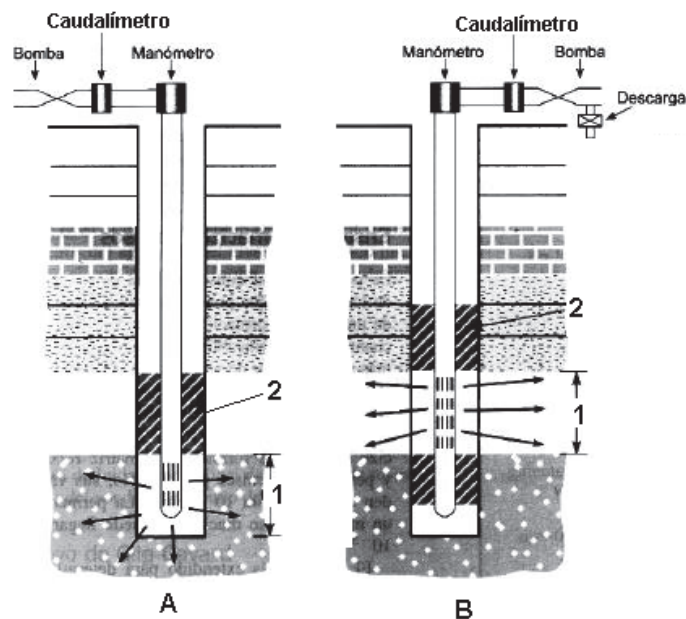


Figura 2. 6. Esquema de ensayo Lugeon. (A) Obturador simple. (B) Obturador doble. Partes: 1= Tramo ensayado. 2= Obturadores. (Modificado de González *et al.*, 2002).

El fundamento matemático del ensayo Lugeon se basa en el modelo analítico desarrollado para el régimen permanente en acuíferos confinados, suponiendo un acuífero ilimitado, homogéneo e isótropo, y un flujo horizontal (Método de *Thiem*). El ensayo se lleva a cabo en el interior del sondeo y se determina semi-cuantitativamente la permeabilidad de la roca, lo que permite clasificarla según el valor obtenido (Olalla & Sopeña, 1991).

La empresa CGS fue la encargada de realizar los ensayos Lugeon según la norma ASTM D4630-96, en diferentes niveles correspondientes a la zona de sello y la zona de almacén de todos los sondeos perforados. El tipo de ensayo realizado fue con obturador doble (Figura 2.6).

Las medidas de los ensayos Lugeon llevadas a cabo en esta tesis se realizaron durante periodos de 10 min partiendo de una presión mínima de 0 KPa e incrementando la presión a cada escalón hasta un valor máximo de 1000 KPa, volviendo a reducir la presión escalonadamente otra vez hasta 0 KPa.

La conductividad estimada a partir de este ensayo o test de presión de agua puede verse influenciada por la presencia de agua fluyendo alrededor de los obturadores que posee el equipo (*packers*) y la longitud y espaciado entre ellos, la presencia de límites hidráulicos, y la influencia de agua superficial libre (Bliss & Rushton, 1984).

2.3 Interpretación litológica

La interpretación litológica de las formaciones geológicas atravesadas por los sondeos ha pasado por dos fases; una, mediante el análisis de las diferentes diagrfías adquiridas, en el caso de los sondeos someros, y de las diagrfías ya disponibles de los sondeos petrolíferos (suministradas por el IGME), y otra fase, mediante el análisis de muestras tomadas en diferentes puntos de las formaciones geológicas de los dos tipos de sondeos (someros y profundos). Toda esta información, se ha complementado con las observaciones de los testigos y ripios disponibles, y con la información geológica de la zona de estudio.

2.3.1 Estimación litológica mediante registros geofísicos

La interpretación litológica se ha llevado a cabo mediante los registros de radioactividad gamma natural, el valor de las resistividades, el registro de la señal sónica (velocidad de ondas P), los registros de imagen y el registro de densidad aparente.

2.3.1.1 Registro de Radioactividad Gamma Natural Total y Espectrometría de Rayos Gamma Naturales

La Radioactividad Gamma Natural total va a depender de la geología presente (Schlumberger, 1987). La curva GR total se suele utilizar con frecuencia en la identificación de minerales radioactivos, aunque se debe combinar siempre con otros registros.

En cuanto al uso de la espectrometría de la radiación gamma natural, resulta relevante en la estimación de secuencias estratigráficas (Van Wagoner *et al.*, 1990), en la caracterización de almacenes (Davies & Elliot, 1996), en la determinación mineralógica y la evaluación de rocas-madre (Myers & Wignall, 1987), prueba de ello es su amplia aplicación a la sedimentología y estratigrafía. Las relaciones de las abundancias de las fuentes radioactivas principales Th/K, Th/U y U/K, se suelen establecer cuantitativamente en partes por 10 mil (ppm/%). En esta tesis no se ha podido realizar una calibración de la sonda con una fuente radioactiva conocida, y por tanto, la interpretación litológica de los perfiles espectrométricos y sus relaciones se ha basado en los ratios calculados de los diferentes elementos.

Los usos más relevantes en cuanto al registro de Radioactividad Gamma Natural total y espectrometría se detallan a continuación (Schlumberger, 1982):

- Determinación litológica

Diferenciación de series arenoso-arcillosas: habitualmente, las lutitas y lutitas ricas en materia orgánica (además de cenizas volcánicas) muestran los valores más elevados de GR, y en el lado opuesto se sitúan las areniscas, carbonatos, yesos o anhidritas y halitas, que presentan valores muy bajos (Rider, 1996; Schlumberger, 1987). A esta norma habrá excepciones, por ejemplo las areniscas limpias con alto contenido en micas o glauconita, pueden producir una respuesta alta en el perfil de GR. Cuando esto sucede, se debe tener en cuenta las relaciones espectrométricas de GR, puesto que discriminan el U, Th y el K. Las relaciones isotópicas permiten discriminar entre arcillas, areniscas y minerales accesorios, cuando por ejemplo, una arenisca produce lecturas elevadas de GR (Serra, 2004). El K se encuentra generalmente en micas y feldespatos, y el Th, que tiene una solubilidad muy baja, tiende a acumularse con minerales pesados y arcillas. En las lutitas, el contenido de K indica, además, el tipo de arcilla presente, y el nivel de Th depende de la cantidad de material detrítico o el grado de arcillosidad (Schlumberger, 1987).

Formaciones carbonatadas: en carbonatos puros, normalmente el Th y el K aparecerán en cantidades insignificantes, y cuando el registro espectral indica su presencia, es porque suelen estar asociadas con arcilla. La presencia de isótopos de las series del U-Ra indica una fuente de material de origen orgánico, presencia de fosfatos o de estilolitos, dando como resultado por tanto, lecturas elevadas de GR. Por otra parte, valores elevados de K, sin Th y con o sin U, indican remanentes de material algal en carbonatos, o presencia de glauconita (mica).

Evaporitas: los valores elevados en las lecturas de GR se asocian también con determinados tipos de evaporitas con elevado contenido en K (p.e. silvina). Su presencia pasa por una lectura elevada de K y lecturas mínimas de Th y de U (el Th es insoluble y se considera como un indicador detrítico).

- Identificación de discordancias: la relación Th/K suele presentarse constante en el registro, debido a su dependencia de las condiciones deposicionales, pero ante un cambio brusco en la proporción de minerales radioactivos, cabe esperar un cambio repentino en las condiciones geológicas. También el cociente Th/U puede indicar la localización de discordancias.

- Identificación de fracturas y estilolitos: la presencia de fracturas se puede identificar por lecturas elevadas de U, debido a que presenta un alto grado de movilidad y de solubilidad, y precipitarán en ellas sales de U disueltas. Esto sucede en medios reductores donde hay

circulación de aguas subterráneas o hidrotermales que pueden causar esta precipitación de U. También se concentrará en planos de falla y en capas permeables. Por otra parte, el U suele estar asociado a estilolitos, y este fenómeno también produce lecturas altas de GR debido a la concentración de minerales de arcilla y materia orgánica que se forma.

- Aplicaciones sedimentológicas: mediante la información de los elementos radioactivos se pueden conocer la composición mineralógica y la distribución del tamaño de grano, permitiendo así una mejor reconstrucción de los medios deposicionales; la relación Th/U permitiría distinguir por ejemplo, entre lutitas (*shales*) marinas y continentales (Figura 2.7). La presencia de glauconita indica ambiente marino, formada principalmente en la plataforma continental. Los depósitos fosfatados indican también origen marino de plataforma continental.

- Diagénesis: las alteraciones y transformaciones que provoca la diagénesis se pueden estudiar tomando en consideración la relación Th/K. Por ejemplo, cuando existe compactación y la *montmorillonita* se transforma en *illita*, existe un descenso en la relación Th/K con la profundidad (Hassan & Al-Maleh, 1976). En reservorios carbonatados, la diagénesis afecta de forma importante a la concentración y distribución del uranio (Hassan & Al-Maleh, 1976), migrando durante la lixiviación y disolución, y presentándose como relleno o rodeando estilolitos.

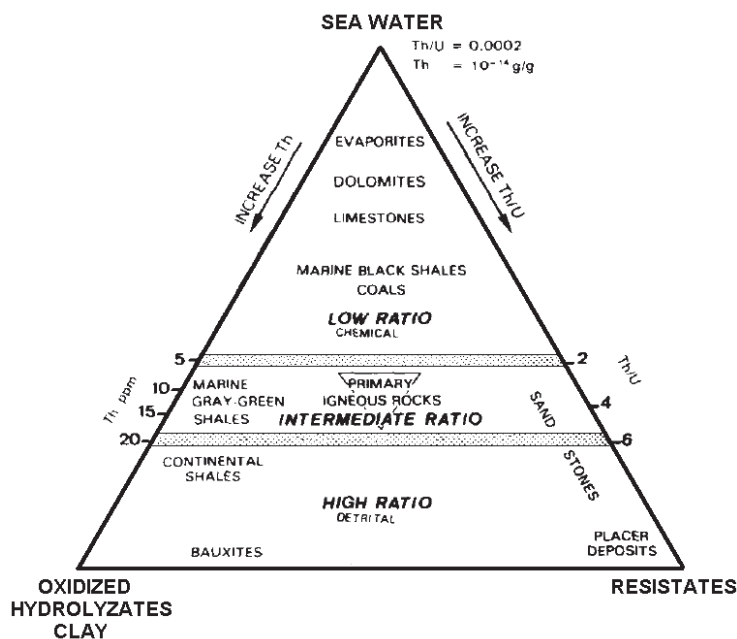


Figura 2. 7. Distribución del Thorio y del Uranio en los sedimentos, y su origen en función de la relación Th/U (Adams & Weaver, 1958).

Además de los usos mencionados, el registro GR es el registro que se utiliza más habitualmente en la correlación estratigráfica entre sondeos, debido a su carácter repetitivo en la tendencia del perfil, su continuidad horizontal estable y por estar menos influenciado por profundidad, el nivel de compactación o la presencia de fluidos. Resulta muy útil en la correlación entre niveles de arcillas o lutitas debido a que éstas aparecen en zonas extensas por encima y/o por debajo de las formaciones de interés (Alzate *et al.*, 2006); y constituyen además depósitos de baja energía depositados generalmente de forma horizontal formando un auténtico plano de estratificación. Aunque el valor de GR varía bastante verticalmente (en función de los minerales de arcilla presentes, de la materia orgánica o de la existencia de carbonatos), lateralmente, dentro del mismo nivel estratigráfico, estas variaciones disminuyen y se mantienen prácticamente constantes (Rider, 1996).

2.3.1.2 Registro de resistividad eléctrica

El registro de resistividad eléctrica no es un parámetro litológico excluyente, es decir, la dependencia de este parámetro de los diversos factores que pueden afectar su lectura (nivel de compactación, contenido y conductividad de fluido, etc.), hace que su correspondencia con la litología no pueda determinarse de forma directa. En la Figura 2.8 se pueden observar los diferentes rangos de variación de resistividad para diferentes tipos de rocas y algunos minerales.

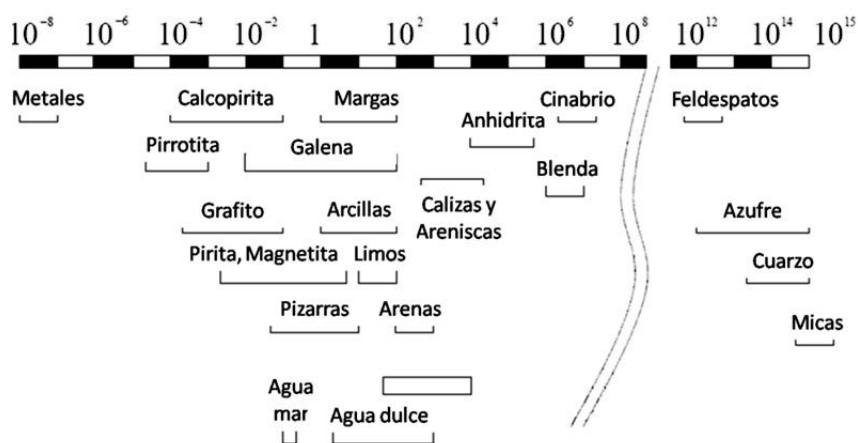


Figura 2. 8. Rangos de resistividades en algunas rocas y minerales (modificado de Kobr *et al.*, 2005). Resistividades en ohm-m.

Por lo general, si las condiciones del fluido no varían, este registro sí puede servir como indicador litológico directo, por ejemplo en secuencias formadas por arcillas y arenas (Rider,

1996). Generalmente, materiales como anhidrita, yeso y sal, calizas, dolomías o granitos presentan valores muy elevados de resistividad (Kobr *et al.*, 2005), superiores a los 1000 ohm·m. Por el contrario, valores bajos de resistividad (< 100 ohm·m) suelen mostrarlos materiales arcillosos y algunos minerales característicos (pirita, etc.).

2.3.1.3 Registro sísmico de onda completa

Las ondas acústicas se propagan por el fluido y la formación rocosa a una velocidad que está relacionada con la litología y la porosidad de la roca.

Como indicador aproximado litológico, en ocasiones se utilizan los valores aproximados de la velocidad de ondas P: elevadas velocidades (> 5800 m/s) son más comunes en rocas carbonatadas, velocidades medias (5000 – 5950 m/s) se suelen asociar a areniscas y algunas arcillas, y bajas velocidades sísmicas (1600 – 5000 m/s) son comunes en arcillas (Schlumberger, 1972). Estos valores son orientativos y suelen presentar mucha variación para cada tipo de roca, pues existen numerosos factores que influirán en los valores finales de V_p : los cambios de litología y porosidad, el contenido en agua en la formación, fracturación, la distancia entre la sonda y la pared del sondeo, la frecuencia de las ondas sísmicas, la presión por el cambio de profundidad, etc.

2.3.1.4 Registro de imagen óptica

Este registro muestra directamente la imagen de la pared del sondeo. Si las condiciones del mismo lo permiten y la calidad de la imagen es buena, se puede realizar una interpretación litológica, además de identificar estratificaciones o laminaciones y, en determinados casos, fracturas.

2.3.1.5 Registro de densidad

Aunque este registro se utiliza principalmente como registro de porosidad, a nivel cualitativo resulta útil como indicador de litologías.

A modo de referencia, los valores de densidad más comunes son las pertenecientes para algunas litologías son: 2.65 g/cm³ para las areniscas, (Figura 2.9), 2.71 g/cm³ para las calizas, 2.85 g/cm³ para las dolomías, y las anhidritas, con un valor muy elevado, de 2.96 g/cm³ (Jackson & Talbot, 1986). Las arcillas pueden presentar una densidad de matriz muy variada,

comprendida entre 1.8 y 2.9 g/cm³. Su densidad total puede ser muy baja cuando están poco compactadas y contienen mucha agua. Burst (1969), observó que las arcillas muestran una compactación que incluye cambios texturales y composicionales muy graduales, y que su incremento en densidad se suele producir a medida que su edad se incrementa. Hay ocasiones en las que la arcilla muestra un descenso en la densidad con la profundidad, cuando se sitúan por encima de arenas permeables sometidas a niveles elevados de presión (Schlumberger, 1987). Por otra parte, las arcillas que se presentan diseminadas entre los espacios porosos de la formación, pueden tener una densidad menor que las que forman capas propiamente dichas (Schlumberger, 1987).

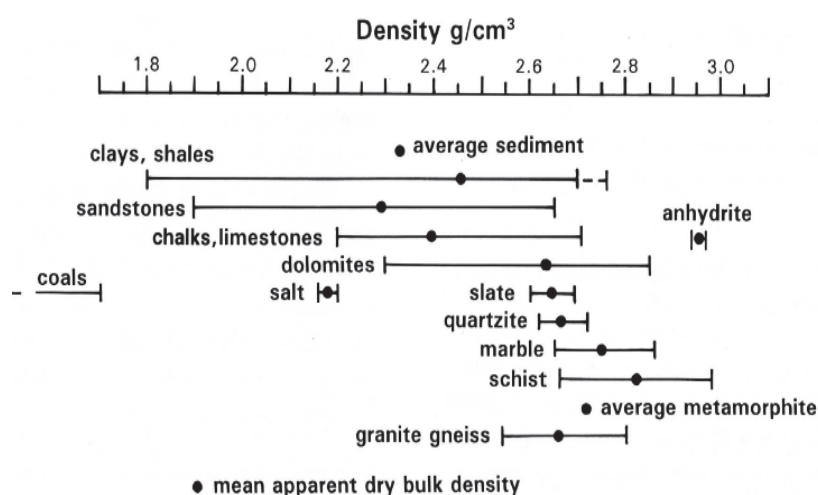


Figura 2. 9. Rangos de densidad teóricos según litologías (Jackson & Talbot, 1986).

2.3.2 Estimación litológica mediante integración de datos geofísicos

La integración y combinación de diferentes registros geofísicos facilitan la interpretación litológica reduciendo incertidumbres que pueden encontrarse en el análisis de los registros por separado. En esta tesis se han utilizado como técnicas de interpretación, dos formas de integrar diferentes parámetros petrofísicos: mediante el análisis multi-registro o zonación, y mediante *cross-plots*.

2.3.2.1 Análisis multi-registro. Zonación

El proceso consiste en dividir un registro en intervalos o tramos relativamente uniformes (zonaciones) que poseen unas características distintas del segmento o tramo adyacente, y que representan zonas de litología constante, correspondiéndose con unidades estratigráficas.

Posteriormente estos tramos son sometidos a un análisis estadístico, de forma que se deducen conclusiones sobre sus características y sus relaciones con el resto de tramos (Davis, 2002).

Este proceso de zonación está basado en el método jerárquico de análisis de agrupamiento – *cluster* – de Ward (Ward, 1963). El análisis *cluster* es un método estadístico multivariante de clasificación automática de datos que consiste en una serie de algoritmos cuyo objetivo es buscar grupos similares de variables y agruparlos lo más homogéneamente posible en base a los parámetros observados. Las variables concentradas en el mismo grupo tendrán tantas similitudes como sea posible.

2.3.2.2 *Cross-Plot*

Las gráficas de interrelación entre dos registros (*cross-plot*) definen la relación de un área o de dos variables, proporcionando un mejor reconocimiento visual en la integración realizada de parámetros físicos diferentes (Schlumberger, 1987).

Se puede añadir una tercera variable al *cross-plot*, mediante la asignación de colores y/o símbolos a un determinado parámetro. Una vez construido el *cross-plot*, se pueden definir tendencias o áreas de valores. Esta técnica es útil a modo de orientación como complemento a otros registros; una vez establecida la agrupación de puntos y llevada a la columna vertical junto con las demás diagráfias, se procederá a la interpretación litológica visualizando y teniendo en cuenta todos los registros y datos que puedan aportar información útil a la interpretación litológica.

2.3.3 Estudio de muestras en polvo mediante Difracción de Rayos X (DRX)

Las arcillas, debido a su pequeño tamaño de grano, no pueden clasificarse ni estudiarse con técnicas de microscopía óptica basadas en el análisis de imágenes utilizadas habitualmente en petrología y mineralogía. Debido a la complejidad que presentan, se hace necesario el uso de diversas técnicas analíticas para su caracterización (Wilson, 1987), entre ellas, la Difracción de Rayos X.

Se ha utilizado la DRX en esta tesis para la caracterización de materiales cristalinos, en uno de sus usos más tradicionales, es decir, el análisis cualitativo de fases cristalinas, en aquellas muestras minerales que, mediante otros métodos de análisis y observación, ofrecían dudas de interpretación.

Los análisis se han realizado para la distinción de minerales que en ocasiones, a simple vista, ofrecían dudas de interpretación (yeso o anhidrita, dolomita o calcita, presencia de cuarzo en la composición, etc.). A partir de estas catalogaciones, y contemplando esta información junto con el resto de los datos, se puede deducir más fácilmente la composición mineralógica y por extensión, la litología.

2.3.4 Estudio petrográfico de muestras en lámina delgada

Toda la tesis comprende rocas sedimentarias. Los componentes principales de las rocas sedimentarias, exceptuando las rocas de origen exclusivamente orgánico, son tres: terrígenos, ortoquímicos y aloquímicos (Castro Dorado, 1989). Las rocas con más del 50% de terrígenos se denominan rocas detríticas, y las que poseen menos del 50% reciben diversos nombres en función de la proporción de aloquímicos y ortoquímicos. Estos dos últimos grupos son mayoritariamente de composición carbonatada (rocas carbonatadas).

Dada la naturaleza de estos materiales, las técnicas utilizadas para la identificación petrográfica y clasificación posterior son las que se utilizan habitualmente en geología. La clasificación de muestras se ha realizado siguiendo la clasificación de Pettijohn (1975), en las rocas detríticas, y la clasificación según Folk (1962) y Dunham (1962), para las rocas carbonatadas.

Mediante el análisis petrográfico, se ha estudiado la estructura de la roca a escala microscópica, distinguiendo, en la medida de lo posible, la mineralogía de los granos cristalinos de la materia criptocristalina (amorfa); también se hizo una descripción de la textura de la roca, así como las superficies de contacto entre los diferentes componentes de la muestra en la lámina, estableciendo finalmente una clasificación de las muestras.

2.3.4.1 Estudio petrográfico en formaciones detríticas o siliciclásticas

Las rocas detríticas suelen ser predominantemente areniscas y lutitas. En función del tamaño de grano y del grado de consolidación de los mismos, tienen diferentes denominaciones. Las lutitas presentan componentes con tamaños de grano menor de 0.0625 mm en una proporción de más del 75%. Dentro de ellas se distinguen las arcillas o arcillitas, que están formadas por minerales de la arcilla, y las limolitas, que están compuestas por material detrítico fino y por minerales de la arcilla que forman parte del cemento.

Las areniscas presentan fragmentos con tamaños comprendidos entre 2 y 0.0625 mm de diámetro. Cuando tienen menos del 15% de matriz y están compuestas esencialmente por granos de cuarzo se denominan *Cuarzitas*, si están formadas por fragmentos de feldespatos se las llama *Arcosas*, y cuando los fragmentos son esencialmente calizos, se les asigna el nombre de *Calcarenitas*. Si se considera exclusivamente el contenido relativo de algunos componentes (cuarzo = Q, feldespato = F y fragmentos de roca = FR), así como el contenido en matriz, se pueden distinguir los tipos mostrados en la Figura 2.10 (Pettijohn, 1975).

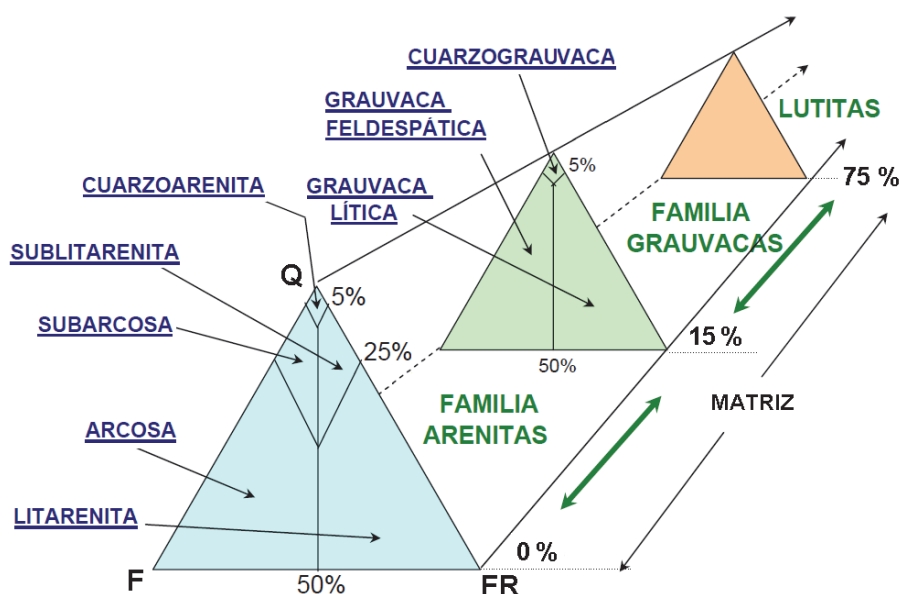


Figura 2. 10. Tipos de rocas detríticas en función del contenido de componentes de cuarzo, feldespato y fragmentos de roca, y el porcentaje de matriz (Modificado de Pettijohn (1975).

2.3.4.2 Estudio petrográfico en formaciones carbonatadas

Las rocas sedimentarias carbonatadas están compuestas fundamentalmente por dos constituyentes: componentes aloquímicos (granos) y componentes ortoquímicos. Los primeros son agregados estructurados de sedimento carbonatado, y se clasifican en Ooides, Peloides, Intraclastos, Oncoides y Pisoides, y Bioclastos (o partículas esqueléticas) (Folk, 1962). Los segundos, se componen de calcita microcristalina (micrita) y calcita esparítica (esparita).

Dunham (1962) distingue dos tipos generales de carbonatos basados en la textura deposicional (Figura 2.11): los que presentan una textura deposicional visible, y los que presentan textura diagenética, de tipo cristalina. Entre los primeros distingue cinco tipos: *Mudstone*, *Wackestone*, *Packstone*, *Grainstone* y *Boundstone* (Figura 2.11).

Folk (1962) establece una clasificación de calizas en base a las proporciones relativas de los tres constituyentes básicos explicados anteriormente, y distingue dos tipos básicos de calizas: calizas aloquímicas (>10% de granos), que pueden ser micríticas (espacio intergranular ocupado por micrita), o esparíticas (espacio intergranular ocupado por esparita), y calizas ortoquímicas o micríticas (<10% de granos) (Figura 2.11).

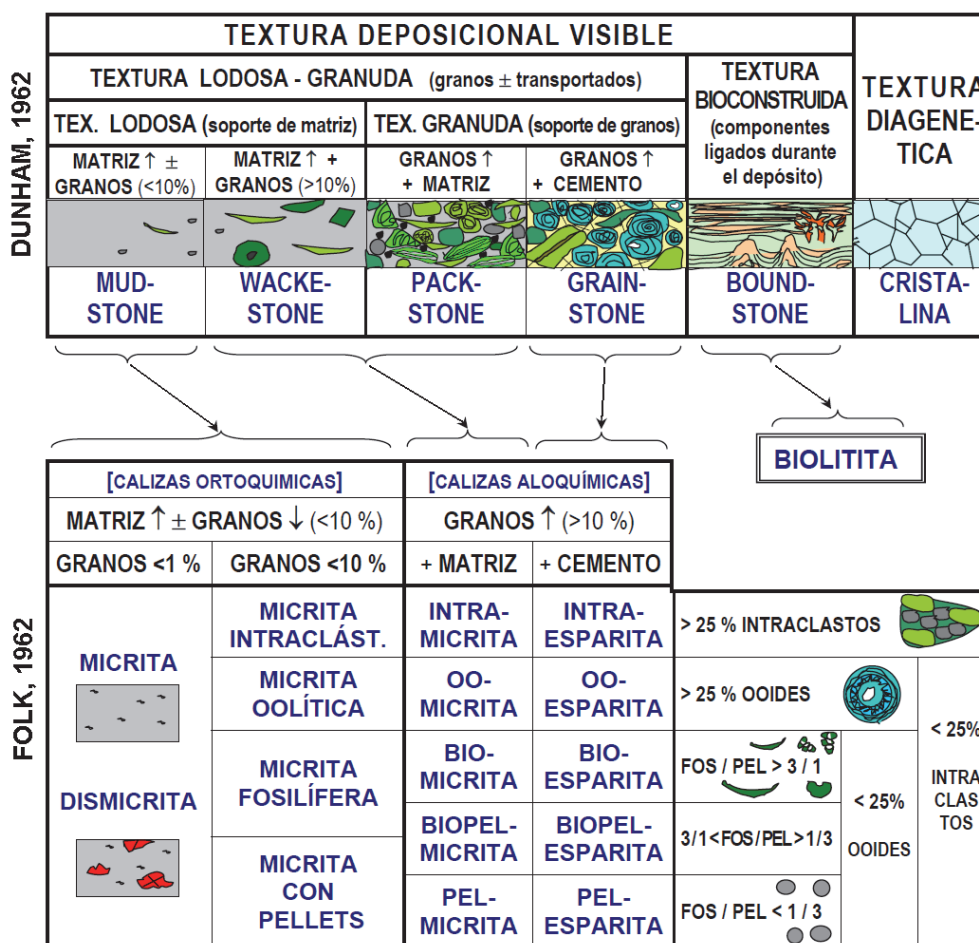


Figura 2. 11. Clasificación de carbonatos según Dunham (1962) en función de la textura (parte superior) y según Folk (1962) en función de los componentes petrográficos (parte inferior). La clasificación de Folk no es aplicable a sedimentos. (Modificado de Alonso, 2006)

2.4 Estimación de parámetros petrofísicos

Existen una serie de factores, independientes de los intrínsecos a la perforación del sondeo y las labores de testificación, que son de carácter petrofísico, y que son fundamentales para entender la respuesta de las sondas (Keys, 1989). Entre ellos están la composición química de la formación geológica, la forma y distribución del tamaño granulométrico, las características del espacio poroso, la cementación de los granos, el tipo de flujo presente, etc (Bourbie, *et al.* 1987). Estos parámetros, junto con la respuesta de las sondas y su interpretación final, se deben utilizar conjuntamente en el proceso de evaluación petrofísica de una formación geológica.

A continuación, se exponen los parámetros petrofísicos que se han estimado en esta tesis:

2.4.1 Volumen de arcillosidad

El registro GR permite estimar el volumen de arcillas (V_{sh}) en una arenisca o en un carbonato, en aquellas zonas donde interese estimar la porosidad, eliminando el efecto que las arcillas puedan ejercer sobre dicho parámetro.

Para que la estimación del volumen de arcillosidad (V_{sh}) sea válida, se ha de tomar como referencia una zona con un elevado porcentaje de arcilla o lutita, y una zona con formación libre de esos componentes (limpia). La evaluación cuantitativa del contenido en volumen de arcillas que se ha seguido asume que están ausentes otros componentes radioactivos que no sean lutitas y arcillas. Se ha utilizado un método de cálculo lineal (Schlumberger, 1974):

$$I_{gr} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (2.3)$$

I_{gr} = Índice de arcillosidad

GRlog = respuesta de GR total en la zona de interés

GRmin = respuesta promedio de GR en una zona considerada libre de arcilla o con un valor mínimo de arcilla

GRmax = respuesta promedio de GR en una zona de contenido máximo de arcilla

Este método tiende a sobreestimar el volumen de arcilla, y se utiliza como una aproximación hasta que no es contrastado con análisis de muestras en laboratorio (Rider, 1996). Existen diversas relaciones, obtenidas a partir de correlaciones empíricas, que modifican esta anterior

relación lineal para recalcular la fracción volumétrica del contenido de arcillosidad, produciéndose variaciones en la fórmula dependiendo de la consolidación de las rocas (Dresser Atlas, 1979). Las empleadas en esta tesis son las ecuaciones de Larionov (1969) para rocas consolidadas.

$$Vsh = 0.08(2^{(3.7 \cdot Igr)} - 1) \quad \text{Rocas Terciarias o sin consolidar} \quad (2.4)$$

$$Vsh = 0.33(2^{(2 \cdot Igr)} - 1) \quad \text{Rocas pre-Terciarias, consolidadas} \quad (2.5)$$

2.4.2 Porosidad

La porosidad (\emptyset) puede definirse como la relación existente entre el volumen de poros presentes en un medio poroso y el volumen total de la roca. El valor mínimo de porosidad considerado admisible para que una formación geológica sea aceptable como formación reservorio es de un 5% (Prado *et al.*, 2009), aunque finalmente esta condición de idoneidad también depende de la permeabilidad que posea la formación.

Según la comunicación de poros, la porosidad puede clasificarse en tres tipos: porosidad total o absoluta, que incluye todos los espacios de poro, porosidad efectiva o abierta, en que los poros están interconectados (Wu & Berg, 2003) y porosidad no efectiva o aislada (Figura 2.12).

En formaciones carbonatadas con cavidades (*vugs*), si es posible disponer de ellas, la porosidad total (\emptyset_t) viene dada por la suma de la porosidad primaria o intergranular (\emptyset_1) y la porosidad secundaria (\emptyset_2) o diagenética:

$$\emptyset_t = \emptyset_1 + \emptyset_2 \quad (2.6)$$

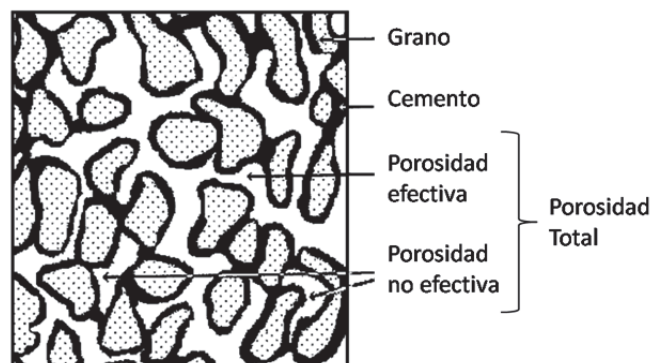


Figura 2. 12. Diferentes tipos de porosidad en una roca (Clark, 1969).

La *porosidad efectiva* es más importante que la porosidad total puesto que participa activamente en el comportamiento hidráulico de una roca (Alonso *et al.*, 1987a), y por tanto es la que determinará la calidad de una roca como reservorio. Es la más importante para la explotación de hidrocarburos (Sandoval, 2000), y por extensión, también es fundamental en el almacenamiento geológico de CO₂.

La porosidad efectiva (\emptyset_e), se puede expresar de la siguiente forma:

$$\emptyset_e = \emptyset_t(1 - V_{sh}) \quad (2.7)$$

\emptyset_t = porosidad total

\emptyset_e = porosidad efectiva

V_{sh} = volumen de arcillosidad (fracción)

Las variaciones en porosidad se pueden utilizar para estimar variaciones en la conductividad hidráulica, aunque en la mayoría de las rocas, la porosidad y la permeabilidad no están relacionadas cuantitativamente (Keys, 1989).

Las clasificaciones de la porosidad suelen establecerse desde el punto de vista genético y desde el punto de vista descriptivo:

- Las clasificaciones descriptivas se establecen en relación con determinados elementos del sistema poroso como la distribución, tamaño, forma, etc., o bien con la porosidad como propiedad física, de forma que permiten realizar correlaciones entre distintos parámetros del sistema rocoso (permeabilidad, etc.). Dentro de este grupo pueden considerarse clasificaciones que atienden a la porosidad total (Archie, 1952; Sander, 1967):

- porosidad muy baja: menor de 4 %
- porosidad baja: de 4 a 8 %
- porosidad media: de 8 a 16 %
- porosidad alta: de 16 a 32 %
- porosidad muy alta: mayor de 32 %

Y también descripciones relacionadas con el tamaño de los poros (Choquette & Pray, 1970):

- megaporos: poros mayores de 2 mm (4 mm según otros autores)
- mesoporos: poros de 2 mm a 60 μm
- microporos: poros menores de 60 μm (10 o 1 μm según otros autores).

- Las clasificaciones genéticas están relacionadas con la porosidad como componente petrográfico, y la relación que existe entre la formación de los espacios vacíos y los demás componentes minerales, así como su génesis. De acuerdo con esto, una de las clasificaciones más utilizadas es la de Choquette & Pray (1970), que establecen una clasificación de la porosidad descriptiva en cuanto a la textura de la roca, pero con marcado carácter genético:

- porosidad primaria: interpartícula e intragranular o intrapartícula
- porosidad secundaria o diagenética: fenestral, bioconstruida, intercristalina, móldica, fracturas, cavidades, canales, abrigo

Alonso (2006) compara las porosidades y otros parámetros petrográficos entre calizas y areniscas, y destaca la enorme diferencia de porosidad en ambos materiales entre el estadio anterior a la diagénesis y después, cuando las porosidades experimentan una enorme reducción (Tabla 2.3).

Tabla 2. 3. Comparación de porosidades y otros parámetros en areniscas y calizas antes y posteriormente al proceso de diagénesis (Alonso, 2006).

	Areniscas	Calizas
Porosidad Inicial	25 - 40 %	0 - 70 %
Porosidad Final	15 - 30 %	5 - 15 %
Tipos poros iniciales	Intergranulares	Inter / Intragranulares
Tipos poros finales	Intergranulares	Variados
Relación tamaño poros-granos	Elevada	Poca
Relación forma poros-granos	Negativo	Variado
Homogeneidad cuerpo poroso	Elevada	Variable
Influencia diagénesis	Poca	Mucha
Evaluación visual	Fácil	Variable
Relación con permeabilidad	Buena	Variable

2.4.2.1 Métodos empleados para determinar la porosidad

Las principales características para describir el sistema poroso de una roca son su volumen, distribución de los tamaños de poro, la morfología de los mismos y la conexión entre las diferentes porosidades (Alonso *et al.*, 1987; Esbert & Ordaz, 1985).

Los métodos de campo y de laboratorio para estimar la porosidad a menudo no coinciden debido a que éstos últimos proporcionan solo un punto de medida, mientras que los estudios a nivel de campo proporcionan resultados en un volumen de muestreo mayor. El resultado de los muestreos a gran escala es que pueden incorporar heterogeneidades como resultado de la variabilidad litológica, como fracturas o cavidades. Li *et al.*, (1995), tras ensayos llevados a cabo sobre rocas terciarias para estimar la capacidad de transporte de masa en aguas subterráneas, concluyó que la escala de medición es un factor que influirá en los resultados, de forma que a medida que la escala de los ensayos aumenta, la porosidad efectiva decrece.

El sistema poroso será diferente en cada caso según el tipo de litología; en las rocas siliciclásticas la porosidad suele ser de tipo intergranular, mientras que en las rocas carbonatadas existe una mayor variedad de porosidad (intragranular, móldica, por fisuración, etc.).

En esta tesis, la porosidad ha sido estudiada a nivel microscópico a partir de muestras dispuestas en lámina delgada. A una mayor escala, se ha realizado la estimación en laboratorio y por otra parte se han utilizado los siguientes registros: sísmico, densidad aparente y neutrón. Los registros de densidad y neutrón responden a la porosidad total, mientras que los registros sísmicos ignoran la porosidad secundaria, respondiendo básicamente a la porosidad intergranular primaria (Tabla 2.4) (Keys, 1989). Como no es un cálculo directo, esta estimación se ha de apoyar en el conocimiento de la litología y de los parámetros de la matriz de la formación geológica en formaciones saturadas de agua (Schlumberger, 1987).

Tabla 2. 4. Respuesta de algunos registros geofísicos a diferentes tipos de porosidad (modificado de Keys, 1989).

Registro	Porosidad total (ϕ_t)	Porosidad secundaria (ϕ_2)	Porosidad efectiva (ϕ_e)
Resistividad	No flujo de corriente a través de poros aislados	Detecta ϕ_2 pero le afecta la morfología	Respuesta solo a la ϕ_e
Velocidad acústica	Solo cuando es primaria e intergranular	No respuesta	No distingue
Neutrón	Buena respuesta en rocas con baja porosidad	No distingue ϕ_1	No distingue

- Porosidad a partir de registro sísmico

El registro sísmico responde principalmente a la porosidad intergranular primaria, ignorando la porosidad debida a fracturas o grietas (secundaria). Cuando existe porosidad secundaria (ϕ_2) ésta se podría estimar extrayendo la porosidad sísmica (ϕ_s) de la porosidad total de la roca (ϕ_t) (Asquith & Krygowski, 2004), en caso de disponer de esta última.

Existen dos modos clásicos de estimar la porosidad sísmica: mediante la fórmula de Tiempo Promedio de Wyllie *et al.* (1956) y mediante la transformada de Raymer *et al.* (1980).

Wyllie *et al.* (1956) sugirieron una relación lineal entre la velocidad de tránsito de la onda compresional en la formación y la porosidad, mediante la llamada Ecuación de Tiempo Promedio:

$$\phi_s = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \tag{2.8}$$

Δt = lectura del tiempo de tránsito acústico medido en el registro (recíproco de la onda compresional)

Δt_{ma} = tiempo de tránsito acústico de la matriz de la formación (valor teórico)

Δt_f = tiempo de tránsito acústico del fluido.

ϕ_s = porosidad sónica

Es una ecuación empírica basada en análisis estadísticos, apropiada para cuantificar la porosidad en areniscas consolidadas y carbonatos con una distribución intergranular y moderadamente uniforme de poros pequeños, que estén sometidos a una determinada presión de confinamiento y sin contenido en componentes arcillosos. De la ecuación de Wyllie, se extrae la porosidad sónica en Unidades de Porosidad (U.P) o porcentaje, asumiendo que la roca está formada por una mineralogía homogénea y con porosidades intermedias.

En arenas no consolidadas, la aplicación directa de la fórmula de Wyllie da valores de porosidad anormalmente elevados, muy comunes en formaciones someras, siendo necesario introducir un factor de compactación.

Raymer *et al.* (1980) introducen una transformación empírica del tiempo de tránsito a porosidad ϕ_{RH} , para una matriz de arenisca, basada enteramente en comparaciones de tiempo de tránsito sónico con una medida de porosidad independiente sobre muestras y en numerosos registros.

$$\phi_{RH} = C * \left(\frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t} \right) \quad (2.9)$$

(Unidades en porcentaje o fracción)

$C = 0.625 - 0.70$ (el más utilizado, 0.67)

Dicha transformada no requiere corrección por compactación y permite mostrar la gama total de porosidades (0-100%). Por estas razones es la ecuación que se ha utilizado en esta tesis.

El tiempo de tránsito de la matriz (Δt_{ma}) depende principalmente del tipo de litología y de la distribución de la porosidad. Los valores utilizados comúnmente se pueden ver en la Tabla 2.5 (Schlumberger, 2003). El valor del tiempo de tránsito del fluido (Δt_f) utilizado normalmente es de 1587 m/s (620 us/m) en aguas no salinas, y de 1622 m/s (607 us/m) en aguas salinas; en nuestro caso, se ha estimado a partir del registro acústico de imagen (ABI).

Tabla 2. 5. Rangos de tiempos de tránsito de matriz teóricos, y el valor más comúnmente utilizado (modificado de Schlumberger Well Services, 2003).

	Vma (m/s)	Δtma (us/m)
Areniscas	5486 - 5944	128 - 167
Calizas	6400 - 7010	156 - 142,7
Dolomías	7010 - 7925	142,7 - 127
Anhidrita	6096	164
Sal	4572	219

- Porosidad a partir del registro de densidad

La porosidad estimada a partir del registro de densidad aparente (RHOB) es la porosidad debida al fluido de poro y a la matriz sólida, y por tanto dependerá de la densidad de los minerales que forman la roca (Rider, 1996). Es más fiable que la porosidad sónica, puesto que el registro sónico ignora la porosidad secundaria. Las lecturas de RHOB por tanto, se aproximarán mucho a la porosidad total cuando la densidad del fluido y la de los granos permanezca aproximadamente constante (Patchett & Coalson, 1979).

La densidad aparente de una formación (*Bulk Density*), ρ_b , se puede expresar como una contribución lineal de la densidad de la matriz de roca (ρ_{ma}) y la porosidad (\emptyset), más la densidad de fluido que satura los poros (ρ_f). De esta relación se puede extraer el valor de la porosidad por densidad (\emptyset_d):

$$\emptyset_d = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \tag{2.10}$$

ρ_{ma} = densidad de la matriz (teórica)

ρ_b = densidad medida en la formación (incluye porosidad –intergranular y de fracturas- y densidad de grano)

ρ_f = densidad del fluido que satura los poros

La porosidad calculada a través del registro de densidad depende de la densidad del fluido que se haya utilizado, y ésta depende a su vez, de la salinidad. En el caso que se desconozca la densidad del fluido que satura los poros, se utiliza generalmente la densidad del agua salina,

que es de 1.1 g/cm^3 , y para aguas no salinas (dulces), se suele tomar un valor de 1.0 g/cm^3 . Como la sonda mide en la zona invadida, el fluido que se toma como referencia suele ser, en la mayoría de circunstancias, el del lodo utilizado en la perforación.

Generalmente el registro de densidad suele acompañarse de una curva suplementaria que representa la corrección por densidad (DRHO) y que registra las desviaciones de la señal. El valor en dicha curva es la corrección que se agrega al valor de densidad; si esta desviación excede $\pm 0.2 \text{ g/cm}^3$, la respuesta del registro de densidad no es válida y se anulan los resultados (Asquith & Gibson, 1982). La presencia de arcillas también influirá en las lecturas de densidad.

- Porosidad a partir del registro neutrón

Para disponer de una correcta porosidad derivada del registro neutrón (NPHI), se ha de conocer primeramente la litología de la formación, y el tipo de matriz utilizado (areniscas, caliza o dolomía) a modo de calibración para producir el registro de porosidad neutrón.

Se presenta en unidades de porosidad (vol/vol ó u.p., y en cps ó API en los registros más antiguos) para la matriz elegida. La profundidad de investigación es de pulgadas, de modo que el registro proporciona lecturas de la zona lavada.

Para una estimación exacta de la porosidad a partir de un registro neutrón, son necesarias correcciones litológicas y de parámetros del sondeo. Cualquier interpretación procedente solamente de un registro neutrón debe tomarse con cautela, pues incorporará un considerable margen de error (Schlumberger, 1987).

Mercado *et al.* (2010) mostraron que la combinación de la porosidad neutrón y la porosidad por densidad podían aproximar la porosidad efectiva de una roca. La combinación entre la porosidad por densidad (ϕ_d) y la porosidad neutrón (NPHI) puede generar una porosidad total aparente (ϕ_{Ta}):

$$\phi_{Ta} = \sqrt{\frac{\phi_d^2 + NPHI^2}{2}} \quad (2.11)$$

De esta ecuación se puede extraer la porosidad efectiva, restando a la porosidad total efectiva el volumen de arcillosidad (Vsh) presente en la formación arenosa.

- Porosidad a partir de muestra en lámina delgada

Con las muestras en láminas delgadas teñidas de Azul de metileno, y mediante un programa de edición digital, se ha llevado a cabo una aproximación semicuantitativa del porcentaje de porosidad e identificación tipológica. Aunque con tan poco número de muestras puede existir un margen de error en los cálculos, si tuviésemos el número suficiente se podría construir un modelo tridimensional de la roca, obteniendo de este modo un promedio de porosidad para las áreas encada lámina, y así obtener un valor muy aproximado a la porosidad real. El resultado más aproximado al verdadero depende de la homogeneidad de la roca para que esta pueda ser representada por un área tan pequeña como la observada a través de un microscopio; también debe estudiarse un número considerable de muestras tomadas de la misma capa de la formación.

El método de trabajo en esta tesis para la estimación de la porosidad en lámina delgada ha consistido en la identificación mineral del total de la lámina delgada (sección rectangular), de forma que sea lo más representativa posible de la muestra. Mediante el programa *ImageJ* se trataron digitalmente las imágenes para mejorar la calidad de las mismas y resaltar las zonas porosas. En cada lámina, se ha llevado a cabo una estimación estadística de los espacios porosos, con el objetivo de clasificar de forma precisa cada muestra.

La porosidad estimada a partir de imágenes digitales será la porosidad total aparente y por tanto, siempre será superior a la estimada a partir de ensayos de laboratorio, donde se suele obtener la porosidad conectada o efectiva.

- Porosidad a partir de ensayos de laboratorio

A partir del ensayo de conductividad hidráulica controlada realizado en laboratorio, y aplicando ciertos parámetros petrofísicos (humedad inicial, humedad final, masa inicial, masa final, etc.), se ha podido extraer un índice de porosidad (e_{naf}). Dicho índice, calculado a partir de la relación entre la densidad teórica de la muestra ensayada y la densidad de dicha muestra una vez sometida a secado, sirvió para estimar el valor de la porosidad total. Con este valor de la porosidad total, y aplicando los parámetros de humedad y masa, se pudo deducir el valor de la porosidad efectiva. Gómez (2009) presenta una descripción detallada de dicha metodología.

A partir de la humedad higroscópica (wh) obtenida a partir de dichos ensayos y la densidad teórica de las muestras ensayadas, pudo extraerse el valor de la superficie específica (Ss), utilizado posteriormente para obtener el valor de la permeabilidad (Sección 2.4.3 en este mismo capítulo). Por definición, se denomina superficie específica al área de una superficie por la unidad de masa (m^2/g ó cm^2/cm^3), y dependerá del tamaño y morfología de las partículas.

2.4.2.2 Correcciones por arcillosidad

- Correcciones en el registro sínico

La presencia de arcillas en las formaciones geológicas puede afectar a la interpretación de los registros en general, y generalmente, el registro sínico suele ser muy sensible a su presencia. Es importante conocer el volumen que ocupan, pero sobre todo, su distribución (laminar, dispersa o estructural), que influirá en la respuesta de la herramienta utilizada para el registro, y por tanto en el valor de porosidad estimado posteriormente.

En el caso de la existencia de arenas arcillosas, es posible corregir la porosidad sínica debido a la presencia de arcillas a partir del dato de volumen de arcillosidad V_{sh} (Dresser Atlas, 1979).

$$\phi_{S-Sh} = \left(\frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} * \frac{100}{\Delta t_{sh}} \right) - V_{sh} \left(\frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \right) \quad (2.12)$$

ϕ_{S-Sh} = porosidad corregida por efecto de las arcillas en las arenas

Δt_{log} = tiempo de tránsito acústico medido en el registro

Δt_{ma} = tiempo de tránsito acústico de la matriz de la formación rocosa

Δt_f = tiempo de tránsito acústico del fluido

Δt_{sh} = tiempo de tránsito acústico de la fracción arcillosa

- Correcciones en el registro densidad

La presencia de arcillas puede inducir errores en la estimación de porosidad por densidad si la densidad de la matriz ρ_{ma} no tiene en cuenta la densidad de la arcilla contenida en ella (esta densidad suele ser menor que la de la matriz).

La densidad de la arcilla varía enormemente ($1.8 - 2.75 g/cm^3$), y puede estar presente como una proporción de litología (arcilla arenosa, arenisca arcillosa, etc.). Si existen zonas

alternantes sin arcilla y zonas con arcilla laminada intercaladas con rocas arcillosas, se puede utilizar el valor de la densidad aparente (*Bulk Density*) en las arcillas y roca sin arcilla (ρb_{limpia}) junto con el valor del volumen de arcillosidad (V_{sh}) para obtener la densidad corregida (ρb_{corr}) de esa roca arcillosa en el intervalo de profundidad que interese. Se obtiene así la densidad aparente corregida para las litologías arcillosas:

$$(\rho b)_{corr} = (\rho b)_{limpia}(1 - V_{sh}) + (\rho b)_{sh}V_{sh} \quad (2.13)$$

ρb_{corr} = densidad corregida

ρb_{limp} = densidad de la roca

V_{sh} = volumen de arcillosidad

ρb_{sh} = densidad de las arcillas

Este valor corregido de densidad se puede utilizar en la Ecuación (2.10) para obtener una porosidad que tiene en cuenta la arcillosidad.

2.4.3 Permeabilidad

Una roca, para ser permeable, debe tener porosidad interconectada o fracturas, de este modo, se puede decir que existe cierta relación entre la porosidad y la permeabilidad, aunque no es estrictamente necesario: depende en gran medida del tamaño de grano de la roca. Por ejemplo, las lutitas tienen una elevada porosidad pero por su tamaño de grano tan fino, poseen muy poca permeabilidad, y las calizas tienen baja porosidad pero la presencia de fracturas o si han sido sometidas a algún proceso de disolución hace que su permeabilidad se incremente. Si ha existido compactación o cementación, también la permeabilidad se reducirá.

Al igual que pasa con la porosidad, el valor de la conductividad hidráulica también dependerá de la escala a la que se haya realizado la prueba. La existencia de fracturas permeables permitirá la inyección de una gran cantidad de fluido a través de la zona porosa y fracturada, pero sin la existencia de esas fracturas, por ejemplo en una muestra más pequeña (muestra en laboratorio), el volumen de roca porosa disponible también será mucho más pequeña (Danielsen & Dahlin, 2006, 2009). Los ensayos a gran escala suelen dar valores de conductividad hidráulica más elevados y más realísticos que los realizados a pequeña escala (laboratorio), debido al mayor volumen de material sobre el que actúan.

2.4.3.1 Métodos empleados para determinar la permeabilidad

Existen numerosas formas de estimar la permeabilidad o conductividad hidráulica en una formación geológica. A continuación se describen las utilizadas en esta tesis.

- Permeabilidad a partir de diagráfias

Existen diversos registros geofísicos apropiados para realizar medidas en la columna del fluido de un sondeo (conductividad, resistividad del fluido...), así como otros enfocados en un volumen determinado de formación. Los registros de Resistividad suelen correlacionarse con propiedades hidráulicas como la permeabilidad o el coeficiente de almacenamiento (Keys, 1989; Jorgensen, 1989), pero esta correlación necesita de un número importante de test hidráulicos realizados en acuíferos o en muestras de testigos.

Desde un punto de vista puramente cualitativo, las deformaciones de un sondeo y de las aberturas de las fracturas indicadas a partir del registro del *cáliper* representan también los efectos indirectos de las fracturas inducidas por las labores de perforación (Keys, 1997). En presencia de lodo de perforación, cuando en el perfil del diámetro del sondeo no existen irregularidades, y presenta una forma de enjarre característica, es decir, un valor ligeramente menor que el diámetro de la perforación, existirá una filtración del lodo a la formación permeable.

También se puede identificar cualitativamente zonas permeables a partir de un registro de potencial espontáneo (SP). Aunque no existe una relación directa entre la magnitud de deflexión del potencial espontáneo y la permeabilidad, sí es posible observar cierta deflexión negativa (hacia el lado izquierdo) en presencia de una zona permeable, siempre que el lodo de perforación sea más resistivo que el agua de formación. Esto no implica que la ausencia de deflexión sea indicativa de ausencia de permeabilidad.

Los perfiles de resistividad Normal, Lateral o de inducción suelen mostrar una separación debido a sus diferentes profundidades de investigación. Cuando exista suficiente contraste entre la resistividad del agua de formación y la del agua filtrada, existirá una invasión del fluido hacia la formación permeable (Serra, 2004), de forma que se producirá esa separación de las curvas. La permeabilidad en este caso resulta más concluyente cuando además se dan las situaciones anteriores en los perfiles SP y de *cáliper*.

Con respecto al registro sísmico, tras la llegada a los receptores de las ondas P y S, llegan las Ondas Stoneley u ondas de interfaz fluido-sondeo; los tramos donde se aprecia un descenso de su amplitud suele corresponder a zonas fracturadas con elevada permeabilidad (Paillet *et al.*, 1987). Estas ondas se propagan simétricamente a lo largo del sondeo hacia la superficie y hacia el fondo, pudiendo obtenerse el registro de su forma en función de la distancia y del tiempo que tarda la señal en llegar a cada uno de los receptores.

Más efectivo que estos registros anteriores es la imagen proporcionada por la sonda de imagen acústica de la pared del sondeo, que ofrece una información muy específica en la identificación y caracterización de las fracturas individuales y su abertura, y de los contactos entre capas. Estas características pueden ser utilizadas para hacer una estimación cualitativa superficial de la permeabilidad del material rocoso. A continuación, se desarrolla en detalle esta técnica.

El rendimiento de un reservorio fracturado de baja permeabilidad está controlado por el estado tensional de la formación geológica y por la orientación y distribución del sistema de fracturas naturales y las fallas existentes (Barton & Zoback, 2000). La presencia de fracturas y de fallas en los reservorios afecta a la conductividad hidráulica de la formación que rodea al sondeo, siendo la vía principal de desplazamiento de un fluido (Paillet *et al.*, 1987). La correspondencia entre las fracturas sometidas a un esfuerzo crítico y la conductividad hidráulica ha sido documentada en numerosos trabajos (Raven & Gale, 1985; Barton *et al.*, 1995; Finkbeiner *et al.*, 1997; Pyrak-Nolte & Norris, 2000; Hamm *et al.*, 2007).

El valor de la conductividad hidráulica no es constante sino que puede variar de una zona a otra dentro del sondeo. Hamm *et al.* (2007) demostraron en sus estudios que un valor pequeño de conductividad hidráulica puede ser debido a que las fracturas estén rellenas con partículas como minerales de la arcilla en la proximidad de donde se tomaron las muestras, o a que haya una conectividad por fracturas muy pobre en las inmediaciones de la zona de estudio. Dichos autores concluyen que el valor de la conductividad hidráulica puede ser bajo incluso en zonas con una elevada frecuencia de fracturas, y que la abertura de las fracturas influye más directamente que la frecuencia de las mismas.

Si se compara la identificación de discontinuidades a partir de un registro de imagen con respecto a la observación de las mismas sobre muestra de testigo, los datos derivados del primero presentan ciertas ventajas con respecto a la segunda: información precisa de la orientación (los testigos pueden estar desorientados después de la perforación, extracción y manipulación), información más continua a lo largo de la pared del sondeo (cuando existe una intensa fracturación en la formación geológica, en el proceso de perforación y extracción de

testigo se suele perder material), y finalmente, los registros de imagen son menos costosos que todo el proceso de adquisición de testigo.

Las imágenes acústicas no se pueden relacionar directamente con las propiedades hidráulicas de la formación geológica circundante, sino que se requieren perfiles de flujo complementarios obtenidos bajo condiciones ambientales o bien mediante pruebas de bombeo (Paillet *et al.*, 1987). Al atravesar una formación rocosa fracturada, rugosa o con presencia de cavidades, la energía de la onda acústica se dispersa reduciéndose significativamente la amplitud de la señal como resultado de la transferencia de energía. La transmisión de esa energía varía en función del buzamiento aparente de la fractura con respecto a la dirección de propagación. Según experimentos de Morris *et al.* (1964) la inclinación de la fractura también influye, de forma que las ondas de compresión sufren poca atenuación al atravesar fracturas que son casi horizontales o muy verticales, mientras que si el ángulo se sitúa entre 35° y 80°, la atenuación es elevada.

Las discontinuidades identificadas a partir la imagen acústica de la pared del sondeo han sido fracturas, venas (por mineralización o de relleno) y tramos fallados. Las fracturas inducidas por las labores de perforación así como otro tipo de discontinuidades o “artefactos”, a menudo diferenciadas en la imagen acústica (Lofts & Bourke, 1999; Barton & Zoback, 2000), no han sido tomadas en cuenta.

Aunque todos estos tipos de fracturas suponen una discontinuidad propiamente dicha, y por tanto un medio a priori conductivo, en esta tesis se han tenido en cuenta preferentemente las fracturas que no se presentaban cementadas, por su dudoso carácter permeable. Una vez identificadas las fracturas, y determinadas las direcciones y buzamientos reales de las estructuras sedimentarias y fracturas, se ha estimado su frecuencia para establecer una valoración cualitativa de la estabilidad estructural de la pared del sondeo. La longitud de las fracturas y su interconexión no se han podido valorar por tratarse de registros de sondeo y por tanto sin capacidad de valoración a nivel penetrativo. Se han distinguido 4 tipos de fracturas en función del espesor de la abertura identificada: fracturas ligeramente abiertas (<3 mm de abertura); fracturas abiertas (0.3 - 1 cm de abertura); fracturas bastante abiertas (1 cm - 3 cm de abertura); y fracturas muy abiertas (> 3 cm de abertura).

Para examinar la distribución y frecuencia de las discontinuidades a lo largo de la formación sello y formación almacén, se han representado mediante proyección estereográfica e histogramas.

- Permeabilidad a partir de ensayos de gradiente hidráulico en laboratorio

Los ensayos de gradiente hidráulico controlado bajo tensión total constante en esta tesis, se han realizado sobre 5 muestras, cuyas características de forma y tamaño fueron adaptadas a la técnica descrita en el apartado Metodología 2.2.3. Se registró continuamente el volumen de agua entrante en la muestra, determinando el coeficiente de permeabilidad saturada al agua o conductividad hidráulica (k_w), en metros por segundo, bajo la condición de flujo estacionario y gradiente hidráulico controlado, utilizando la expresión:

$$k_w = \frac{[(\Delta V / \Delta t)] / A}{\nabla h}; \quad h = z + \frac{u_w}{\gamma_w} \quad (2.14)$$

$\Delta V / \Delta t$ = caudal de agua determinado para un período de tiempo ∇t (volumen/unidad tiempo)

A = área transversal de la muestra (cm^2)

∇h = gradiente hidráulico aplicado

z = referencia de altura (mm)

u_w = presión de agua (KPa)

γ_w = peso unitario del agua (g)

Gómez (2009) describe detalladamente la metodología seguida para la preparación de las muestras y la obtención de los parámetros necesarios para la aplicación del ensayo de gradiente hidráulico en célula triaxial.

Mejías & López-Geta (2003) dividen las formaciones geológicas en función del valor estimado de conductividad hidráulica (k_w) en:

- Formación de Muy Baja Permeabilidad: $K_w < 1 \times 10^{-12}$ m/s
- Formación de Baja Permeabilidad: 1×10^{-12} m/s $< K_w < 1 \times 10^{-9}$ m/s
- Formación Poco Permeable: 1×10^{-9} m/s $< K_w < 1 \times 10^{-7}$ m/s
- Formación Algo Permeable: 1×10^{-7} m/s $< K_w < 1 \times 10^{-5}$ m/s

- Permeabilidad a partir de ensayo Lugeon

Con este ensayo se pretende obtener el valor del coeficiente de la permeabilidad en profundidad, debido a las fracturas de la roca o del material granular cementado. El ensayo permite obtener la conductividad hidráulica a una escala mayor que la calculada en laboratorio. La técnica se introdujo en el apartado 2.2.4 de Metodología.

El valor de la permeabilidad en los ensayos Lugeon (K) se ha obtenido a partir de la fórmula de González de Vallejo *et al.*, (2002), expresada en Unidades Lugeon (U.L):

$$K = \frac{V_{(l)}}{l_{(m)}} \cdot \frac{1000}{P_{(Kpa)}} \cdot \frac{10}{t_{(min)}} \quad (2.15)$$

V = volumen de agua inyectado durante el ensayo

l = longitud del tramo de sondeo sobre el que se inyecta agua

P = presión ejercida durante la inyección de agua

t = tiempo de inyección de agua a determinada presión

Si la inyectabilidad es directamente proporcional a la presión de inyección (es decir corresponde a la absorción de agua de 1 litro por metro de sondeo y por minuto bajo una presión de 10 kg/cm²), el valor de la unidad “Lugeon” (U.L.) vendrá dado por la siguiente ecuación (Cassan, 1982):

$$1U.L. = 1 \frac{l}{m \cdot \min} = 10^{-5} \frac{cm}{s} \quad (2.16)$$

Dado que las condiciones de régimen permanente no se alcanzan en el periodo de tiempo ensayado, el resultado obtenido es aproximado, por lo que es conveniente denominarlo permeabilidad-inyectabilidad, en lugar de permeabilidad.

En la Tabla 2.6, se puede ver la clasificación de los macizos rocosos según Olalla & Sopena (1991). Los macizos rocosos muy impermeables (M.I.) comprenderían valores de 0 a 1 Unidad Lugeon, y en el otro extremo, los macizos muy permeables (M.P.) alcanzarían valores superiores a las 6 U.L.

Tabla 2. 6. Clasificación de los macizos rocosos en función de la permeabilidad en Unidades Lugeon (UL) y de la presión sometida (Kpa), según Olalla & Sopeña (1991).

Tipo de macizo	Unidades Lugeon (U.L)	Presión (Kpa)
Muy impermeable	0 - 1	1000
Prácticamente impermeable	1 - 3	1000
Permeable	>3	1000
	1,5 - 6	500
Muy permeable	>3	1000
	>6	500

Existen diversos factores que influyen en los resultados de este ensayo, como la presencia de fracturas y su distribución, la longitud del intervalo donde se haga el ensayo, el efecto de un nivel freático artificial, la existencia de corrientes, ríos o lagos (Hamm *et al.*, 2007).

La relación entre la presión inyectada y la absorción en cada escalón o periodo lleva a la construcción de las gráficas de Presión-Absorción, que permiten cuantificar las permeabilidades o interpretar los fenómenos de obturación, apertura o saturación de las fisuras durante el ensayo. La comparación entre las presiones ascendentes y las descendentes, permite determinar las condiciones y el comportamiento del medio permeable, así como su evolución cuando esté sometido a diferentes estados de presión. La forma de la curva presión-absorción depende fundamentalmente de las características del estado de fisuración de la formación, del espesor de las fisuras y su distribución, su relleno, etc. (Houlsby, 1976).

En ocasiones, al aumentar la presión aumenta la permeabilidad, lo que indica apertura o lavado de fisuras. Otras veces se producen colmataciones, fracturaciones, etc. Estas variaciones de presión producidas conducen a una variedad de tipos de curvas, a las que se llaman diagramas Lugeon. Estos diagramas indican diversas tendencias de comportamiento del medio frente al ensayo, y a partir de ellos se puede deducir cualitativamente el efecto que tiene la presión sobre el medio ensayado.

- Permeabilidad a partir de la atenuación de la energía acústica en el registro sísmico de onda completa

Lebreton *et al.* (1978) apoyaron la teoría de que a partir de la relación de los valores máximos absolutos de los tres primeros pulsos de la forma de una onda acústica registrada por una sonda sísmica, se podía inferir un índice de permeabilidad.

Morlier & Sarda (1971) demostraron, mediante estudios experimentales de laboratorio, que la atenuación de una formación libre de arcillas se podía expresar en términos de porosidad (\emptyset), de permeabilidad (k) y de superficie específica (S_s). Tanto estos estudios experimentales como estudios teóricos más recientes (Zinszner & Pellerin, 2007; Mari *et al.*, 2011), han identificado la relación existente entre parámetros petrofísicos y la atenuación acústica, mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = \left(\frac{C \cdot S_s}{\emptyset} \right) \cdot \left(\frac{2\pi \cdot k \cdot f \cdot \rho_f}{\mu} \right)^{1/3} \quad (2.17)$$

δ = atenuación (dB/cm)

f = frecuencia (Hz)

ρ_f = densidad del fluido (g/cm³)

μ = viscosidad del fluido (centipoise)

\emptyset = porosidad

S_s = superficie específica (cm²/cm³)

C = coeficiente de calibración

k = permeabilidad (mD)

A partir del estudio de porosidad, permeabilidad y datos ultrasónicos de muestras de carbonatos, Mari & Guillemot (2012), definieron el parámetro *Ik-Seis* (*Indicator of permeability (k) from acoustic or seismic data*), demostrando que es proporcional a la permeabilidad (k).

$$Ik - Seis = \frac{(\emptyset \cdot \delta / S_s)^3}{f} \quad (2.18)$$

\emptyset = porosidad

δ = atenuación

S_s = superficie específica

f = frecuencia onda-P

El análisis de las ondas sínicas registradas mediante la sonda sónica de onda completa (FWS) ha permitido calcular la atenuación (Att) y la amplitud (A), necesarios para estimar el parámetro Ik-Seis.

Para estimar la atenuación, se utilizaron las amplitudes *rms* de una ventana de tiempo comprendidos entre la primera llegada y el final del tercer pico (líneas roja y azul en el receptor RX2-1A de la Figura 2.13). La relación entre la amplitud *rms* de los dos receptores adyacentes (dB) dividido por la distancia entre los receptores (20 cm) proporcionó el valor de la atenuación medida en dB/cm.

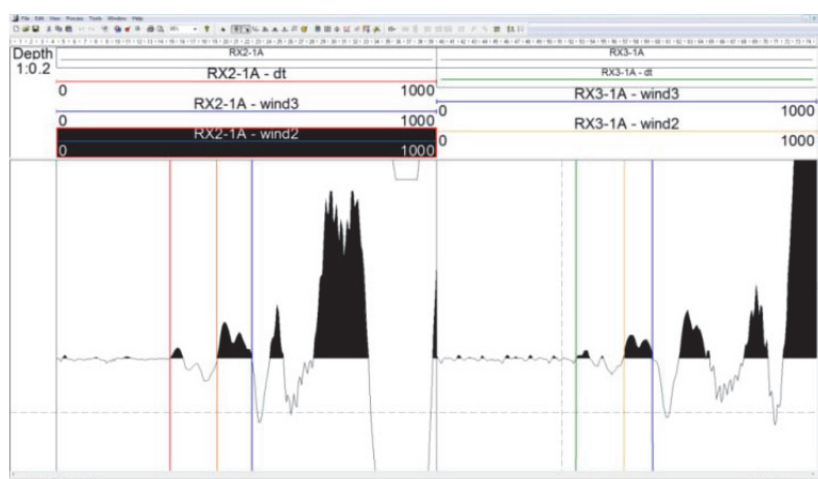


Figura 2. 13. Ejemplo de dos trazas correspondientes a la llegada de la señal símica a los receptores RX2-1A y RX3-1A, con las líneas correspondientes a la detección de los tres primeros pulsos de onda (líneas roja, naranja, azul).

El valor de la porosidad (\emptyset) utilizado fue el de la porosidad símica estimado en los diferentes sondeos, y el valor de la superficie específica (Ss) se tomó del obtenido en los ensayos de laboratorio realizado sobre muestras.

Las distorsiones de la señal acústica, relacionadas a menudo con la propagación a través de una zona porosa y permeable, se han podido estimar mediante un atributo acústico, independiente de la energía de la fuente, llamado Índice de Forma o *Shape Index* (I_c) (Lebreton & Morlier, 1983):

$$I_c = \left(\frac{A_2 + A_3}{A_1} \right)^n \quad (2.19)$$

A_1, A_2, A_3 = amplitudes de los tres primeros valores de pico de la señal estudiada
 n = exponente

Los cambios observados en este coeficiente deberían ser correlacionados con el valor de Ik-Seis, para confirmar que indican zonas permeables.

2.5 Integración de sondeos antiguos de exploración de hidrocarburos al estudio actual

Se ha llevado a cabo la integración en el estudio actual de diferentes sondeos antiguos y profundos procedentes de exploración de hidrocarburos, mediante correlación de las series estratigráficas. Esta correlación se ha llevado a cabo mediante diagráfias. En cada zona donde se localiza un sondeo actual somero, se ha recabado información de todos los sondeos cercanos cuyas series estratigráficas son correlacionables con las identificadas en el sondeo de estudio. La correlación mediante diagráfias se lleva a cabo comparando la similitud morfológica entre los diferentes registros, para establecer de este modo, correspondencias entre unidades estratigráficas (Jurado, 1989). En el proceso de correlación entre sondeos se ha identificado un patrón típico de comportamiento o tendencia general en el perfil de un registro inicial, y a partir de este patrón se han buscado sondeos próximos que presentaban una tendencia igual o similar en los registros según una dirección o zona de interés dentro de la cuenca. Una vez seleccionado ese patrón y elegido los sondeos próximos representativos, la línea imaginaria que los une sobre el mapa es la representación de una sección donde se proyectan los sondeos.

Las correlaciones establecidas mediante diagráfias reflejan las propiedades litológicas y/o estratigráficas de las series sedimentarias, y también las cronoestratigráficas. Si las formaciones geológicas poseen una continuidad lateral suficiente, pueden indicar las proporciones que pueden llegar a tener una formación, y por tanto, se podrán inferir cambios en determinados parámetros en las mismas formaciones geológicas de los sondeos analizados con respecto a la profundidad. Al mismo tiempo, se puede definir la evolución lateral de las unidades y facies identificadas (Jurado, 1989). Se debe tener en cuenta que dentro de una misma cuenca pueden darse cambios laterales de facies; en estos casos o similares, se ha llevado a cabo una correlación cronoestratigráfica y no por registros geofísicos.

El registro que se ha utilizado para la correlación ha sido principalmente el registro de Radioactividad Gamma Natural (GR). Se han establecido correlaciones a partir de los valores más elevados de GR, y/o de niveles guía identificados y repetidos en los distintos sondeos.

Aunque el tiempo de tránsito de una formación obtenido a partir del registro sónico de onda completa no es muy preciso en términos litológicos, también resulta un buen registro para identificar intervalos estratigráficos específicos a pesar de las diferencias de profundidad, sobre todo en secuencias de grano fino, y además puede indicar pequeñas variaciones de textura y contenido en cuarzo y carbonato (Wyllie *et al.*, 1956).

Las asociaciones establecidas resultantes se han correlacionado con los datos disponibles a partir de los sondeos testificados, es decir, se ha establecido una analogía entre la estratigrafía, la edad de la formación rocosa y los estudios litológicos de los testigos.

2.6 Flujo de trabajo

El flujo de trabajo seguido en esta tesis se puede resumir en los siguientes puntos:

- Adquisición de datos en campo mediante un equipo de testificación geofísica formado por sondas de pequeño diámetro (*slim-hole*), en sondeos someros.
- Se han llevado a cabo correcciones comunes a todos los registros, además de correcciones específicas a determinados registros. A las imágenes tanto acústicas como ópticas de la pared del sondeo, se les ha aplicado un procesamiento específico para mejorar la calidad de la imagen.
- Se ha realizado un Análisis de Velocidad de los registros acústicos en los receptores de la sonda sónica de onda completa: se establece un proceso de correlación (*Proceso de Semblanza*) entre los registros de los receptores teniendo en cuenta la forma de onda y las amplitudes de la señal acústica. Se calcula con el fin de obtener un valor del retardo de las señales de acuerdo a un modelo matemático sólido y fiable. Se deduce la velocidad de las ondas P (V_p) y S (V_s) para cada uno de los registros. Las velocidades de ondas nos han proporcionado una estimación de las litologías presentes en los sondeos y su caracterización.
- Interpretación litológica de diagrfias en sondeos, mediante la utilización de varias técnicas:
 - Zonación de los registros y el uso de *Cross-plots*.

- Mediante estudios puntuales sobre muestras en lámina delgada al microscopio y análisis de muestras en polvo mediante Difracción de Rayos X (DRX). Si bien estos dos estudios no son 100% representativos del total del sondeo (debido al escaso número de muestras tomadas), sí han sido utilizadas como apoyo a la interpretación litológica y composicional de los materiales perforados en el sondeo. Se ha podido estudiar la textura, composición petrográfica y tipo de matriz a una profundidad determinada. Complementando a estas técnicas, la interpretación litológica se ha apoyado en la identificación de estructuras sedimentarias y fracturas a partir del registro óptico de imagen (OBI) y registro acústico de imagen (ABI).
- Interpretación y evaluación de parámetros petrofísicos necesarios para la caracterización de la formación sello y formación almacén en cada sondeo, mediante la utilización de diferentes fórmulas empíricas.
 - Se ha calculado el Índice de arcillosidad (Ish) a partir del registro GR tanto en sondeos someros como en los de petróleo. Para obtener el volumen de arcillas (Vsh) se aplicó la fórmula empírica de Larionov (1969). Este valor nos proporciona correcciones posteriores en la estimación de la porosidad.
 - Se ha estimado el valor de porosidad sónica (\emptyset_s) a partir del registro acústico de onda completa. Se han utilizado la ecuación empírica transformada de Raymer-Hunt-Gardner (1980). También se ha estimado la porosidad a partir del registro de densidad (\emptyset_d), y se ha utilizado la porosidad neutrón (\emptyset_n) en aquellos sondeos de petróleo donde se dispone de estas diagrfías. Complementariamente, se ha obtenido la porosidad a partir del estudio de muestras en lámina delgada, y de ensayos de laboratorio sobre muestras de testigos.
 - Los estudios de permeabilidad en las formaciones almacén se han llevado a cabo de dos formas:
 - Cualitativa, mediante el análisis de diagrfías: resistividad, potencial espontáneo, sónico de onda completa y registro acústico de imagen. La identificación de fracturas a partir de los registros de imagen óptica (OBI), y sobre todo acústica (ABI), ha permitido establecer qué tramos presentan una mayor frecuencia de fracturas, el carácter penetrativo o no de las mismas o su distribución, y en función de estas características y en comparación con el

registro sísmico de onda completa, dar una valoración de la existencia de y carácter de la permeabilidad (textural o por fracturas). Se ha utilizado también esta información para establecer zonas de debilitamiento estructural en la calidad de las formaciones confinantes. El perfil del *Caliper* mecánico (diámetro del sondeo) y su comparación con el diámetro de perforación, también ha servido como apoyo a la valoración de permeabilidad en los sondeos de petróleo.

- Cuantitativa, mediante ensayos de permeabilidad Lugeon y ensayos de conductividad hidráulica controlada en laboratorio.
 - Identificación de tramos permeables, mediante el estudio de la atenuación de la energía acústica en el registro sísmico de onda completa y la estimación del factor I_k -Seis.
- Correlación estratigráfica mediante diagramas, entre las formaciones geológicas de los sondeos someros y actuales testificados y los registros geofísicos en las formaciones de sondeos antiguos de hidrocarburos pertenecientes a la misma cuenca, o a cuencas contiguas, pero que presenten formaciones geológicas análogas a las de los sondeos actuales. Se han utilizado los valores paramétricos de diferentes registros, preferentemente el registro de radioactividad gamma natural (GR) y en ocasiones el perfil de velocidad de ondas P (V_p) y de potencial natural (SP). En otras ocasiones, cuando la distancia entre sondeos es demasiado grande, se ha tenido en cuenta la similitud de la tendencia de los perfiles, excluyendo, en la mayoría de casos, el parámetro de espesor regular entre las formaciones geológicas correlacionadas. Los resultados petrofísicos y litológicos obtenidos en las formaciones geológicas de los sondeos someros son comparados con las interpretaciones llevadas a cabo en las formaciones geológicas análogas profundas para entender mejor las variaciones producidas en dichas formaciones con la profundidad.

En la Figura 2.14 se puede ver de forma resumida el flujo de trabajo en esta tesis.

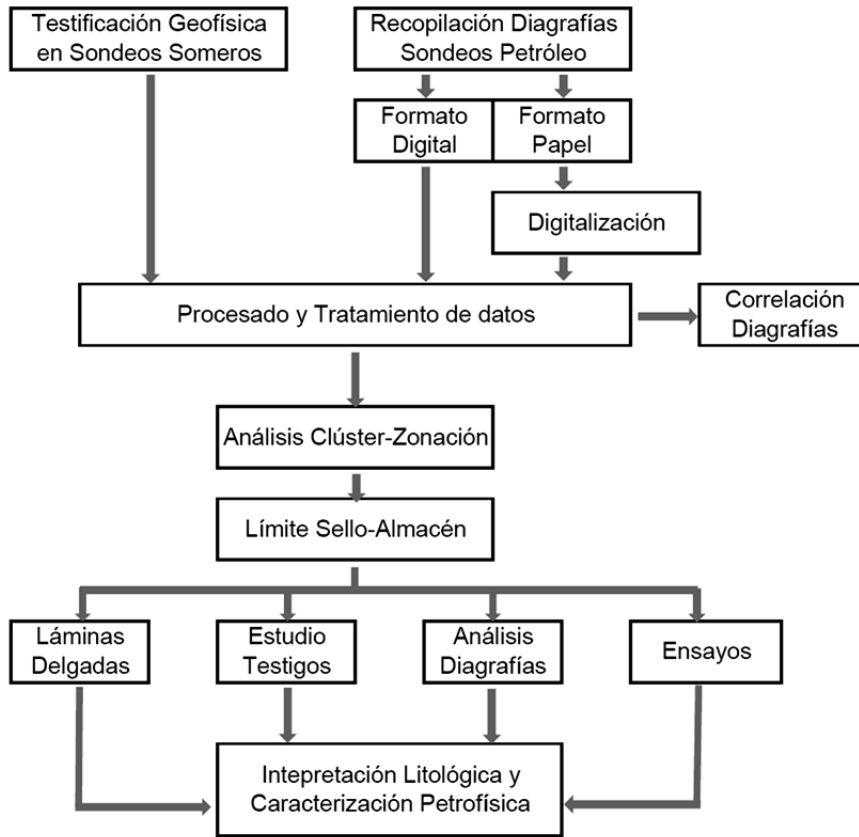


Figura 2. 14. Flujo de trabajo básico desarrollado en esta tesis.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO Y CORRELACION ESTRATIGRÁFICA

Se expone en este capítulo el contexto geológico de las formaciones estudiadas en esta tesis, que se sitúan dentro de la Península Ibérica, y abarcan diferentes dominios geológicos: en la Zona Septentrional Oriental, la Cordillera Costero-Catalana (sondeo SE-4) y la Cuenca mesozoica pirenaica (sondeo SE-3); en la Zona Meridional, las Cuencas neógenas béticas (sondeo SB-4); y en la Zona Centro-Levante, la Cobertera Tabular (sondeo SB-1). Además, se detalla la correlación estratigráfica, llevada a cabo mediante diagráfias, entre las formaciones geológicas de los sondeos someros y sus análogas en los sondeos próximos de petróleo.

3.1 Formaciones almacén carbonatadas y sus formaciones confinantes

Los sondeos estudiados que atravesaron facies carbonatadas como posibles formaciones almacén son los sondeos SE-4 (Arbolí) y SB-4 (Bacarot). Los dos sondeos presentan como formación confinante una geología compuesta por margas y arcillas fundamentalmente.

3.1.1 Sondeo SE-4. Facies Muschelkalk inferior y Facies Muschelkalk medio

Geográficamente, el sondeo SE-4 se encuentra en el municipio de Arbolí (provincia de Tarragona), en la comarca del Baix Camp. Sus coordenadas geográficas son: Latitud = 41°14'32.95" N y Longitud = 0°57'5.91" E.

Desde un punto de vista geológico, el sondeo SE-4 está incluido en el Dominio Priorat - Baix Ebre – Prades (Catalánides o Cordillera Costero Catalana).

La Cordillera Costero Catalana la forman los relieves que se extienden paralelamente a la costa catalana, comprendidos entre el Empordà y la parte oriental de la Cordillera Ibérica (Hernández Pacheco, 1934). La Cuenca del Ebro la limita por el NO y el Mediterráneo por el E. Se trata de una estructura alpina que tiene un basamento varisco formado por granitos (continuación del Macizo Ibérico), una potente capa de sedimentos del Pérmico y Triásico inferior-medio, y una cobertera Triásica superior (facies Keuper que actúan como nivel de despegue), Jurásico y Cretácico (Vera *et al.*, 2004).

La Unidad del Priorat incluye el bloque de Prades, las sierras de Cavalls y de Pàndols y la depresión de Móra. El bloque de Prades a su vez, está constituido por el zócalo varisco sobre el que se encuentra una fina cobertera subhorizontal triásica, liásica y cretácica superior.

El Triásico de la Península Ibérica está descrito detalladamente en López et al., (2002). Localmente, el Muschelkalk en esta región ha sido ampliamente descrito en los trabajos de Virgili (1958), Anadón et al. (1985a), Marzo & Calvet (1985) y Calvet & Ramón (1987). El Triásico Mediterráneo aflora en el área central y SE de la Cordillera Ibérica, en la Cordillera Costero-Catalana, al E de la cuenca del Ebro, y en diversas secciones de los Pirineos meridionales. Se caracteriza por presentar dos niveles carbonatados transgresivos-regresivos marinos (facies Muschelkalk inferior o M1 y facies Muschelkalk superior o M3), separados por una intercalación de depósitos detrítico-evaporíticos de origen fluvial y supralitoral, equivalentes a la facies Keuper, y denominada Muschelkalk medio (M2).

Robles (1974) describe los depósitos carbonatados del Muschelkalk inferior como formados en ambientes de plataformas costeras de fangos evaporíticos, márgenes bioturbados, ocasionalmente con barras calcareníticas bien clasificadas y pequeñas bioturbaciones a base de organismos incrustantes. Castelltort (1986) los describe como correspondiente a depósitos de playa-lake o *sabkhas*. Sedimentológicamente, el Muschelkalk inferior muestra una importante uniformidad en facies y potencia, y es frecuente la dolomitización, que suele adquirir un carácter irregular, siendo más frecuente en la parte superior de la serie. Lo más característico petrográficamente es el tamaño micro-criptocristalino de sus constituyentes (micrita y dolomicrita). El tránsito del Muschelkalk inferior al Muschelkalk medio es brusco, marcando un periodo regresivo en el que se depositan materiales claramente lagunares, con la presencia de grandes masas de yeso.

Según los autores anteriores, la facies M2 está formada fundamentalmente por arcillas rojas con intercalaciones de arenisca arcillosa, con inclusiones de yesos y anhidritas en ocasiones predominantes.

El sondeo SE-4 atraviesa materiales del Triásico medio; de base a techo, la Facies Muschelkalk inferior (M1), que ha sido identificada por el IGME como la formación almacén, y la Facies Muschelkalk medio (M2), identificada como la formación sello (IGME, 2009).

3.1.1.1 Correlación estratigráfica mediante diagrfías entre los sondeos SE-4 y Reus-1.

La correlación estratigráfica mediante diagrfías ha relacionado las facies M1 y M2 del sondeo SE-4 con las análogas del sondeo antiguo y profundo de petróleo Reus-1, localizado a 18.5 km de aquel, a través de la Cordillera Costero Catalana en dirección NO-SE (Figura 3.1).

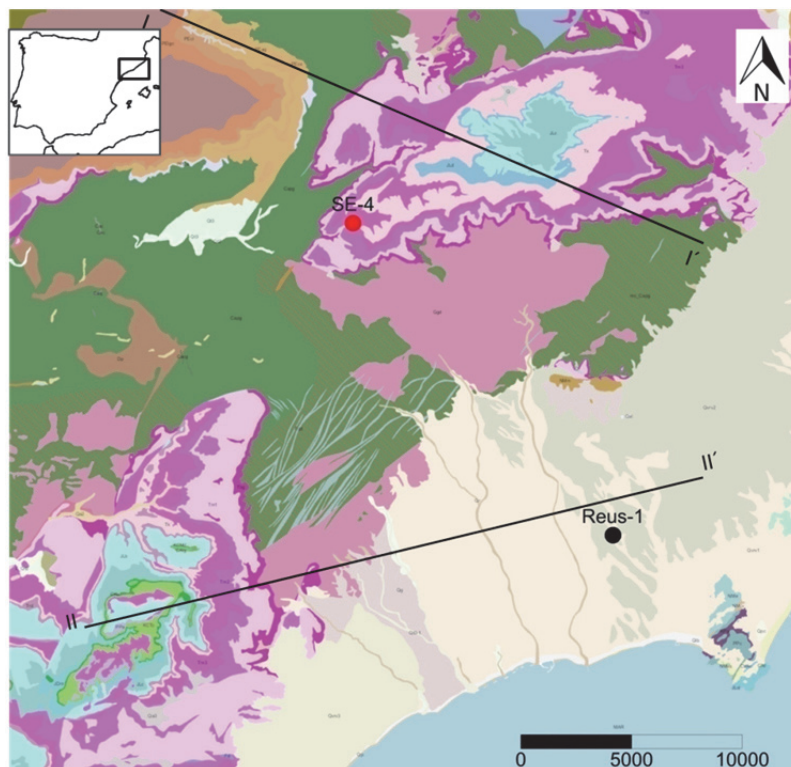


Figura 3. 1. Localización geológica de los sondeos SE-4 y Reus-1. Escala 1:50000. Se indican los dos cortes geológicos I-I' y II-II' (mostrados en detalle en la Figura 3.2). Leyenda litológica en Figura 3.2. Fuente mapa: ICGC.

Las coordenadas geográficas del sondeo Reus-1, localizado también en la provincia de Tarragona (Riudoms), son: Latitud = 41°06'57.66" N, Longitud = 1°5'39.43" E. Se sitúa dentro del mismo dominio de la Cordillera Costero Catalana, concretamente en la Unidad de Camp. Fue ejecutado por la empresa SONPETROL, en 1976, y su perforación alcanzó una profundidad total de 2228 m (hasta el techo de la facies *Buntsandstein*). El sondeo Reus-1 se perforó a 74.2 m de cota topográfica y el origen de los registros (Z_{nr}) se situó a 79.26 m. Según el informe de la perforación, el objetivo fue estudiar el Jurásico, bajo la discordancia de base del Mioceno.

La Figura 3.2 muestra los dos cortes geológicos marcados en la Figura 3.1, I-I' y II-II', cuyas direcciones son NW-SE y W-E respectivamente, así como las posiciones en proyección de los sondeos SE-4 y Reus-1. Se puede apreciar la disposición de las capas triásicas en detalle, así como la morfología detallada de la Depresión de Reus-Valls.

Las unidades cronoestratigráficas atravesadas en el sondeo Reus-1, según datos disponibles de parte del informe de perforación, fueron las siguientes (se indica un resumen de la información estratigráfica disponible en dicho informe):

Superficie – 300 m = Plio-Cuaternario (gravas, arenas y arcillas)

300 – 1366 m = Mioceno medio – superior (margas siltsosas con intercalaciones de arenas)

1366 – 1432 m = Oligoceno – Mioceno (arcillas rojas)

1432 – 1693 m = Jurásico (dolomías, karstificadas en la parte superior)

1693 – 2228 m = Triásico, donde:

1693 - 1835 m = Keuper (arcillas rojas y anhidrita)

1835 - 2035 m = Muschelkalk M3 (dolomías, margas y calizas)

2035 - 2110 m = Muschelkalk M2 (arcillas rojas y anhidrita)

2110 - 2191 m = Muschelkalk M1 (dolomía y caliza margosa)

2191 – 2228 m = Buntsandstein (arcillas rojas y anhidrita)

La correlación entre ambos sondeos, observada en la Figura 3.3, se ha realizado utilizando los registros de Radioactividad Gamma natural (GR), además de la ayuda extraída a partir de la descripción estratigráfica de los sondeos, proporcionada por el IGME y por la empresa perforadora. Las diagráfias permiten mostrar, de manera más precisa, los tramos en ambos sondeos que proporcionan la mayor correlación. A partir de los registros GR se han reconocido tendencias muy similares en ambos perfiles, tal como se aprecia en la Figura 3.3. En este sentido, la información geofísica adquirida en esta tesis ha sido fundamental para poder identificar en el sondeo profundo Reus-1 las formaciones geológicas análogas del sondeo SE-4, ya que solo con la descripción litológica del sondeo de petróleo disponible y las unidades cronoestratigráficas proporcionadas, no hubiera sido suficiente información para establecer una correlación precisa entre las formaciones geológicas de ambos sondeos.

El tramo desde los 11 m hasta el final del sondeo SE-4 (105 m) se ha correlacionado con el tramo comprendido entre los 2039 y los 2150 m de profundidad en el sondeo Reus-1. En la Figura 3.3 se aprecia la totalidad del Triásico medio en el sondeo de petróleo. En base a esta correlación, se establece el límite Muschelkalk M2 – Muschelkalk M1 a los 2110 m de profundidad en el sondeo Reus-1, observándose a partir de esa profundidad, un descenso notable del registro GR con respecto a los valores mostrados hasta entonces.

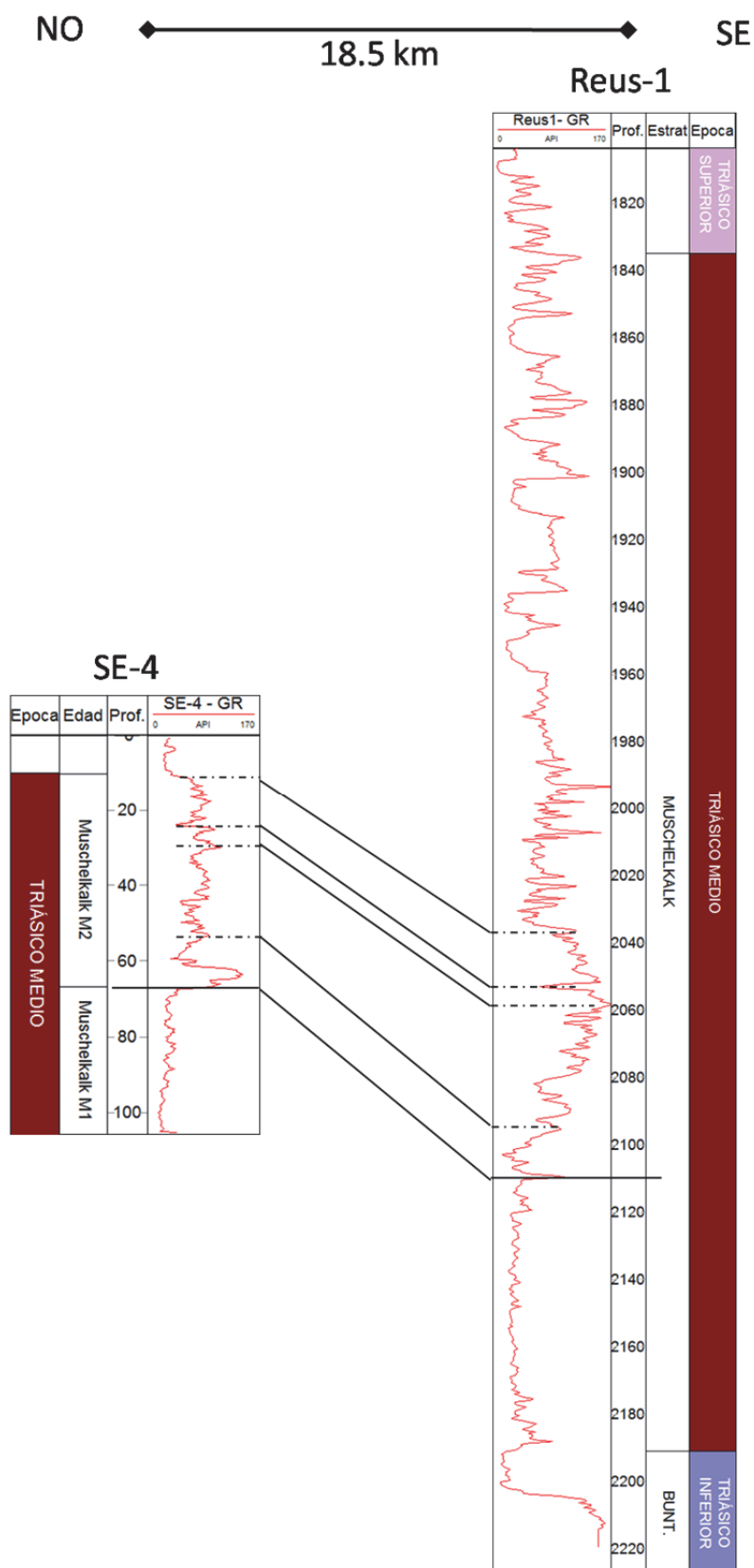


Figura 3. 3. Correlación entre los registros GR pertenecientes a los sondeos SE-4 y Reus-1. La escala vertical es la misma para ambos sondeos. No están a escala horizontal. La profundidad viene dada en metros.

3.1.2 Sondeo SB-4. Formación Las Ventanas y Formación Torremendo

Geográficamente, el sondeo SB-4 se encuentra en el pueblo de Torrellano, perteneciente a la provincia de Alicante. Las coordenadas del sondeo son Longitud = 38°18'45" N y Latitud = 0°35'27.54" O.

Geológica y estructuralmente, se localiza en la Cordillera Bética, y dentro de ésta, en el margen norte de la Cuenca del Bajo Segura (Alfaro, 1995), cuyos rasgos tectónicos y estratigráficos han sido descritos por Montenat et al., (1990) y Alfaro (1995). La Cuenca del Bajo Segura se encuentra en el extremo oriental de la Cordillera Bética (Figura 3.4), y forma parte del conjunto de las denominadas Cuencas Neógeno-Cuaternarias Postorogénicas de la Cordillera Bética (Viseras et al., 2004).

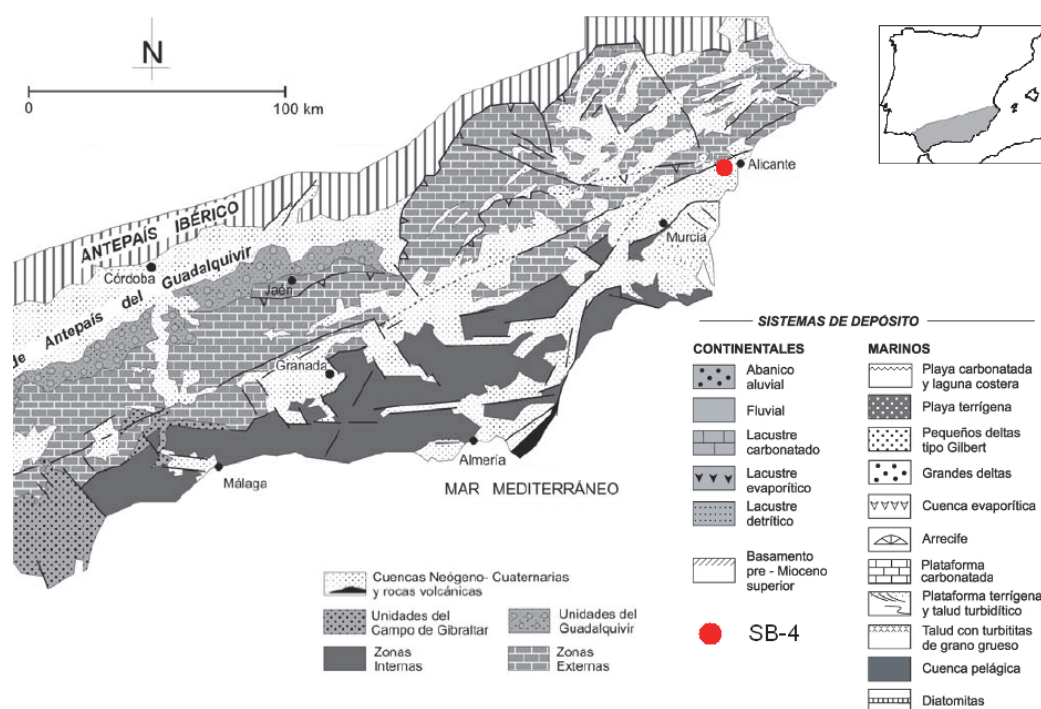


Figura 3. 4. Esquema geológico de los dominios principales de la Cordillera Bética y localización del sondeo SB-4 en la Cuenca del Bajo Segura (modificado de Vera, 2004).

La Cordillera Bética forma, junto con el Rif del norte de África, la parte final occidental de las cadenas Alpinas que rodean el Mediterráneo por ese extremo. Está constituida por dos dominios geológicos principales; las Zonas Internas y las Zonas Externas, además de las Unidades Flysch de Gibraltar y las cuencas neógenas post-orogénicas.

Cada uno de estos dominios se pueden se pueden definir de forma muy resumida de la siguiente forma:

Las Zonas Internas constituyen un fragmento alóctono litosférico formado por rocas metamórficas de edad Paleozoica y Triásica.

Las Zonas Externas representan el antiguo paleomargen localizado al sur del Antepaís Ibérico (Comas & García, 1988), y están formadas básicamente por rocas sedimentarias de edad Mesozoica.

Los materiales que forman la Cuenca del Bajo Segura, proceden de materiales de cuencas previas formadas por materiales del Mioceno inferior y medio, aflorando en el sector norte y en el sector sur. La cuenca, de origen marino, presenta una amplia variedad de facies (Montenat *et al.*, 1990), que están relacionadas con cambios eustáticos de inundación y somerización (Martínez del Olmo *et al.*, 1991). Estratigráficamente, ha sido bien definida por numerosos autores (Montenat *et al.*, 1990; Tent-Manclús, 2003; Soria *et al.* 2005, 2008 a y b; Corbí, 2010). El trabajo de Corbí (2010), basado en el estudio de foraminíferos planctónicos en el Mioceno superior y Plioceno de la Cuenca del Bajo Segura, hace una división en cinco unidades aloestratigráficas, limitadas por discontinuidades mayores. Estas unidades se muestran representadas en los afloramientos del sector norte y del sector sur de la Cuenca.

El nivel geológico de partida en el sondeo SB-4 es el Mioceno, concretamente el Tortoniense superior. El sondeo atraviesa, de muro a techo, primeramente la unidad litológica de Las Calizas de Las Ventanas (Tent-Manclús, 2003), también denominada en este trabajo, Fm. Calizas de Algas. Es la considerada por el IGME como la potencial formación reservorio de CO₂. Por encima, se ha cortado la Formación Torremendo (Montenat, 1977), de edad Messiniense – Tortoniense superior, constituida en general por margas marinas profundas ricas en organismos planctónicos (Soria *et al.*, 2008). Localmente se la denomina Margas del TAP, y ha sido considerada por el IGME como la formación sello.

3.1.2.1 Correlación estratigráfica entre los sondeos SB-4 y Benejúzar-1

Los sondeos profundos disponibles en la cuenca para poder establecer una correlación estratigráfica entre las formaciones que se han cortado en el sondeo somero SB-4, son los localizados en el sector sur de la Cuenca, Benejúzar-1, S. Miguel de Salinas-1, S. Miguel de Salinas-2 y La Mata-1. Después de analizar y comparar los registros de GR de dichos sondeos, no se ha podido identificar ninguna correlación posible con las unidades del sondeo somero SB-4. Corbí (2010), identificó la Formación Pujálvarez, presente en el sondeo Benejúzar-1, como la formación equivalente a la Formación Las Ventanas en el sector norte, y por tanto, en esta tesis, se ha establecido una correlación cronoestratigráfica con dicha formación. En el sector sur, la Fm. Pujálvarez presenta, en general, un mayor contenido margoso y una mayor heterogeneidad de litologías que en el sector norte, fruto de la diferente evolución litológica que ha sufrido la cuenca en sus diferentes sectores.

En la Figura 3.5, se observa la localización, sobre mapa geológico, del sondeo somero SB-4 y de Benejúzar-1, y una serie estratigráfica perteneciente a la zona del Bajo Segura (modificado de Vera, 2004).

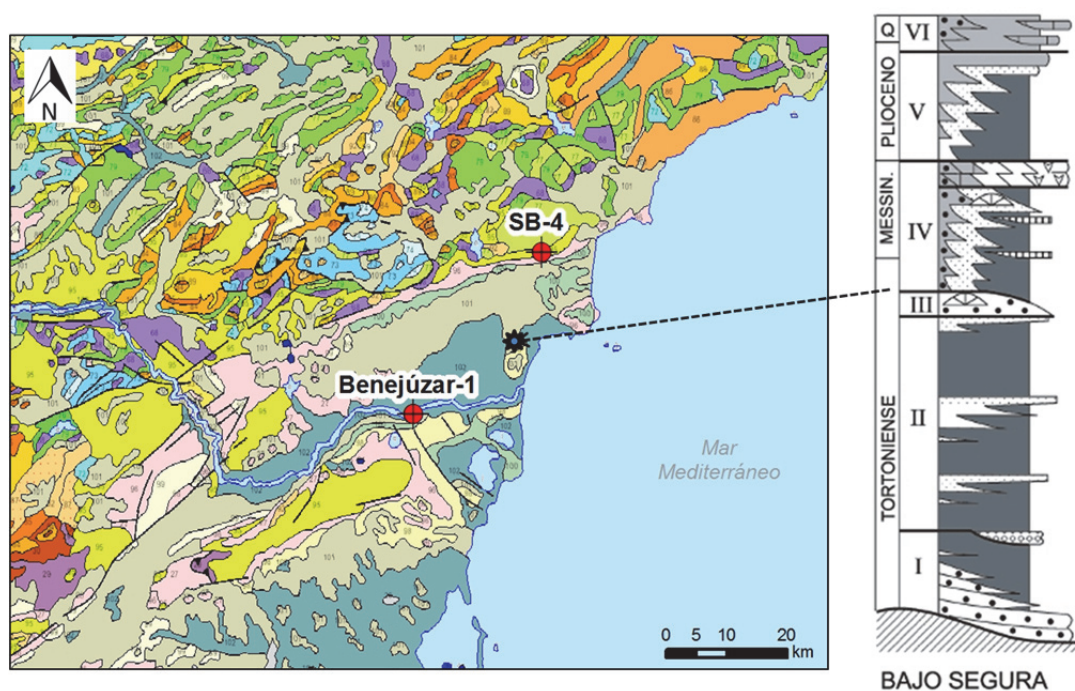


Figura 3. 5. Representación sobre mapa geológico de la ubicación del sondeo somero SB-4 y el sondeo profundo de petróleo Benejúzar-1 en la Cuenca del Bajo Segura. Serie estratigráfica correspondiente a la zona del Bajo Segura (modificado de Vera, 2004). Escala 1:100000. Leyenda litológica en Figura 3.6.

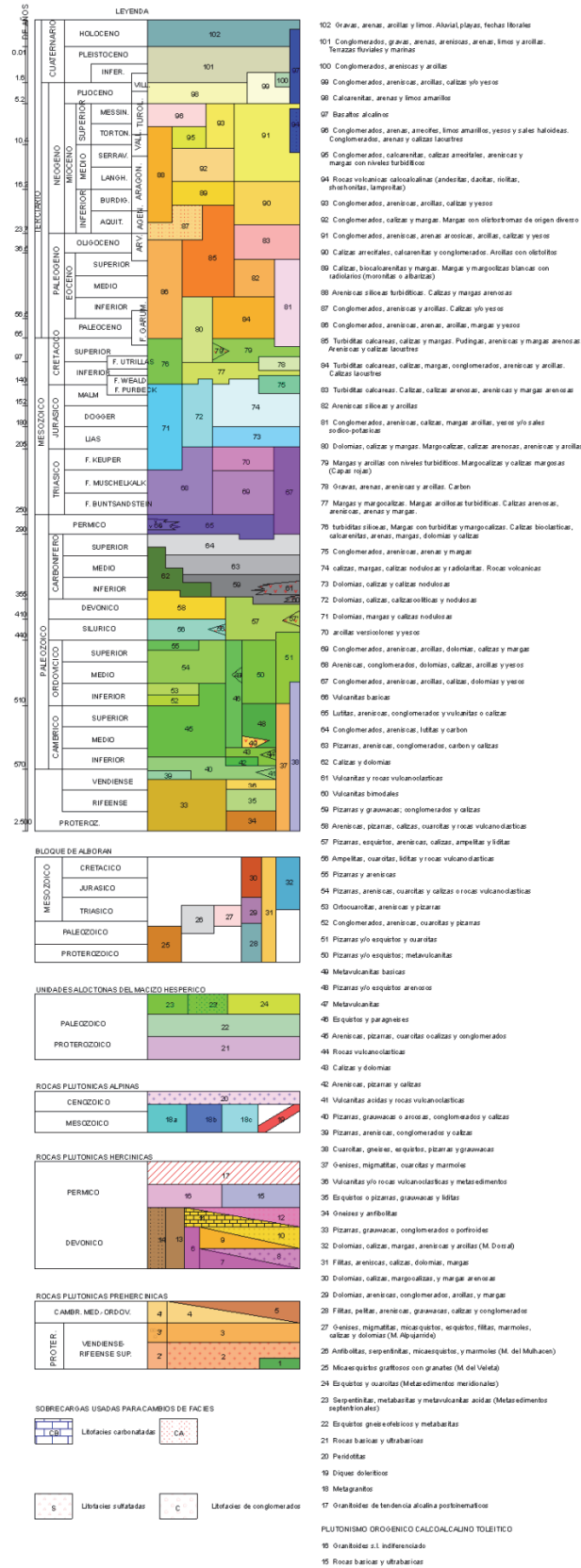


Figura 3. 6. Leyenda litológica del mapa de la Figura 3.5 y de la Figura 3.15 (Vera, 2004).

El sondeo Benejúzar-1 (Latitud= 38° 03' 32" N, Longitud = 2° 52' 03" E) fue perforado en el 1968. Se encuentra a 34.2 km de distancia del sondeo SB-4 en dirección SO. El valor de la cota topográfica a la que se encuentra este sondeo es de 110 m aproximadamente, aunque el origen de las profundidades de los registros realizados (Z_{nr}) en él se situó a 113 m. La profundidad de perforación alcanzó los 1648.5 m, aunque solo se dispone de diagráfias hasta los 1570 m. Las unidades cronoestratigráficas atravesadas fueron:

Superficie – 450 m: Mioceno (Messiniense)

450 – 1499 m: Mioceno (Tortonense)

1499 – 1648.5 m: Triásico

La Formación Torremendo se localiza en el sondeo Benejúzar-1 entre los 83 y 608 m de profundidad (Messiniense – Tortonense superior), y la Formación Pujálvarez, entre los 608 y los 916 m (Tortonense superior). A continuación se incluye un resumen de la serie litoestratigráfica en estas formaciones según el informe técnico de la empresa perforadora:

83 – 118 m: marga plástica gris claro, con pasadas arcilloso-arenosas esporádicas.

118 – 220 m: alternancia de margas plásticas y areniscas finas de cemento calizo-arcilloso.

220 – 462 m: marga plástica gris claro a gris azul. A partir de los 451 m, con pasadas de arenisca fina gris de cemento arcilloso.

462 – 577 m: marga gris con pasadas de arena fina de cemento calizo-arcilloso, más abundantes hacia la base del intervalo.

577 – 596 m: alternancia de marga gris plástica, a veces siltosa, y arenisca fina gris de cemento calizo-arcilloso.

596 – 625 m: arenisca fina, dura, de cemento calizo-arcilloso con algunas pasadas de marga, plástica y posibles restos ligníficos.

625 – 654 m: arenisca fina, dura, de cemento calizo-arcilloso. Localmente algunas pasadas margosas. Presencia de calcita y pirita.

654 – 916 m: alternancia de marga gris con arenisca fina, con cemento calizo-arcilloso. La arenisca es localmente micácea y microconglomerática. Esporádicas pasadas de conglomerados, más abundantes hacia la base, y con presencia de elementos de cuarcita, arcillita, caliza microcristalina y cuarzo.

La correlación llevada a cabo entre el sondeo somero SB-4 y el sondeo profundo Benejúzar-1 se puede observar en la Figura 3.7. Como se trata de una correlación cronoestratigráfica, y no se han podido establecer niveles exactos de correlación estratigráfica, en el sondeo Benejúzar-1 se tomará como tramo a interpretar la Fm. Torremendo en general, a partir de los 330 m y hasta el límite inferior, a los 608 m. Por otra parte, tomando como formaciones equivalentes la Fm. Calizas de las Ventanas y la Fm. Pujálvarez, se llevará a cabo la interpretación de toda la Fm. Pujálvarez, es decir, desde los 608 hasta los 916 m de profundidad.

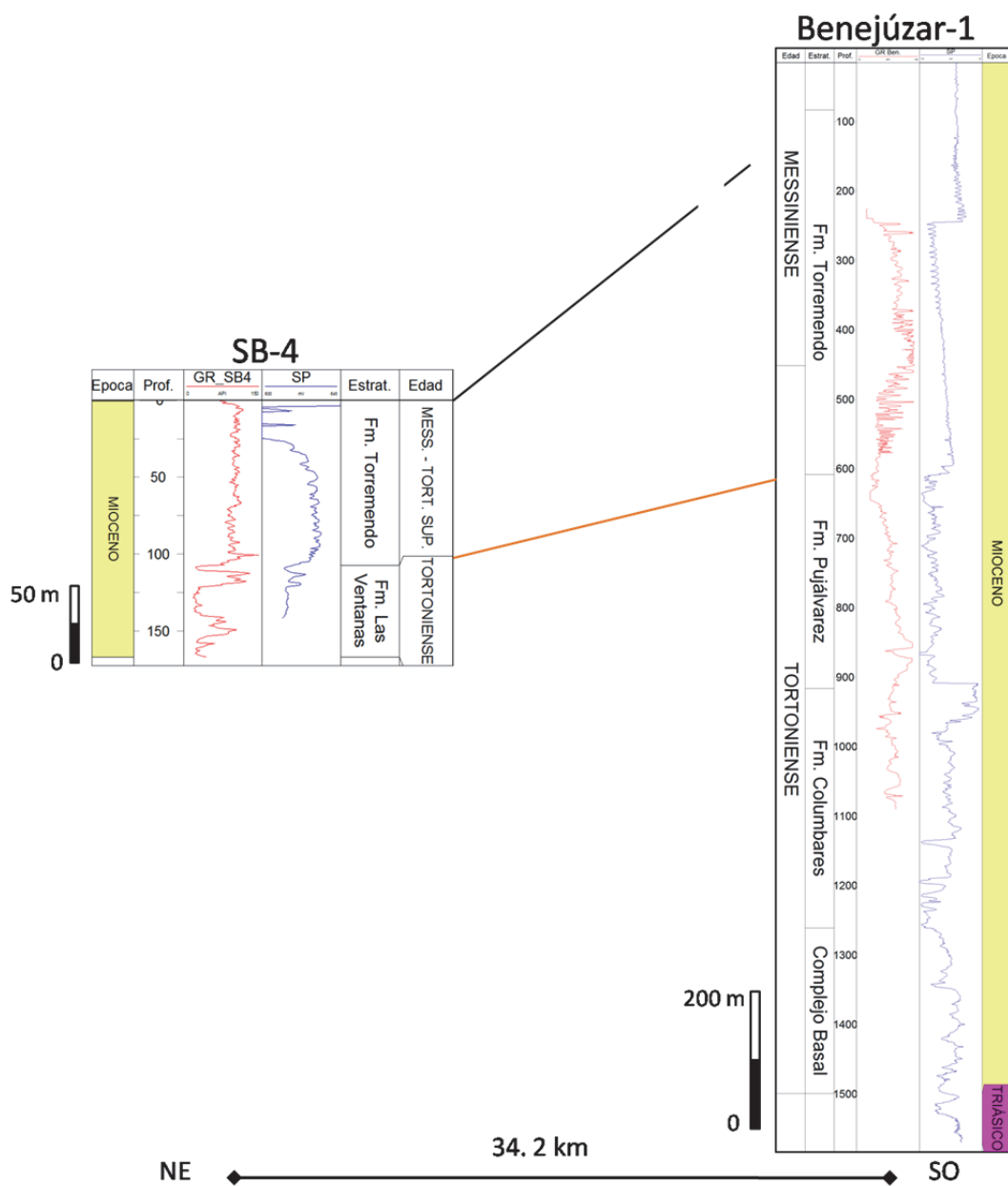


Figura 3. 7. Correlación cronoestratigráfica entre los sondeos SB-4 y Benejúzar-1. La línea naranja (—) indica el límite entre la Fm. Torremendo y la Fm. Las Ventanas en SB-4, y la Fm. Torremendo y Fm. Pujálvarez en el sondeo de petróleo. Los registros presentan diferente escala vertical (indicada en el dibujo), y no están a escala horizontal. La profundidad de los sondeos viene dada en metros.

3.2 Formaciones almacén detríticas y sus formaciones confinantes

Los sondeos estudiados que atravesaron facies detríticas como posibles formaciones almacén son los sondeos SE-3 (Orrit) y SB-1 (Alcaraz). Los dos sondeos presentan como formación confinante una geología compuesta por arcillas, lutitas y margas.

3.2.1 Sondeo SE-3. Formación Areniscas de Arén, y Formación Tresp (Garum) y Formación Posa

Geográficamente el sondeo SE-3 se encuentra en el municipio de Tresp, en la provincia de Lleida. Sus coordenadas son Latitud = 42°15'16.69" N y Longitud = 0°44'46.58" E.

Geológica y estructuralmente, el sondeo está localizado en la Cordillera Pirenaica, en el flanco norte de la Cuencade Tresp-Graus, dentro de la Unidad Surpirenaica Central. En las futuras clasificaciones se sigue la delimitación clásica actualizada definida por Mattauer (1968). De norte a sur se definen tres zonas en la Cordillera Pirenaica: Zona Norpirenaica, Zona Axial y Macizos Vascos y finalmente, Zona Surpirenaica. A esta zonación se le añaden los antepaíses plegados en una y otra vertiente (Vera, 2004).

La Zona Surpirenaica está comprendida entre la estructura del Segre y los afloramientos mesozoicos y cenozoicos que constituyen su límite occidental, en el Valle del Cinca o alineación del Cinca. Está formada por la Zona de las Nogueres y por la Unidad Surpirenaica Central (Séguret, 1972). Las Sierras Marginales constituyen la lámina inferior y más meridional de la Unidad Surpirenaica Central. Los materiales geológicos que conforman la Zona Surpirenaica son materiales post-variscos que forman la cobertera de la Zona Axial, además de fragmentos incorporados del basamento varisco (Cámara & Klimowitz, 1985).

La variación estratigráfica y estructural de Este a Oeste de la Zona Surpirenaica, da como resultado la distinción de dos sectores: el Sector de Jaca-Pamplona a la izquierda, y el Sector de Tresp-Graus más a la derecha (Figura 3.8).

El Sector de Tresp-Graus se caracteriza por presentar potentes series mesozoicas y poca deformación interna de los mantos de corrimiento, que se hallan despegados de forma generalizada en el Triásico Evaporítico (Séguret, 1972; Garrido-Megías & Rios, 1972; Cámara & Klimowitz, 1985; Muñoz, 1992). Se sitúa directamente al sur de la Zona Axial, y lo integran el Cabalgamiento de Bóixols, el Cabalgamiento de Montsec y las Sierras Marginales.

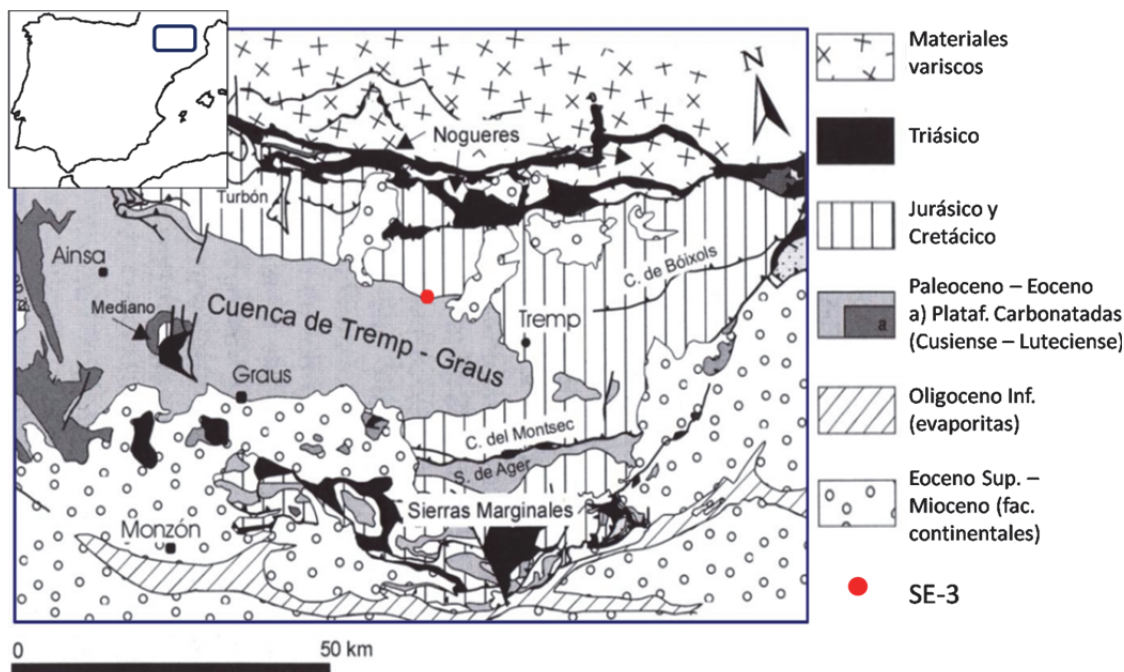


Figura 3. 8. Localización del sondeo SE-3 en un mapa geológico ampliado de la Unidad Surpirenaica Central, y una parte de la vertiente surpirenaica occidental (modificado de Teixell, 1992).

El Manto del Montsec presenta una estructura sinclinal de eje Este – Oeste que es la que constituye la Cuenca de Tremp-Graus (Cuevas, 1992), y un anticlinal frontal. Los materiales de los flancos de la cuenca son de edad cretácica y paleocena, y el relleno de la misma lo constituyen materiales del Eoceno.

La estratigrafía de la Unidad del Montsec consiste en un Triásico que constituye la unidad de despegue del cabalgamiento, un fino Jurásico bajo el Cretácico superior – Paleoceno en la facies Garum, un Eoceno inferior y medio (la Cuenca de Tremp-Graus) y los conglomerados del Eoceno superior – Oligoceno en el contacto con la Unidad de Boixols (Vera, 2004) (Figura 3.8).

El Campaniense superior – Maastrichtiense, perteneciente al Cretácico superior, simboliza el inicio de la inversión tectónica de la cuenca y de la sedimentación clástica, así como de un cambio en la sedimentación en la plataforma, que pasa de ser carbonatada a siliciclástica. La formación más conocida de esta megasecuencia es la de Areniscas de Arén, que separa las facies arcillosas marinas de las facies no marinas (Garum) (Vera, 2004). Los carbonatos de las plataformas marinas someras desarrolladas durante el Paleoceno e Ilerdiense inferior, y las inferiores del Maastrichtiense superior, se intercalan hacia el continente con depósitos continentales o transicionales, denominados “Garum” o “facies Garumniense” (Leymerie, 1863; Rosell *et al.*, 2001), o englobados en el Grupo Tremp por Cuevas (1992). El Grupo Tremp es una unidad constituida por depósitos aluviales (lutitas, areniscas y conglomerados) con intercalaciones lacustre-palustres (carbonatos, carbones y yesos) y de ambientes litorales. Las

series litorales y deltaicas de la Formación Areniscas de Arén presentan carácter progradante (Ardèvol *et al.*, 2000).

El nivel geológico de partida en la perforación del sondeo SE-3 ha sido el Cretácico superior - Paleoceno, donde el IGME ha identificado la facies Garum (Fm. Tremp) junto con la Formación Posa como la zona confinante. La formación confinante en el sondeo SE-3 presenta un espesor de 122 m aproximadamente. Está constituida por lutitas con alguna intercalación de arenisca, y un paquete carbonatado al final del tramo, de espesor aproximado de 3 metros que constituiría la Formación Posa. Las facies continentales Garum muestran cambios de potencia con estructuras en forma de sinclinales y anticlinales, siendo las facies más comunes arcillas rojas con niveles de arenas fluviales, calizas lacustres y evaporitas (Vera, 2004).

Por debajo de la facies Garum, continuando hasta el Maastrichtiense (Cretácico superior), el IGME ha identificado la Formación Arenisca de Arén como la zona almacén (IGME 2009). Dicha formación está constituida principalmente por areniscas calcáreas, y presenta un espesor en el sondeo SE-3 de 27 m. Las Areniscas de Arén representan ambientes de dunas eólicas, playa, plataforma proximal y distal, y de cañón turbidítico (Ardèvol *et al.*, 2000), aunque la base de la sucesión suele ser muy diferente de un ambiente a otro.

3.2.1.1 Correlación estratigráfica mediante diagráfias entre el sondeo SE-3 y los sondeos Cajigar-1 y Monesma-1

Los sondeos próximos correlacionados con el sondeo SE-3 han sido los sondeos antiguos y profundos de petróleo Cajigar-1 y Monesma-1, ambos localizados en la provincia de Huesca. Fueron perforados en 1976 y 1960 respectivamente.

El sondeo Cajigar-1 tiene como coordenadas: Latitud = 42°16'08" N, Longitud = 0°36'56" E. Se encuentra a una cota topográfica de 1150 m, con una cota Znr de 1154 m. Se encuentra a 10.9 km de distancia del sondeo SE-3 en dirección Oeste. El sondeo alcanzó una profundidad total de perforación de 3881.5 m. Atraviesa, según datos proporcionados por el IGME, depósitos Cenozoicos, Cretácicos y Mesozoicos, concretamente Eoceno (Bartoniense – Ilerdiense), Paleoceno (Facies Garumniense), Cretácico superior (Maastrichtiense – Cenomaniense) y Jurásico (Malm – Lias). El objetivo de la perforación de dicho sondeo, según informe de la empresa contratista (Compañía General de Sondeos), fueron las calizas arenosas del Cretácico superior y las dolomías del Jurásico superior.

El sondeo Monesma-1 cuya cota es 1126 msnm, se encuentra a 14.7 km de distancia de SE-3 en dirección OSO, y a 4.7 km de distancia en dirección SO del sondeo Cajigar-1 (Figura 3.9). Sus coordenadas son: Latitud = 42°14'42"N y Longitud = 0°34'4.5"E. El sondeo alcanzó una profundidad total de perforación de 4750 m, atravesando depósitos desde el Cenozoico hasta

el Triásico. Según el informe de la empresa contratista (DeGolyer & McNaughton, 1960) el objetivo principal de la perforación fueron las calizas del Eoceno y areniscas del Cretácico superior; seguidamente las calizas del Turoniense o Cenomaniense o de las formaciones del Cretácico inferior.

La información litológica disponible en los informes técnicos ha sido utilizada a modo de referencia en la interpretación litológica final, debido a la escasa información de diagráfias disponible. Dicha interpretación litológica ha sido ligeramente modificada y completada a un mayor nivel de detalle de lo que se disponía con las diagráfias iniciales.

En la Figura 3.9 se puede ver la localización geológica de los tres sondeos estudiados.

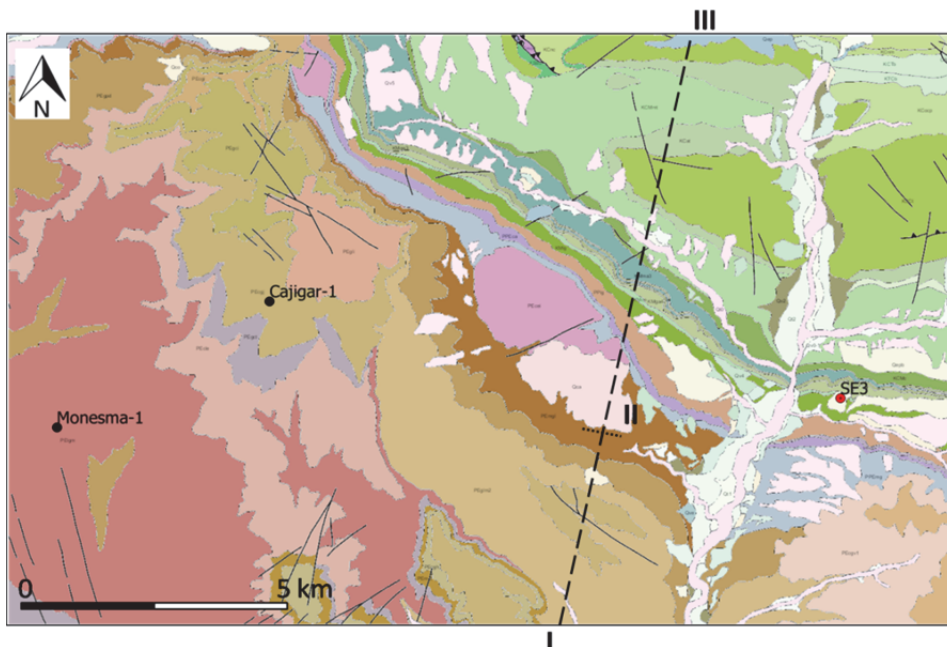


Figura 3. 9. Localización geológica de los tres sondeos correlacionados entre sí: SE-3, Cajigar-1 y Monesma-1., y corte geológico I-II-III. Escala 1:50000. Leyenda litológica en Figura 3.10. Fuente mapa: ICGC.

En la Figura 3.10, se puede ver el corte geológico I-II-III indicado en la Figura 3.9 en dirección S – N aproximadamente. Se observa como los materiales del Paleógeno se disponen de forma paralela a los materiales cretácicos (colores verde-azules).

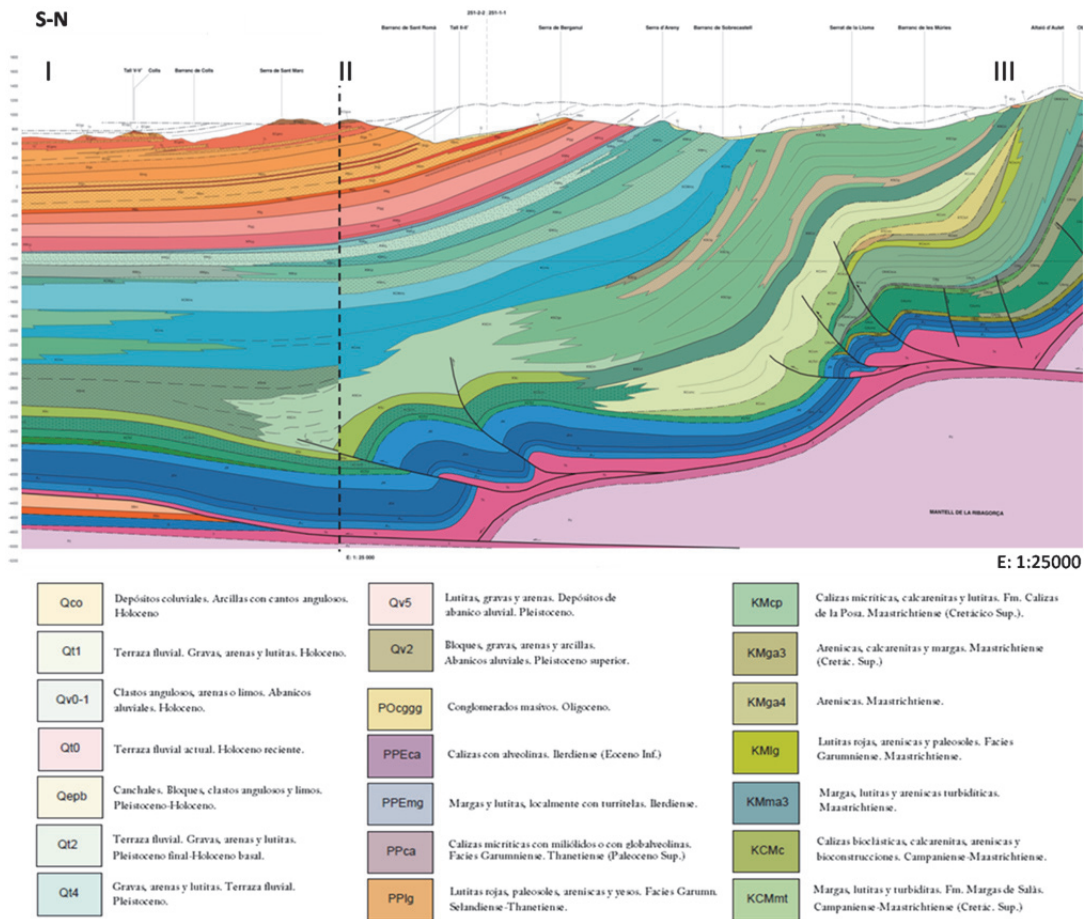


Figura 3. 10. Cortes geológicos realizados en dirección S-N (I-II-III), mostrados en la Figura 3.9. Escala 1:25000.

Fuente: ICGC.

La correlación estratigráfica con diagráfias entre los tres sondeos se ha llevado a cabo a través de la Zona Surpirenaica (Capítulos 6.1.2, 6.1.3 y 6.1.4), utilizando los registros de Radioactividad Gamma Natural y el registro Sónico, proporcionados por la empresa perforadora. El resultado se puede observar en la Figura 3.11.

A partir de las tendencias de las curvas de GR y registro sónico, la facies Garum del sondeo SE-3 se ha correlacionado con el tramo 1181 - 1278 m de profundidad aproximadamente del sondeo Cajijgar-1 (Figura 3.11). A su vez, dicha sección de la facies Garum del sondeo Cajijgar-1 se ha podido correlacionar con el tramo de profundidad comprendido entre los 992 y los 1180 m de la facies Garum perteneciente al sondeo Monesma-1. Para la Formación Areniscas de Arén, se ha podido establecer la correlación mediante diagráfias entre el tramo 134 – 144 m del sondeo SE-3 y el tramo 1278 – 1288 m del sondeo Cajijgar-1.

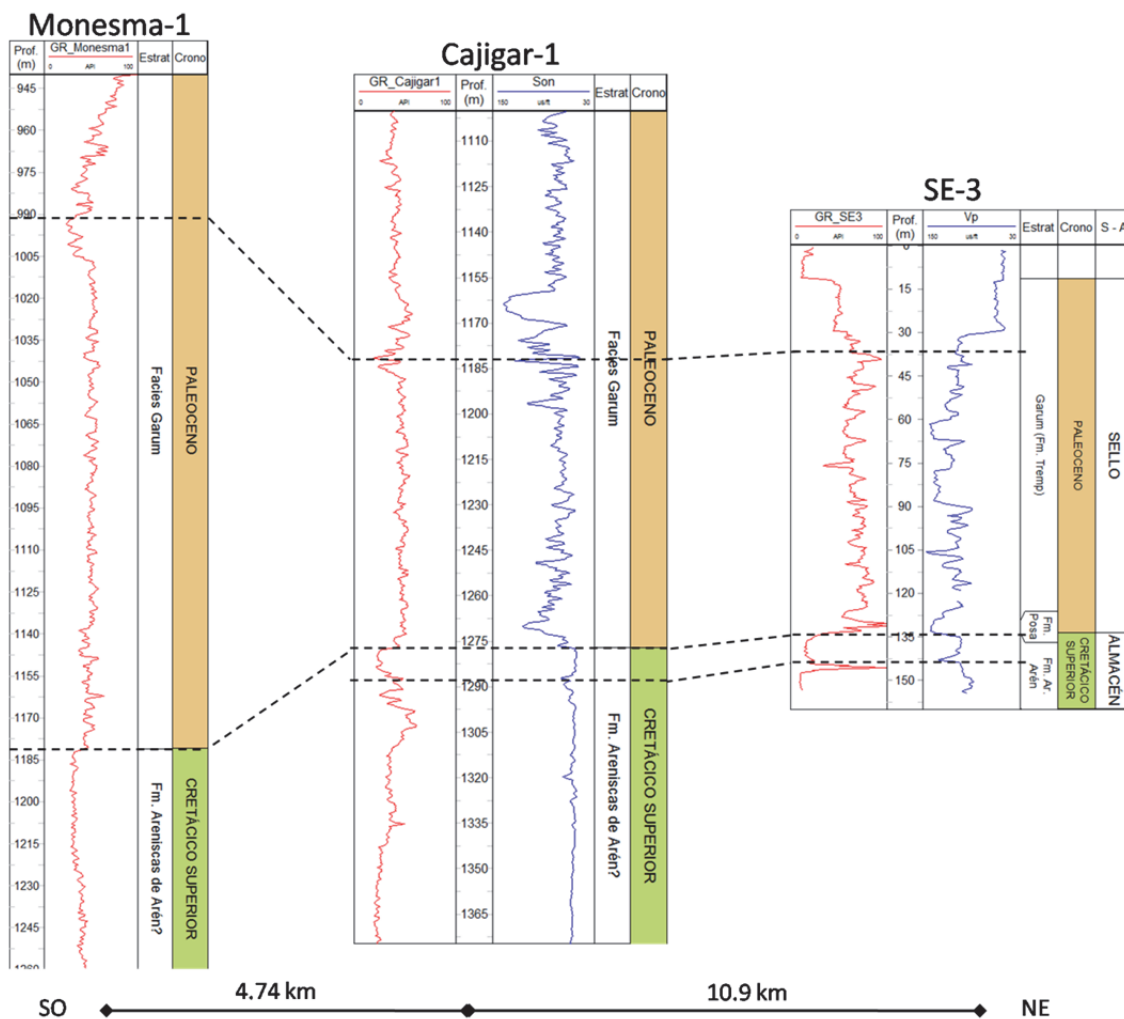


Figura 3. 11. Correlación estratigráfica mediante diagráfias (GR, Sónico) entre los sondeos antiguos y profundos de petróleo Cajigar-1 y Monesma-1, y el sondeo somero SE-3. Se ha correlacionado la facies Garum de la Formación Tremp, y la Fm. Areniscas de Arén en los tres sondeos. Se indican las distancias entre los tres sondeos. La escala vertical es la misma para los tres, y no están a escala horizontal.

A partir de las diagráfias de estos sondeos, se llevará a cabo una reinterpretación litológica detallada, no existente en los informes técnicos de los sondeos de petróleo disponibles.

3.2.2 Sondeo SB-1. Facies Keuper

Geográficamente el sondeo SB-1 se encuentra en el extremo SE de Castilla-La Mancha, en el pueblo de Alcaraz, perteneciente a la provincia de Albacete. Tiene como coordenadas geográficas, Longitud = 38°42'25.5" N y Latitud = 2°31'41.15" O.

Geológicamente el sondeo SB-1 se localiza en la unidad morfológica de la Sierra de Alcaraz, perteneciente a la provincia de Albacete (Hoja nº 814, Mapa Topográfico Nacional). Se enmarca en el sector sur de la Meseta, concretamente cerca del límite NO del dominio Prebético de la Zonas Externas de las Cordilleras Béticas (Jerez, 1973; García-Hernández, 1978; Azema *et al.*, 1979) (Figura 3.12).

El Macizo Ibérico junto con la Cobertera Tabular conforma el Antepaís bético (Figura 3.12). En la Cobertera Tabular (Fernández, 1977) los materiales mesozoicos no están deformados, y afloran rocas terrígenas del Triásico continental, además de materiales jurásicos y neógenos, en disposición subhorizontal. Los materiales jurásicos tabulares son carbonatos brechificados y dolomitizados, aunque en ocasiones también presentan intercalaciones calcareníticas y laminación por algas. Hacia el sur, la Cobertera Tabular se deformó durante la orogenia alpina y se despegó del zócalo varisco en una tectónica de piel fina que generó un cinturón de pliegues y cabalgamientos formando el dominio Prebético de las Zonas Externas Béticas. El zócalo varisco bajo el dominio Prebético constituye la continuación del Macizo Ibérico (Vera, 2004).

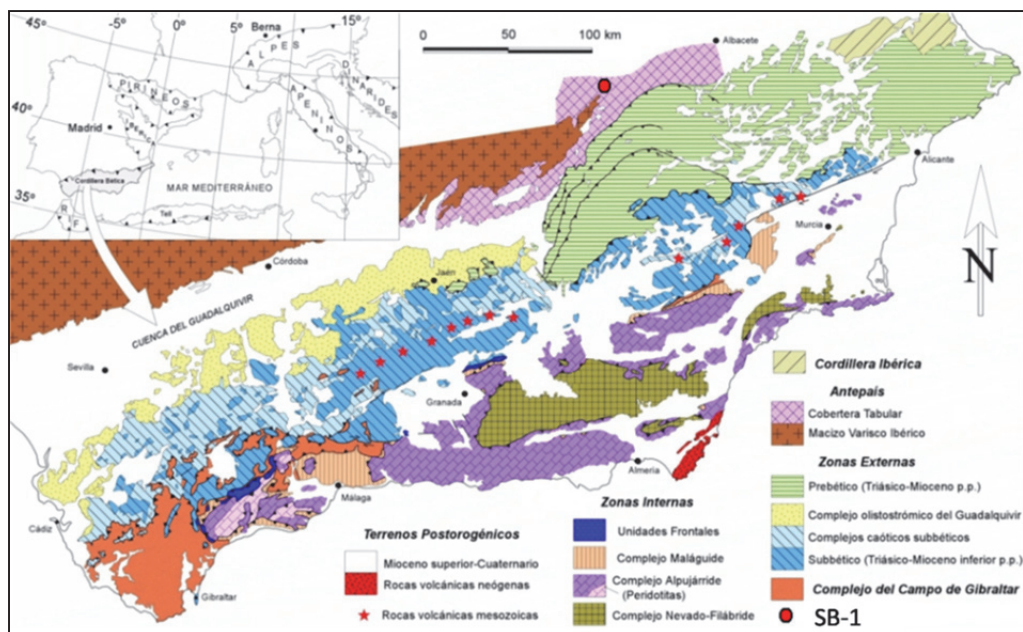


Figura 3. 12. Localización geológica del sondeo SB-1 (punto rojo) (modificado de Vera, 2004).

Si se observa un corte transversal desde la zona de la Cobertera Tabular al Prebético (Figura 3.13), se aprecia entre estos dos conjuntos un cambio lateral de facies. En el Prebético afloran rocas triásicas plegadas y fracturadas, caracterizadas por la presencia de carbonatos epicontinentales (próxima a la costa, sobre plataforma marina) (Vera, 2004), con una potencia variable y una edad comprendida entre el Noriense y el Ladiniense (Besems, 1981a). Se observan además ciclos evaporíticos separados por una intercalación siliciclástica (Ortí, 1974; Solé de Porta & Ortí, 1982), que se va modificando hacia la zona distal de la cuenca (borde de la Meseta). Sin embargo, hacia la Cobertera Tabular, desaparecen los carbonatos marinos del Triásico medio (facies *Muschelkalk*) y las evaporitas del ciclo superior e inferior, contribuyendo a una mayor uniformidad de las facies durante el Triásico en este sector.

Según Arche *et al.* (2002), este cambio lateral de facies provoca que las correlaciones entre la zona distal y la zona proximal de la cuenca sean poco evidentes. Según estos autores la base de la serie no presenta datación y los cambios eustáticos producidos se superponen a una importante actividad tectónica distensiva y contemporánea, poco conocida.

El Prebético es la unidad geológica más septentrional de las Zonas Externas Béticas. Según Vera (2004) se divide en dos sectores; el Prebético del sector oriental (Albacete) y el Prebético del sector central junto con afloramientos aislados y más occidentales de la provincia de Jaén.

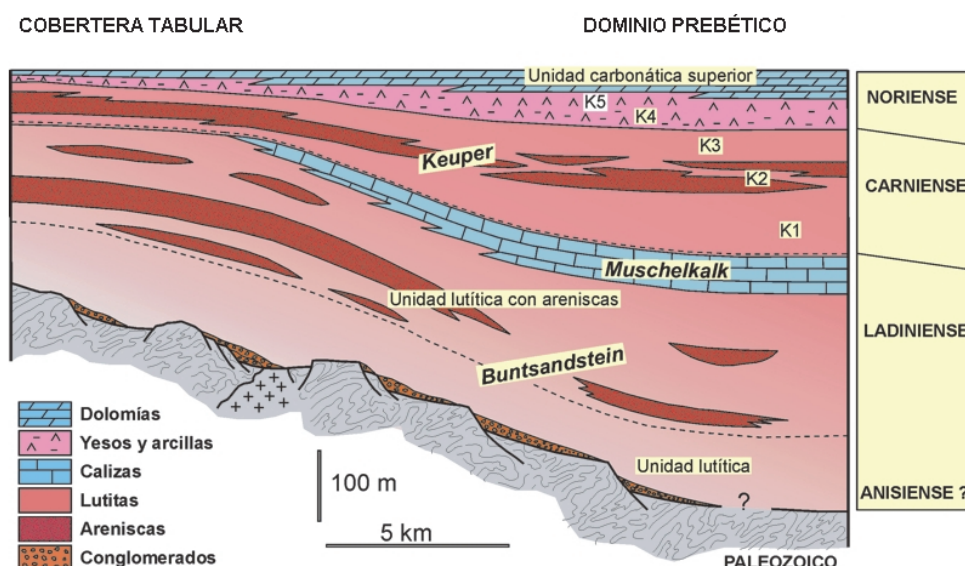


Figura 3. 13. Unidades litoestratigráficas triásicas entre la Cobertera Tabular (borde del Macizo Ibérico) y el Prebético (Vera, 2004). El sondeo SB1 se sitúa en la Cobertera Tabular.

El Prebético del sector central comprende los afloramientos correspondientes a las unidades morfoestructurales del Prebético de las Sierras de Alcaraz y Cazorla, y el Prebético de la Sierra de Segura.

La región donde se encuentra el sondeo SB-1 presenta una geología de poca complejidad en series estratigráficas de escasa potencia y estratificación subhorizontal, con deformación tectónica apenas inexistente (Vera, 2004) y cambios laterales de facies importantes (Figura 3.13).

En la Figura 3.14 se observa el esquema regional tectónico y el mapa geológico de la zona donde se ubica el sondeo SB-1. El territorio pertenece a la llanura Manchega, sin deformación tectónica, cuya parte sur es cabalgada por el frente del Prebético Externo. Se distinguen dos conjuntos de materiales; el zócalo paleozoico (colores marrones-rojizos), y apoyado sobre él, la Cobertera Tabular, que está constituida por materiales del Triásico y Jurásico inferior (Lias) (en colores rosa y azul respectivamente) y sobre cuyos materiales se localiza el sondeo SB-1. La Cobertera Tabular está formada por facies detríticas del Triásico, la plataforma carbonatada del Jurásico inferior (Lias-medio) de Ossa de Montiel, y las cuencas terciarias continentales de La Mancha. Esta unidad descansa discordantemente sobre las series Paleozoicas.

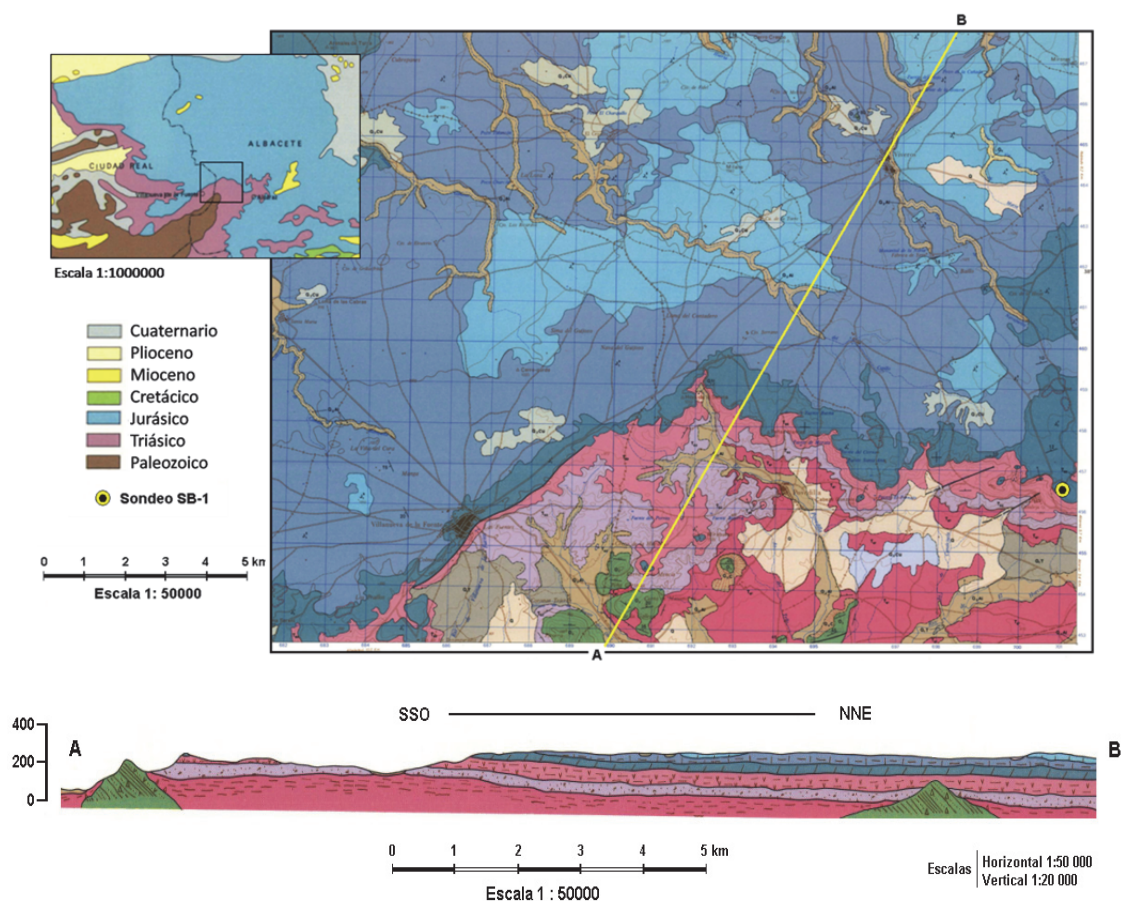


Figura 3. 14. Mapa geológico de la zona y esquema geológico regional (margen superior izquierda) donde se sitúa el sondeo SB-1 (punto amarillo). En la parte inferior corte geológico A-B próximo al sondeo SB-1, indicado mediante línea amarilla sobre el mapa. Modificado de MAGNA50, IGME. Escala 1:50000.

El nivel geológico de partida en la perforación del sondeo SB-1 ha sido atribuido por el IGME al Jurásico inferior (Lias). Seguidamente en profundidad se cortó el Triásico superior, donde el IGME (IGME, 2009) ha identificado al tramo arcilloso de la facies Keuper como la formación confinante, y al tramo arenoso y la Formación Areniscas de Manuel de la facies Keuper como la formación reservorio. La perforación alcanzó los 187.8 m de profundidad.

Ortí (1974), estructuró el Keuper en cinco formaciones: Formación Arcillas y yesos de Jarafuel (K1), formada por una serie evaporítica inferior, Formación Areniscas de Manuel (K2) y Formación Arcillas de Cofrentes (K3) que constituyen las series detríticas intermedias, la Formación Arcillas yesíferas de Quesa (K4) y la Formación Yesos de Ayora (K5), que forman las series evaporíticas superiores.

El ambiente sedimentario de la facies Keuper arcilloso corresponde a una llanura de inundación pasando distalmente a una llanura lutítica costera (IGME, 1974). El ambiente sedimentario de la facies Keuper arenoso y Formación Areniscas de Manuel correspondería a un ambiente fluvial con corrientes tipo “braided” o anastomosados (IGME, 1980). Esta unidad se

correlaciona regionalmente con la Unidad K2 de Ortí (1974) y de Fernández *et al.* (1994). Fernández *et al.* (1994) y Valera (2005) describen en detalle el Triásico de la cobertera tabular de la Meseta y del Prebético externo entre Alcaraz y Siles (Albacete y Jaén), aportando interpretaciones sedimentológicas de detalle. Fernández *et al.* (1994) exponen una correlación regional donde el K2 se reduciría a los niveles de areniscas superiores de esta localidad, y donde la parte inferior de la serie sería el equivalente temporal y lateral de la Facies Buntsandstein.

3.2.2.1 Correlación estratigráfica mediante diagráfias entre el sondeo SB-1 y los sondeos Salobral-1 y Carcelén-1

Los sondeos antiguos y profundos de petróleo próximos al sondeo SB-1 con los que se ha podido establecer una correlación estratigráfica mediante diagráfias han sido Salobral-1 y Carcelén-1 (Figura 3.15).

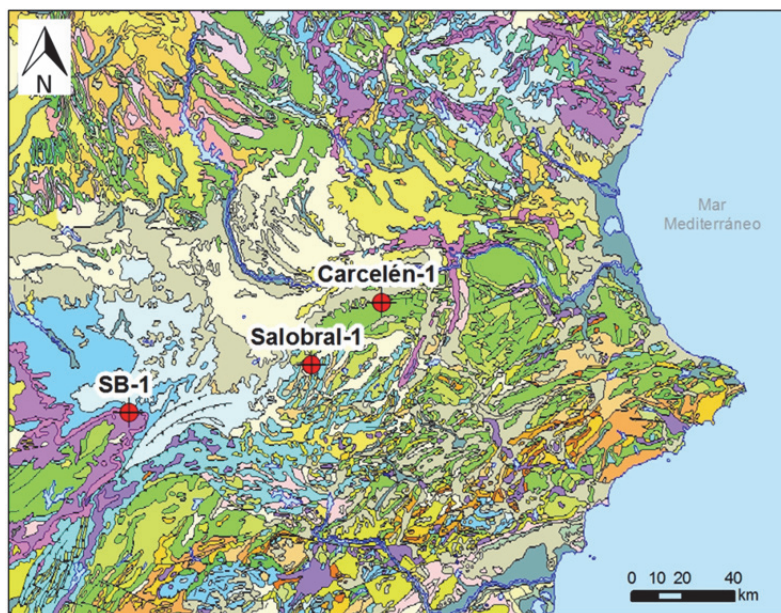


Figura 3. 15. Representación, sobre mapa geológico, de la ubicación del sondeo somero SB-1, y los sondeos profundos y antiguos de petróleo Salobral-1 y Carcelén-1. Escala 1:100000. Leyenda litológica en la Figura 3.6. Fuente mapa: IGME.

El sondeo Salobral-1 (Latitud = 38° 52' 9.60" N, Longitud = 1° 42' 10.70" O) se sitúa a 74 km de distancia del sondeo SB-1, en dirección ENE. La profundidad total alcanzada en la perforación de este sondeo fue de 2013 m (no se dispone del informe técnico elaborado por la empresa perforadora).

En la Figura 3.16 se observa la correlación estratigráfica mediante diagráfias establecida con los sondeos SB-1 y Carcelén-1; con el primero se ha podido establecer una correlación del

tramo 1080 – 1127 m con el tramo 51– 75 m de profundidad aproximadamente, donde se observa una tendencia similar entre los perfiles GR de ambos sondeos. Se puede consultar la geología de la zona, de forma más detallada, en la Hoja 791 del MAGNA50, correspondiente a Chinchilla de Monte Aragón, publicado por el IGME en 1981.

El sondeo Carcelén-1 (Latitud = 39° 05' 12" N y Longitud = 2° 22' 58" O), se sitúa a 42.1 km de distancia del sondeo Salobral-1 en dirección NE, y a 114 km del sondeo SB-1 en dirección ENE. Este sondeo alcanzó una profundidad total de perforación de 2635.7 m, y según el informe técnico de la empresa el objetivo fue el reconocimiento de la serie mesozoica. Se ha podido establecer una correlación mediante diagrfías con la facies Keuper del sondeo Salobral-1 en el tramo 2100 y 2218 m de profundidad aproximadamente (Figura 3.16). Ese tramo estaría formado, según el informe técnico, por arcillas arenosas a siltsas, con intercalaciones de areniscas finas a siltsas. La fracturación existente indicada en el informe se presenta rellena de anhidrita. El informe también señala que posteriormente a los 1979 m de profundidad, los almacenes encontrados estaban llenos de agua salada. Se puede consultar la geología de la zona de forma más detallada, en la Hoja 767 del MAGNA50, correspondiente a Carcelén, publicado por el IGME.

En la Figura 3.16 se puede observar la correlación estratigráfica resultante, mediante diagrfías, llevada a cabo entre los sondeos descritos anteriormente.

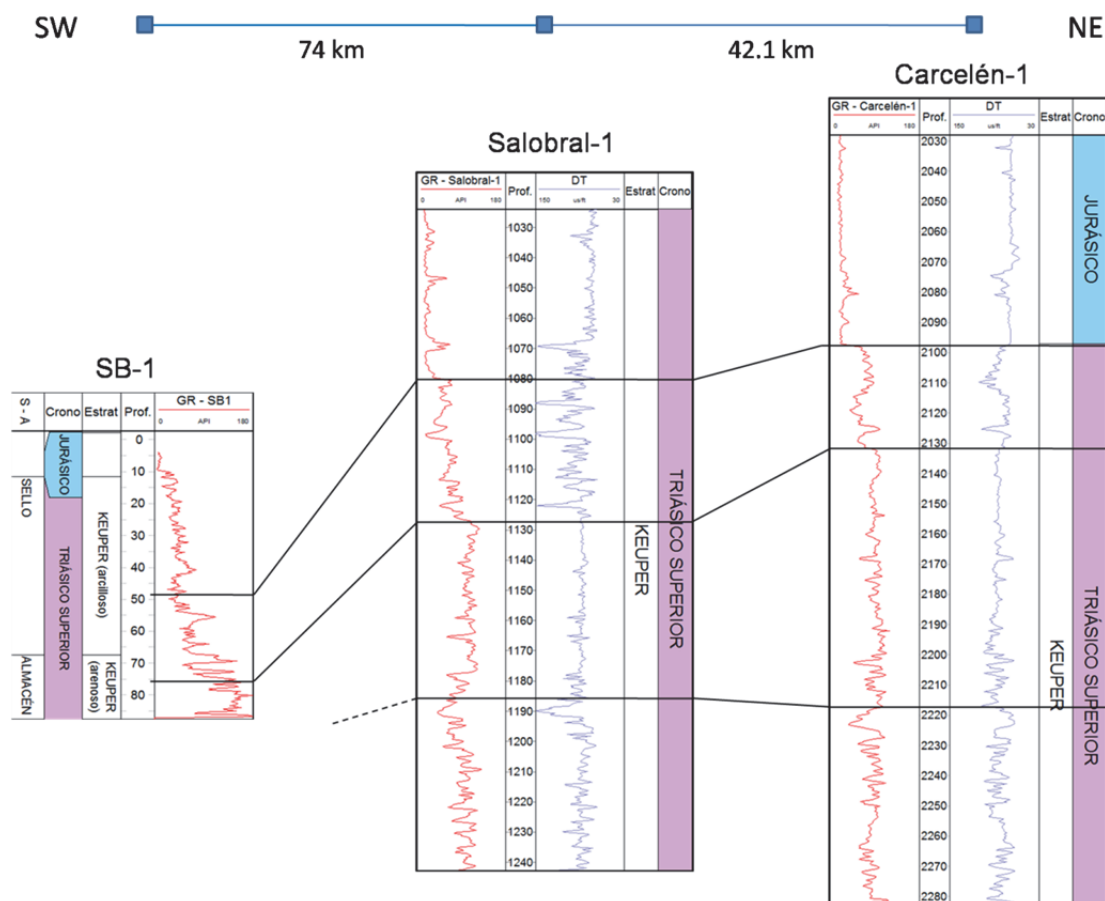


Figura 3. 16. Correlación estratigráfica mediante registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) y Sónico (DT) entre los sondeos SB-1, Salobral-1 y Carcelén-1. La distancia horizontal entre sondeos no está a escala, y la escala vertical es la misma. La profundidad viene dada en metros.

4. INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES CARBONATADAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES

Las formaciones carbonatadas estudiadas en esta tesis se localizan en dos dominios geológicos diferentes del territorio peninsular. Por un lado, la facies Muschelkalk inferior (M1), de edad Triásico medio, localizada en la Cordillera Costero Catalana, y que ha sido estudiada con el sondeo somero SE-4 y en el sondeo profundo de petróleo Reus-1. Por otro lado, la Formación Calizas de las Ventanas (o Formación Calizas de Algas), del Neógeno, localizada en la Cuenca del Bajo Segura, y que ha sido estudiada mediante el sondeo somero SB-4, y el sondeo profundo de petróleo Benezúzar-1. La primera tiene como formación confinante la facies Muschelkalk medio o M2, y la segunda, la Formación Torremendo (localmente Fm. Margas del TAP).

4.1 Sondeo SE-4 (Arbolí – Tarragona) y sondeo Reus-1 (Reus – Tarragona)

En la Tabla 4.1, se muestran los registros realizados y datos disponibles para esta tesis en el sondeo SE-4. A partir de la imagen acústica de sondeo y el tiempo de tránsito se obtuvo el *cáliper* acústico. Además de los adquiridos en los trabajos de testificación de esta tesis, también se ha contado con los registros de resistividad Normal profunda (RES64N) y Normal somera (RES16N), y potencial espontáneo (SP) realizados por la empresa CGS.

Tabla 4. 1. Registros estudiados en los sondeos SE-4: Radioactividad Gamma Natural (GR), Imagen óptica y acústica de sondeo (OBI, ABI) y registro sísmico de onda completa (FWS). Se indica los tramos testificados y el número de muestras analizadas mediante Difracción de Rayos X (DRX) y lámina delgada (LD) en la facies M2 (Muschelkalk medio) y M1 (Muschelkalk inferior) como apoyo a la interpretación litológica mediante las diagrfías.

SE-4	Diagrafías				Muestras	
	GR	OBI	ABI	FWS	DRX	LD
Muschelkalk Medio	0 – 106 m	0 – 107 m			5	-
Muschelkalk Inferior					1	4

Como apoyo a la interpretación litológica de diagrfías en el sondeo SE-4 se analizaron, mediante DRX, 5 muestras de la facies M2 y 1 muestra de la facies M1 (resultados detallados en Anexo III), y se estudiaron al microscopio 4 muestras en lámina delgada de la facies M1. También se han realizado observaciones de los testigos.

La interpretación de la litología perteneciente al sondeo profundo Reus-1 ha sido mejorada mediante la correlación estratigráfica llevada a cabo con el sondeo somero SE-4, y una interpretación litológica en detalle realizada a partir de las diagrfías del tramo de interés. La información extraída de los registros geofísicos se ha visto complementada con el análisis de muestras mediante DRX.

En la Tabla 4.2, se pueden observar los diferentes registros disponibles en la facies M2 y M1 del sondeo Reus-1, así como una relación del número de muestras analizadas mediante Difracción de RX en ambas facies (resultados detallados en Anexo III).

Tabla 4. 2. Registros disponibles en el sondeo Reus-1: Radioactividad Gamma Natural (GR), *Interval/Transit Time* (DT), Resistividad Lateral Profunda (LLD), Resistividad Lateral Somera (LLS), Potencial Espontáneo (SP), *BulkDensity* (RHOB) y *cáliper* mecánico. Se indica el número de muestras (ripios) analizadas mediante Difracción de Rayos X (DRX) en las facies correlacionadas con las del sondeo SE-4 (Muschelkalk medio y Muschelkalk inferior).

Reus-1	Diagrfías						Muestras
	GR	DT	RES	SP	<i>Caliper</i> (Mecánico)	RHOB	DRX
Muschelkalk Medio	X	X	LLD LLS	X	X	X	5
Muschelkalk Inferior							2

En cuanto a las correcciones realizadas en los registros pertenecientes al sondeo Reus-1, el registro GR disponible se registró en medidas API, con lo cual no hubo que hacer ninguna transformación de unidades. Al registro RHOB se le aplicó una corrección de profundidad de 0.69 m tomando como referencia los perfiles de resistividad y de GR.

4.1.1 Interpretación litológica de la facies Muschelkalk medio (M2) y la facies Muschelkalk inferior (M1) en el sondeo SE-4

Se representaron, mediante histograma, por una parte las frecuencias de los valores de resistividad Normal Larga (RES64N), y por otra, los valores de GR: el resultado es una clara distribución bimodal en ambos casos (Figura 4.1), indicativa de que la heterogeneidad litológica está bien representada por ambas lecturas, siendo los registros más idóneos para su representación gráfica posterior como ayuda en la interpretación litológica.

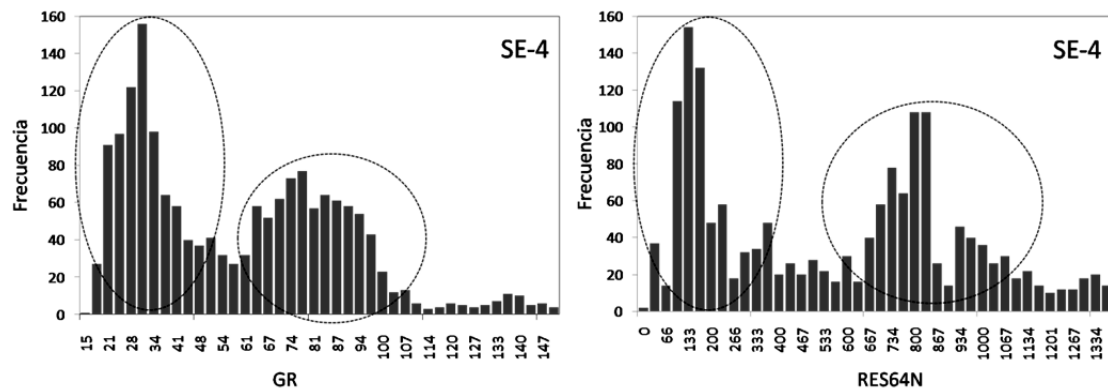


Figura 4. 1. Representación, mediante histograma, de las frecuencias de valores del registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) y el registro de Resistividad Normal Larga (RES64N) en la totalidad del sondeo SE-4.

Se han representado en el *cross-plot* los citados registros utilizando el valor de velocidad de ondas P (V_p) como escala de color (Figura 4.2), para una mejor diferenciación litológica entre la formación confinante (facies Muschelkalk medio o M2) y la formación almacén (facies Muschelkalk inferior o M1). En el *cross-plot* se han diferenciado dos grupos de puntos; uno, resaltado en color verde, agrupa todos los puntos con los valores más elevados de GR y los más bajos de resistividad normal larga, mientras que el segundo grupo de puntos, resaltado con color naranja, se caracteriza por presentar los valores más bajos de radioactividad gamma natural total y los más elevados de resistividad Normal profunda de todo el sondeo.

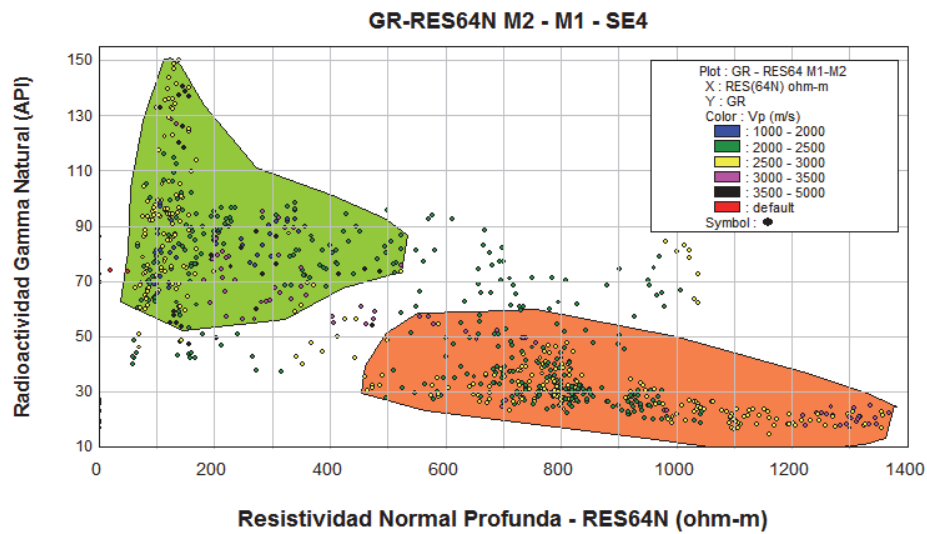


Figura 4. 2. *Cross-plot* de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente al registro de resistividad normal larga (RES64N) y el valor de Vp (colores), entre los 19 y 106 m de profundidad del sondeo SE-4. Se han diferenciado dos grupos de puntos, resaltados en color verde y naranja.

Atendiendo a la agrupación del *cross-plot*, y representándola en una columna junto con algunos de los registros llevados a cabo en el sondeo SE-4 (Figura 4.3), se ha identificado al grupo de puntos englobados en la zonación de color naranja como formación geológica almacén, es decir a la facies Muschelkalk inferior, mientras que el grupo resaltado en color verde ha sido identificado como la formación geológica confinante o sello. De esta forma se ha establecido el límite entre ambas zonas a la profundidad aproximada de 67 m.

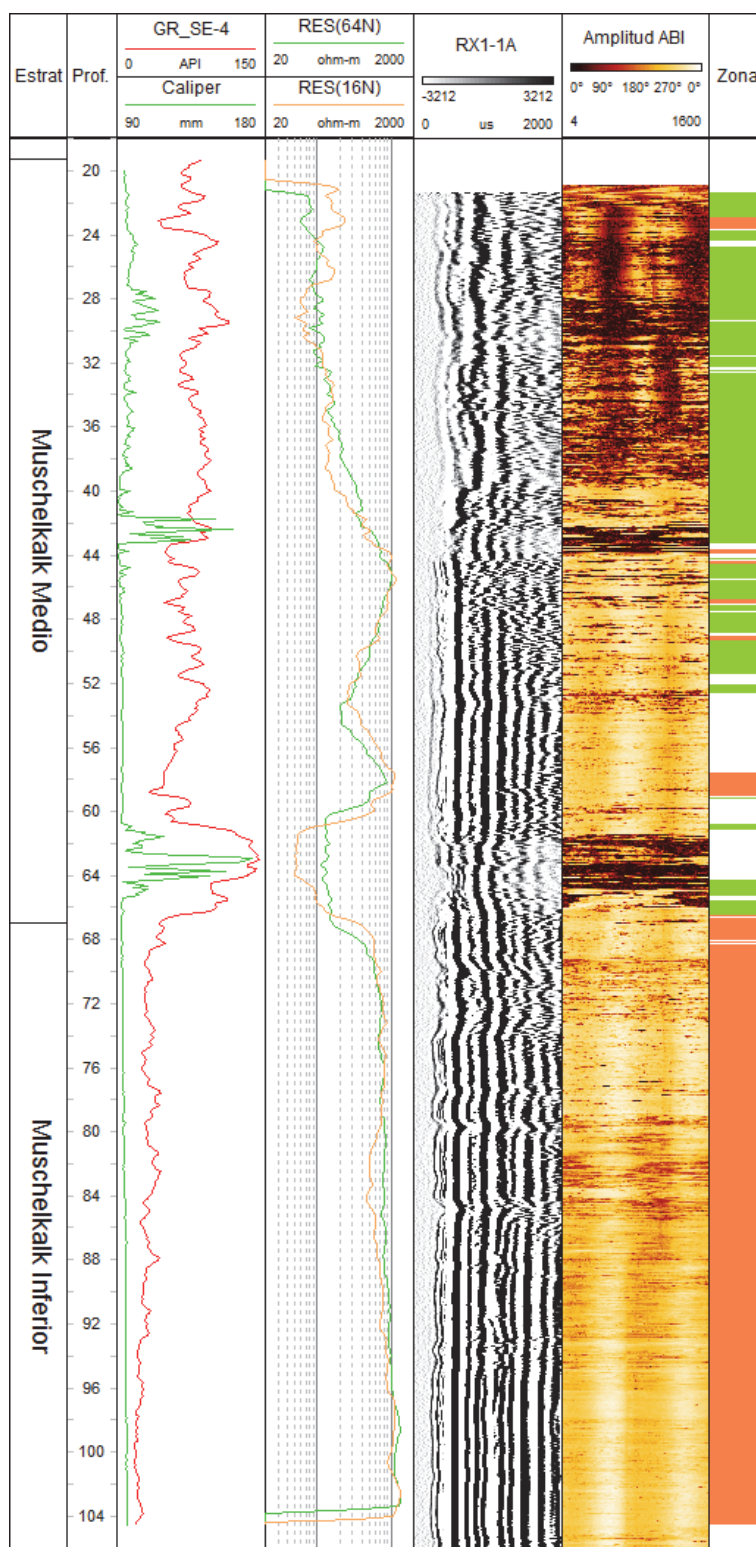


Figura 4. 3. Registros pertenecientes a la totalidad del sondeo SE-4, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* acústico, Resistividad Normal Corta (RES16N) y Larga (RES64N), registro sónico en el primer receptor (RX1-1A), imagen acústica del sondeo (ABI) y columna de zonación según el *cross-plot* de la Figura 4.1.

➤ **Interpretación litológica de la facies Muschelkalk medio (M2) en el sondeo SE-4**

Para una detallada interpretación litológica de la zona confinante, se ha representado, mediante *cross-plot*, el registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente al de la Resistividad Normal Profunda (RES64N) y la velocidad de ondas P (Vp) para la facies Muschelkalk medio (Figura 4.4). Se han distinguido dos grupos de puntos: uno, resaltado en color naranja (grupo A), que presenta los valores más bajos de RES64N, y un segundo grupo resaltado en color gris (grupo B), que presenta valores bajos de GR y el resto de puntos más elevados de resistividad RES64N, y velocidades de ondas P más elevadas (superiores a 3000 m/s).

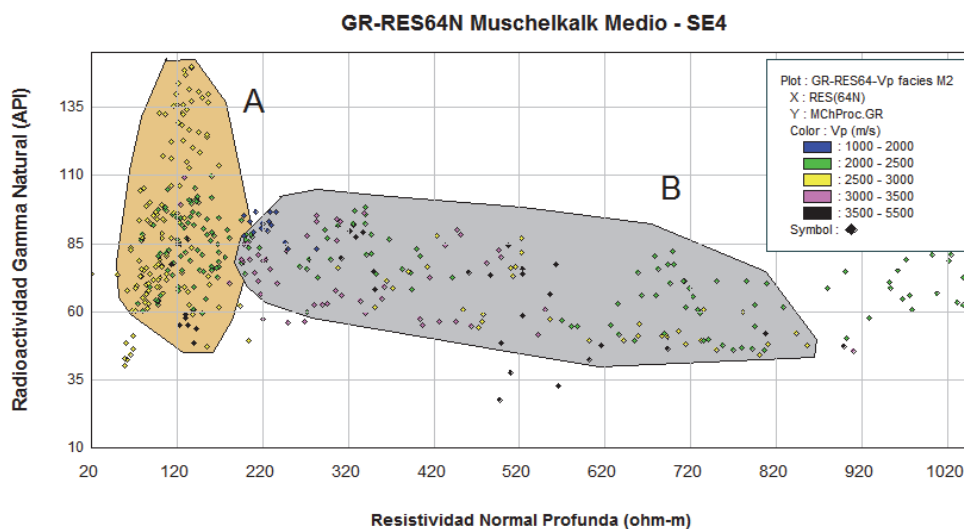


Figura 4. 4. *Cross-plot* del registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente al de Resistividad Normal Profunda (RES64N) y velocidad de ondas P (Vp) para la facies M2 del sondeo SE-4 (tramo 11 – 67 m).

Estos dos grupos han sido proyectados en una columna junto con los demás registros en la facies M2 (Figura 4.5). Sobre la interpretación de la columna litológica de dicha figura, se indican las profundidades correspondientes de las muestras tomadas para análisis de Difracción de RX y estudio en lámina delgada.

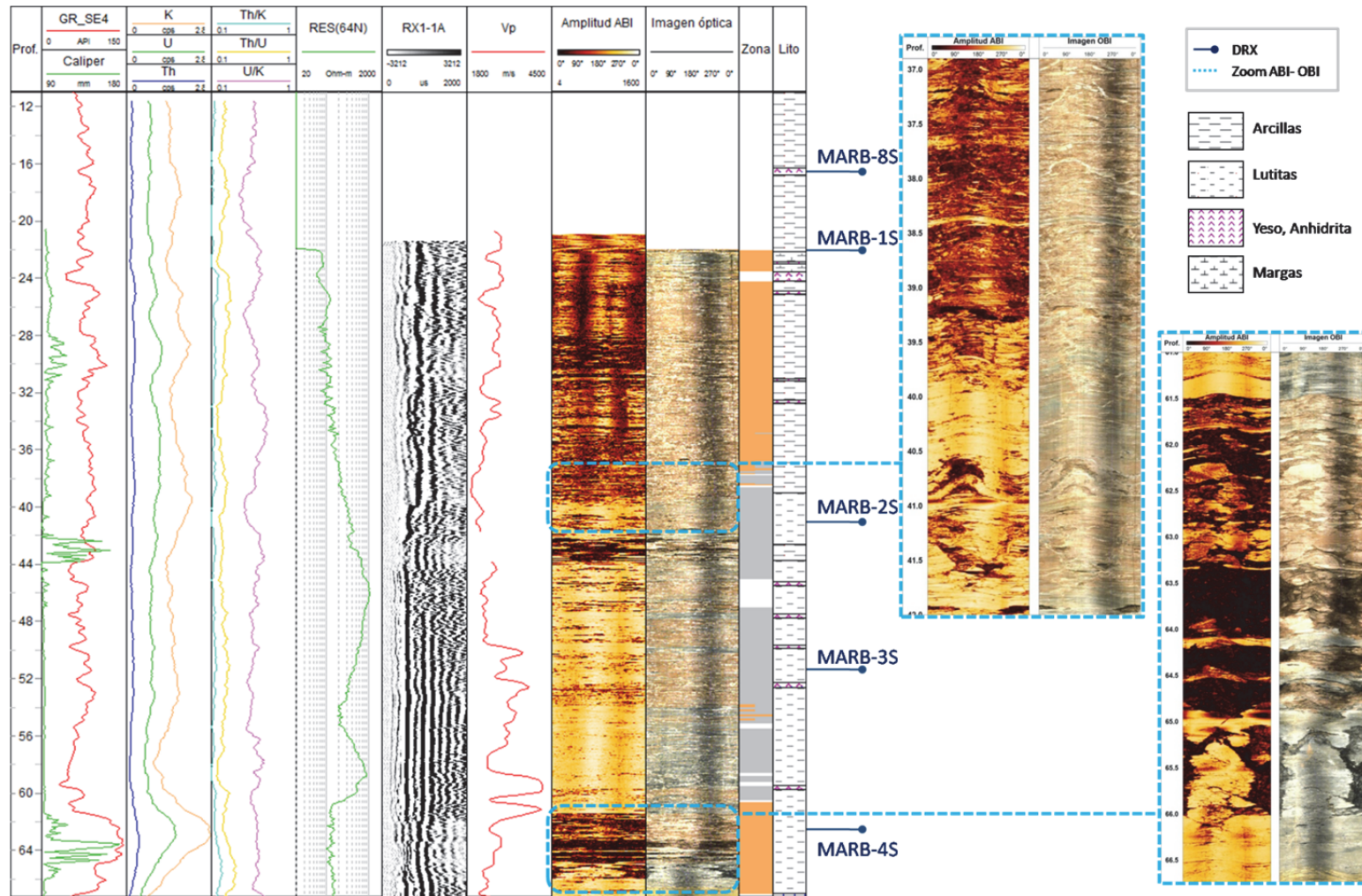


Figura 4. 5.Registros en la facies M2 del sondeo SE-4, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* acústico, valores espectrométricos U, K y Th y las relaciones cualitativas entre sí, resistividad normal larga (RES64N), llegada de la señal sónica al primer receptor (RX1-1A), velocidad estimada de ondas P (Vp), imagen acústica (ABI) y óptica de la pared del sondeo, columna de zonación a partir del *cross-plot* y columna litológica interpretada. Se indican las profundidades a las que se han realizado análisis de Difracción de Rayos X, y dos zoom de la imagen acústica y óptica de dos tramos (37 – 42 y 61 – 66.5 m).

A continuación se detalla la interpretación de la zonación del *cross-plot*:

Grupo A: tramos 11 - 39 m y 61.5 – 67 m

El perfil de Radioactividad Gamma Natural muestra en todo este tramo una tendencia aproximadamente constante con un valor medio moderadamente elevado (78 API). A partir de los 28 m de profundidad, se observa en el registro de imagen acústica, en los perfiles de resistividad y del *cáliper* acústico, una elevada irregularidad a consecuencia de la presencia de material poco consistente. El registro de la llegada de la señal sónica también indica material poco competente pues la señal se muestra bastante atenuada. El valor de la resistividad normal profunda (RES64N) es en general bajo (58 ohm·m). La velocidad de ondas P observada para este tramo también es baja, oscilando en general entre 1930 y 2900 m/s.

Se pueden observar pequeños descensos de la respuesta GR (40 API), debidos a la abundante presencia de niveles de sulfatos en todo el tramo, confirmado por el análisis de Difracción de Rayos X de dos muestras (Referencias MARB-8S y MARB-1S en Anexo III), y por la observación de los testigos. El análisis de la muestra MARB-8S, tomada a los 16.9 m de profundidad, revela como componente principal, cuarzo, y como secundarios, yeso y mica (Anexo III).

Observando los testigos, el tramo desde los 11 a los 39 m, presenta abundantes vetas de yeso y anhidrita, algunas subparalelas y otras con una deformación importante (buzamientos superiores a 70°), en donde el yeso aparece también como material de relleno. Se puede ver un ejemplo de estas intercalaciones evaporíticas constituyendo laminación paralela en el registro de imagen acústica y en una muestra de testigo en la Figura 4.6. El material con el que se intercala es menos consistente, interpretándose como material arcilloso.

De 61 hasta 67 m de profundidad aproximadamente, se observa un incremento importante de GR (Figura 4.5). Esta zona se identifica también en el registro acústico de onda completa donde no ha sido posible identificar la primera llegada de las ondas P debido a la atenuación que se produce. Se observa en esta parte final de la facies M2 un descenso importante en los valores de resistividades (20 - 55 ohm·m). Las observaciones a visu del testigo, el perfil del *cáliper* confirmando el incremento del diámetro del sondeo, y las imágenes de sondeo disponibles indican que se trata de una zona erosionada, sometida a un fuerte debilitamiento estructural.

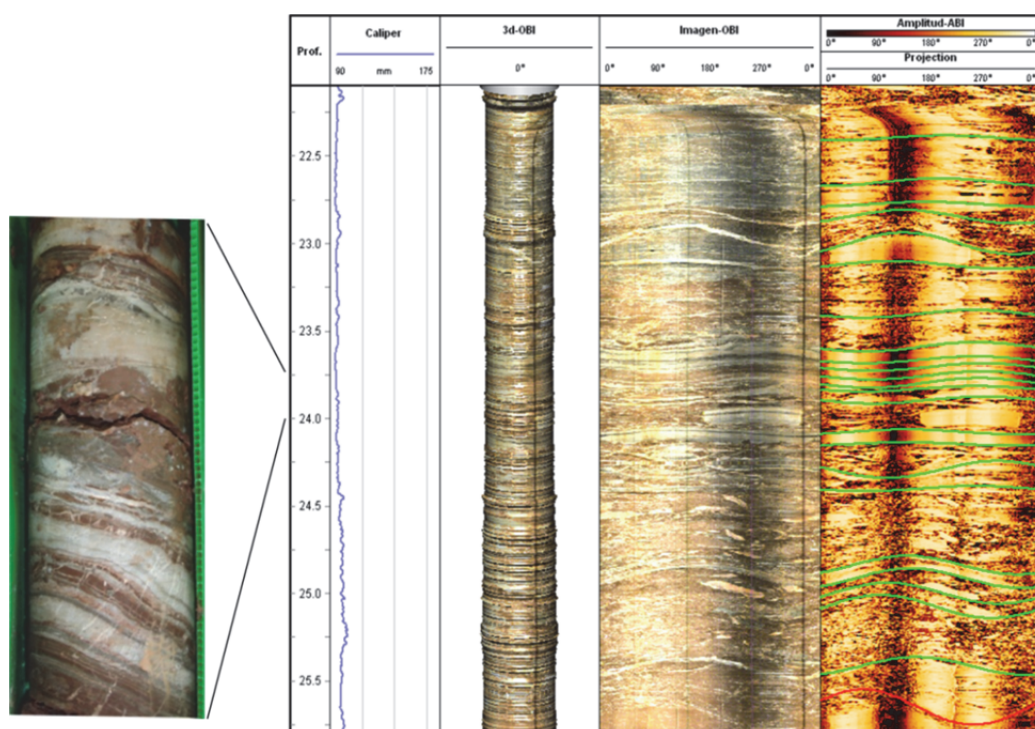


Figura 4. 6. Foto de una muestra de testigo entre 23.7 y 24 m perteneciente a la facies M2 del sondeo SE-4 (la fractura observada es posterior al registro geofísico). Registros, de izquierda a derecha: *cáliper* acústico, imagen 3D a partir de la imagen óptica, imagen óptica, imagen acústica (amplitud) de la pared del sondeo e identificación de laminaciones (líneas verdes) y fracturas (líneas rojas).

En la última parte del tramo, a los 63.2 m de profundidad, se dispone del análisis de DRX de la muestra con referencia MARB-4S. El resultado revela que la muestra está constituida por cuarzo como componente principal, y como componente secundario presenta dolomita. Se ha identificado además feldespato potásico, mica y hematites como accesorios. Esta composición indica una ligera transición hacia la zona carbonatada del almacén.

En base al estudio de los registros geofísicos, a los resultados de los análisis de Difracción de RX en polvo efectuados, y al reconocimiento a visu de algunos de los testigos, se ha identificado todo este grupo de puntos como una formación arcillosa, de unos 25 m de espesor, con elevado contenido evaporítico (yeso, anhidrita) dispuesto en forma de venas, disperso, y en esporádicas intercalaciones de espesor centimétrico.

Grupo B: tramo 39 – 61.5 m

En general, todo el tramo se caracteriza por la presencia de un material más compacto que el identificado en el tramo anterior, tal como se puede observar en los registros de la Figura 4.5. El perfil del *cáliper* acústico muestra una mayor uniformidad en general, sobre todo a partir de

los 44 m de profundidad. La respuesta GR presenta un valor medio en este grupo de puntos B similar al del tramo anterior (71 API), presentando algunos valores máximos de hasta 98 API (por ejemplo a las profundidades de 43 m) que han sido interpretados como tramos más arcillosos. Esto lo confirma el incremento del diámetro del sondeo en esa zona indicando la existencia de material más blando. La diferencia con el tramo anterior se observa en el perfil de resistividad, que sufre un incremento importante entre los 40 y los 61 m de profundidad aproximadamente, y en el perfil de velocidad de ondas P (V_p) que también muestra un incremento notable a partir de los 49 m.

A partir de una profundidad aproximada de 40 m, la imagen acústica muestra un color distinto, indicativo de un cambio en la amplitud. El registro de la señal sónica a partir de los 44 m, muestra una mayor amplitud de la primera llegada en particular, y del tren completo de ondas en general, lo que indica que se trata de una formación que produce menor atenuación de la señal, y por tanto, con un mayor nivel de compactación.

A los 40.7 m de profundidad (Referencia MARB-2S) y a los 50.9 m (Referencia MARB-3S) se analizaron mediante DRX dos muestras que presentan como componentes principales cuarzo y dolomita (resultados detallados en Anexo III). Esto justificaría el incremento en el valor de la resistividad en esa área. Asimismo, también se ha identificado anhidrita en algunas muestras como componente secundario, lo que explicaría el descenso importante de GR en algunos niveles de este tramo.

En base a toda esta información, se ha interpretado este tramo del grupo B como una zona lutítica, con importantes intercalaciones evaporíticas y con algunos niveles de espesor centimétrico a decamétrico más arcillosos.

➤ Interpretación litológica de la facies Muschelkalk inferior (M1) en el sondeo SE-4

El límite establecido entre la facies Muschelkalk medio y la facies Muschelkalk inferior presenta un límite gradual observándose ese cambio en el registro de imagen acústica de la Figura 4.7 (línea roja).

La facies M1 en el sondeo SE-4 alcanza casi los 40 m de espesor, y se caracteriza por un incremento importante en las resistividades (normal corta y normal larga) con respecto a la facies M2, además de un descenso generalizado en el valor de la radioactividad Gamma Natural (< 25 API). Se identifica una mayor amplitud de la primera llegada de la señal sónica a los receptores, y el valor del diámetro acústico de sondeo apenas muestra cambios

significativos en toda la facies M1, manteniendo un perfil regular, indicando así que se trata de un material más competente.

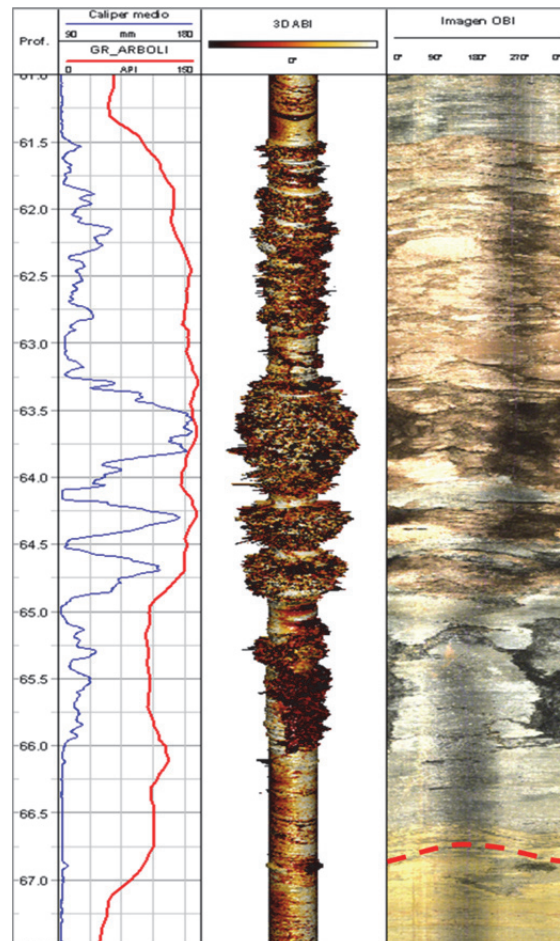


Figura 4. 7. Zona de transición entre M2 y M1 en el sondeo SE-4. Diagramas, de izquierda a derecha: *caliper* acústico, Radioactividad Gamma Natural (GR), perfil 3D del registro de imagen acústica, registro de imagen óptica. Se marca con línea roja discontinua el límite entre ambas facies.

La representación gráfica a partir de los registros GR, RES64N y velocidad de Ondas P para la facies M1 del sondeo SE-4 se observa en la Figura 4.8. Se ha diferenciado un grupo de puntos (grupo D) resaltados en color naranja (V_p entre 2500 y 3500 m/s), con los valores más elevados de resistividad y los más bajos en GR (15 - 25 API), y un segundo grupo de puntos, resaltados en color azul (grupo C), que presenta valores de velocidad de ondas P más bajos (2000 - 3000 m/s), y que posee también valores más bajos de resistividad con respecto al grupo anterior, y un rango de radioactividad natural en general más elevado (25 - 45 API).

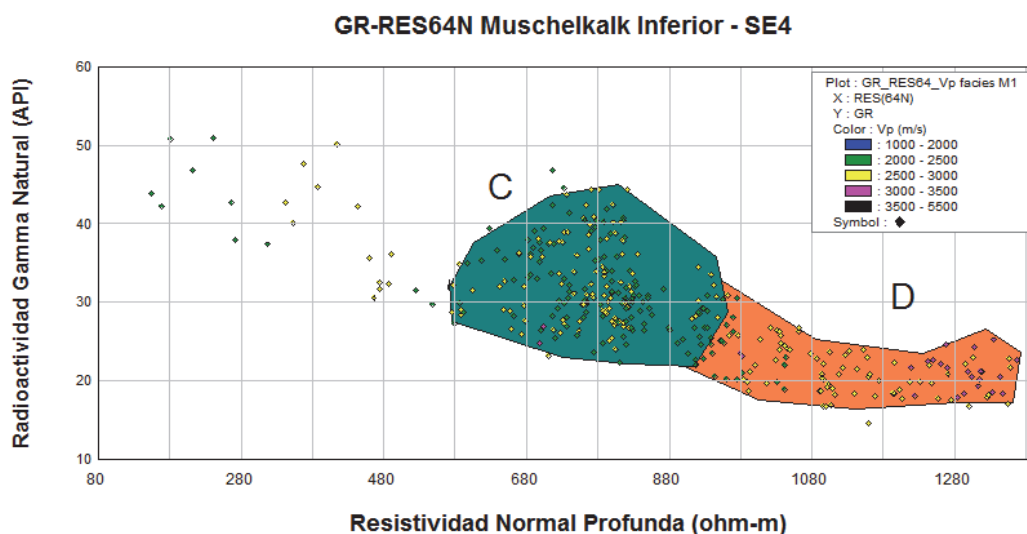


Figura 4. 8. *Cross-plot* de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente a Resistividad Normal Profunda (RES64N) y velocidad de ondas P (Vp) para la facies M1 del sondeo SE-4. Se han diferenciado dos grupos de puntos (C, D).

En la Figura 4.9, se observan en profundidad los registros geofísicos utilizados para la interpretación litológica de la facies M1 en el sondeo SE-4, con la proyección en vertical de la zonación establecida en el *cross-plot*, además de las profundidades a las que se tomaron muestras que fueron sometidas a análisis de DRX en polvo y estudios en lámina delgada.

Se describen a continuación más detalladamente los tramos según la diferenciación establecida a partir del *cross-plot* de la Figura 4.8:

Grupo C: tramo 67 – 90 m

A partir de 67 m, se produce un descenso importante en el registro de radioactividad GR, sobre todo hasta los 69 m de profundidad, a partir de entonces se mantiene en un valor aproximadamente constante. En este tramo, existen lecturas en general ligeramente elevadas de U en el registro de espectrometría, y valores casi nulos en la lectura de Th, lo que está indicando la ausencia casi total de materiales detríticos (Figura 4.9). La presencia de niveles ligeramente elevados de U indica presencia de cierta fracturación en la formación. El valor casi nulo de la relación Th/K así como un valor elevado de U/K a lo largo de este grupo C, indica un mayor nivel de compactación comparándolo con la facies M2, y también es síntoma de que la formación ha sufrido un proceso de diagénesis lixiviando el U y distribuyéndolo por las fracturas y los estilolitos que se han identificado.

El valor de la resistividad normal larga es elevado en este tramo del grupo C, y muestra una tendencia constante en toda la facies M1, con valores que oscilan entre 540 y 790 ohm·m. Ya

es posible identificar claramente una primera llegada de las ondas sínicas, cuyo valor medio de velocidad es de 2560 m/s con una desviación estándar muy elevada (250 m/s). Estas características de ascenso en la resistividad y una mejor identificación en la llegada de las ondas acústicas, son indicativos de una formación resistente. Sumado a los valores bajos de GR y ausencia de materiales detríticos en la composición, se puede concluir que se trata de una formación carbonatada.

Para confirmar el tipo de carbonato, se ha recurrido al estudio de dos muestras en lámina delgada (MARB-9A, tomada a 73.9 m de profundidad, y MARB-7A, a 86.3 m) (Figura 4.10).

La muestra en lámina delgada MARB-9A presenta una textura micrítica, muy homogénea. La matriz presenta aspecto masivo, con fractura concoidea. Se ha interpretado esta muestra como una caliza micrítica. Al microscopio se observan dos sistemas de fracturas, la mayoría rellenas de óxidos.

La muestra MARB-7A según el estudio hecho al microscopio pertenece a una roca sedimentaria que presenta una textura homogénea. La matriz presenta aspecto cristalino, y está formada por cristales de dolomita de grano muy fino, con un tamaño que se encuentra generalmente entre 30 y 40 μm . Se observa en la lámina que el reemplazamiento de la calcita por la dolomita no ha sido completo (dolomitización parcial), con conservación parcial de la textura deposicional. La dolomita posee textura no planar xenotópica (Sibley *et al.*, 1984) y ha reemplazado parcialmente a la matriz presentando un tamaño de cristales menor que la que ha reemplazado a los aloquímicos (aún se pueden observar algunos de gran tamaño y forma redondeada), por lo que la muestra presenta una moderada heterogeneidad textural. Se observan en ocasiones los cristales romboédricos de la dolomita desarrollándose. Se ha interpretado la muestra MARB-7A como una dolomicrita.

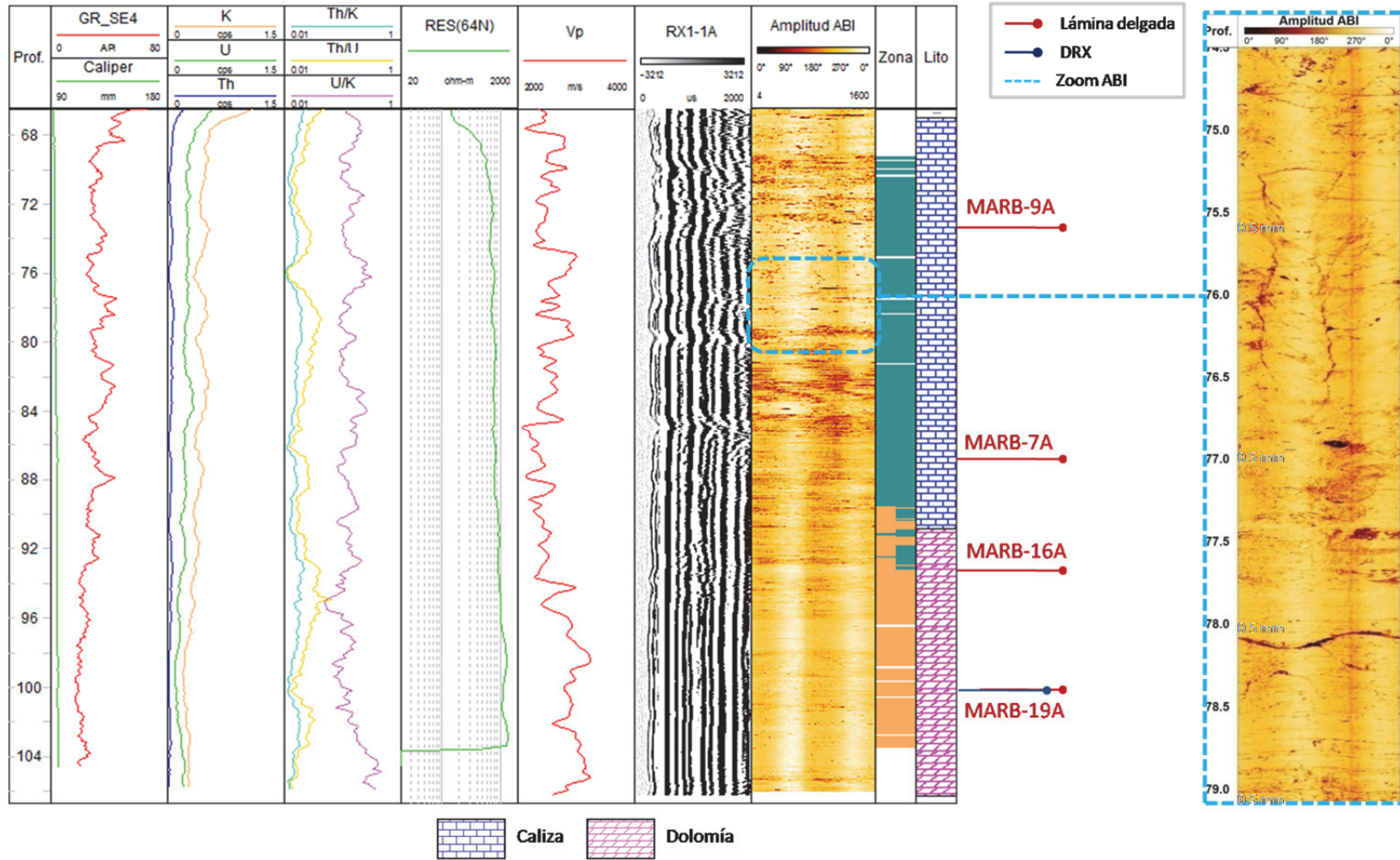


Figura 4. 9. Registros en la facies M1 de SE-4, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), caliper acústico, espectrometría de K, U y Th y sus relaciones Th/K, Th/U y U/K, Resistividad Normal profunda (RES64N) en escala logarítmica, velocidad de ondas P (Vp), llegada del tren de ondas al primer receptor (RX1-1A), imagen acústica de la pared del sondeo (ABI), columna con la zonación establecida a partir del *cross-plot* y columna litológica interpretada. Se indican las profundidades de las muestras tomadas para los estudios realizados mediante DRX y para análisis en lámina delgada, así como un ejemplo de imagen acústica entre los 74.5 y los 79 m de profundidad.

A partir de los 72 m de profundidad aproximadamente se observan sobre el testigo cavidades (*vugs*) recristalizadas de un diámetro de tamaño milimétrico, y algunas de tamaño centimétrico. Estas oquedades se hacen más abundantes a partir de los 85 m de profundidad aproximadamente.

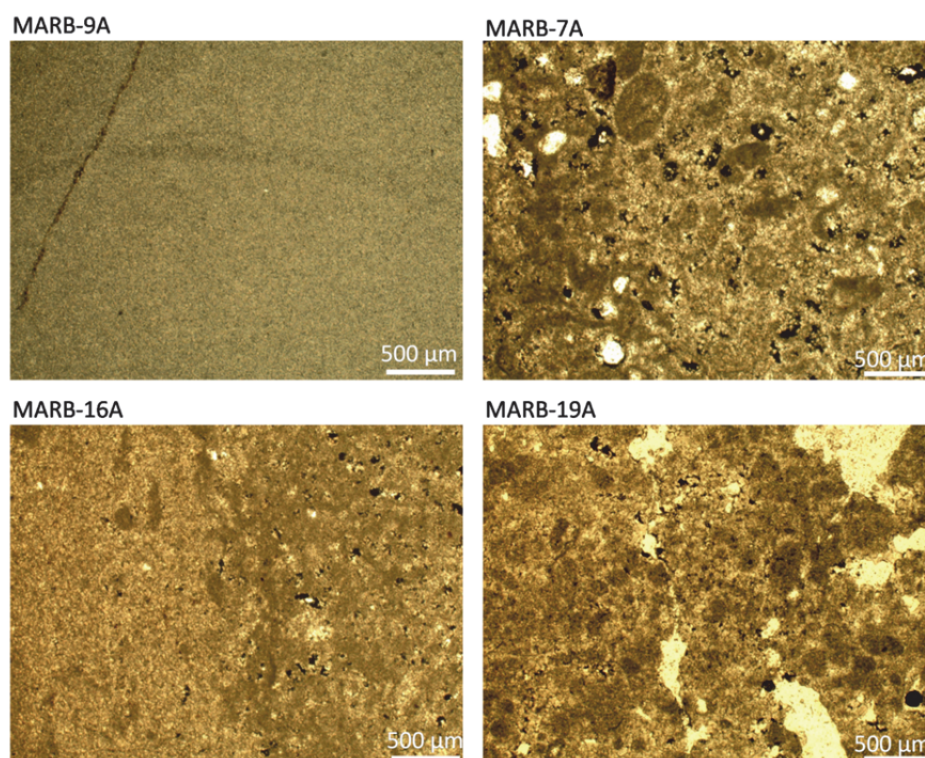


Figura 4. 10. Fotografías de las láminas delgadas estudiadas en la facies M1 del sondeo SE-4, cuya profundidad se han mencionado en la Figura 4.9.

En base a estos estudios anteriores, y a las observaciones a visu, el grupo C se ha interpretado como un carbonato, en general como una caliza, en algunos tramos micrítica, y en algunos puntos, dolomítica (dolomitización parcial), tal como se ha observado en el estudio de lámina delgada.

Grupo D: tramo 90 – 106 m

A partir de los 93 m de profundidad, el valor medio de radioactividad gamma natural es ligeramente más bajo que en el tramo anterior (<28 API). La respuesta del U y la relación U/K es elevada en todo el tramo, por la presencia del U en las fracturas.

El valor de la lectura de resistividad normal larga también asciende ligeramente con respecto al tramo anterior, con valores entre 881 y 1370 ohm·m (Figura 4.9). El valor de la velocidad de ondas P en este tramo se incrementa ligeramente, sobre todo a partir de los 94 m de profundidad, aunque sigue siendo bajo para tratarse de una formación carbonatada (2100 – 3250 m/s), lo que podría deberse a la existencia de numerosas oquedades a lo largo de todo el tramo.

La imagen acústica de la pared del sondeo muestra una textura más uniforme, con menor porosidad que la observada hasta entonces, cuyas observaciones a visu de los testigos así lo confirman.

La muestra MARB-16A, tomada a los 93.4 m de profundidad, y estudiada en lámina delgada, deja ver una diferencia en la tasa de sedimentación puesta de manifiesto por la existencia de dos franjas diferenciadas: una franja izquierda más clara y de mayor homogeneidad textural constituida por micrita recristalizada (Figura 4.10), donde apenas se pueden diferenciar los cristales, y una franja derecha con mayor porosidad donde se puede observar una textura cristalina sobrepuesta a la textura granular, es decir una textura relicta. La muestra MARB-16A se ha interpretado como una dolomicrita, con un tamaño de los cristales menor que el observado en la muestra MARB-7A.

El estudio de otra muestra, tomada a los 100 m de profundidad (Ref.: MARB-19A), presenta textura muy homogénea, de aspecto cristalino, formada por cristales de dolomita (forma romboédrica característica) de un tamaño muy fino, generalmente entre 30 y 40 μm , llegando en algunos casos a 80 - 100 μm . Se observa en la matriz abundante concentración de nódulos marrónáceos con la misma composición pero de tamaño de grano no distinguible (reminiscencias de la caliza de la que proviene, posiblemente un Packstone peloidal). Presenta dolomitización agrupada en núcleos policristalinos dispuestos al azar, y la recristalización ha rellenado algunas fracturas. Esta muestra se ha interpretado como Dolomicrita.

En base a estas observaciones realizadas a visu, junto con la interpretación litológica realizada a partir de las diagráfias –valores de GR muy bajos, y valores de resistividad superiores al tramo anterior– se ha interpretado el tramo D como una dolomía; los análisis al microscopio de dos muestras han revelado que se trata de una dolomicrita. Un estudio de DRX realizado sobre esta muestra indica que la fase mineral principal es la dolomita y el cuarzo.

4.1.2 Interpretación litológica de la facies Muschelkalk medio (M2) y la facies Muschelkalk inferior (M1) en el sondeo Reus-1

Siguiendo la metodología aplicada en el sondeo somero SE-4, para la identificación de la facies M2 y M1, se ha realizado una representación gráfica del registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) y velocidad de ondas P (V_p), además de utilizar el registro de resistividad lateral profunda (LLD), visible en la Figura 4.11-a como código de colores, del tramo del sondeo Reus-1 entre 2039 y 2150 m, correlacionado con el sondeo SE-4.

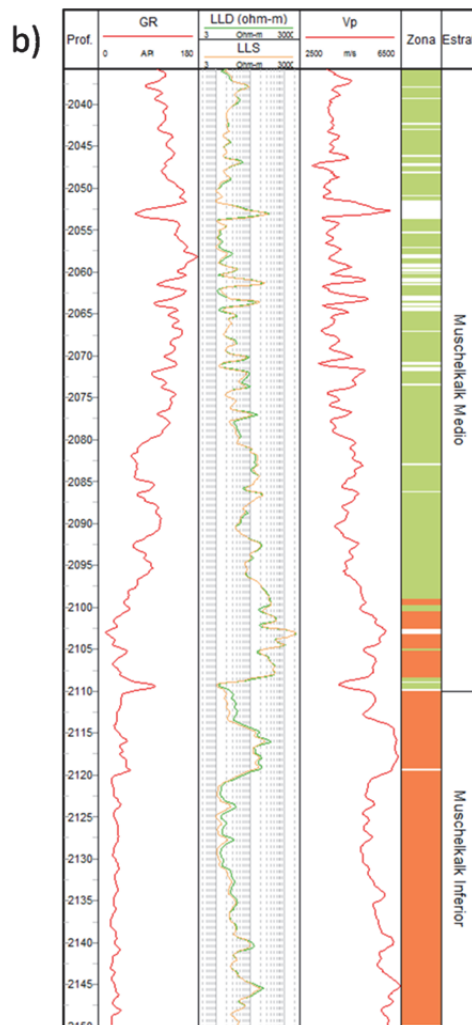
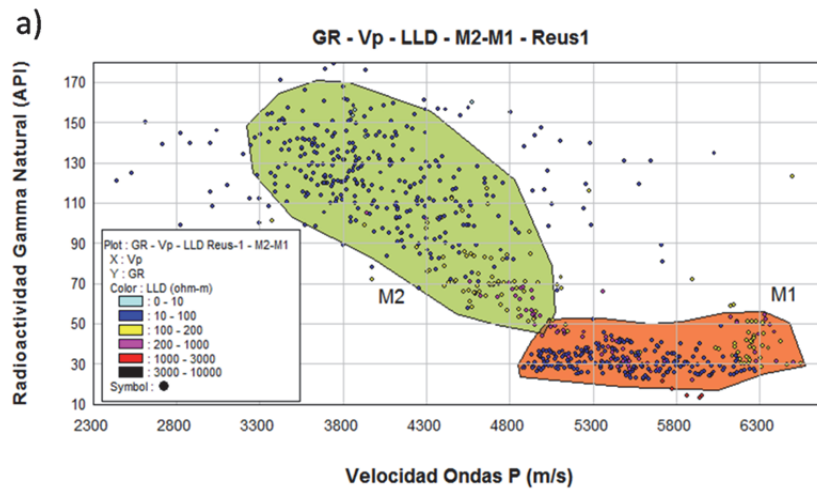


Figura 4. 11. a) *Cross-plot* de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente a la velocidad de ondas P (Vp) y Resistividad Lateral Profunda (LLD) entre los 2039 y 2150 m de profundidad. Se han distinguido dos grupos de puntos (M1, M2). b) registros, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), resistividades lateral profunda (LLD) y lateral somera (LLS), velocidad de ondas P (Vp), columna de zonación extraída del *cross-plot* y columna cronoestratigráfica.

El grupo de puntos resaltado con color verde en el *cross-plot* se ha asignado a la facies M2; presentan los valores más elevados de radioactividad gamma natural y los más bajos de velocidad de ondas P de todo el tramo de sondeo estudiado. El conjunto de puntos resaltados en color naranja se ha identificado con la facies M1, y presenta los valores más pequeños de GR y más elevados de velocidad de ondas P, junto con los valores más elevados de resistividad (colores azul y amarillo). Estos dos grupos de puntos se han proyectado en una columna junto con algunos de los registros geofísicos disponibles para el sondeo Reus-1 (Figura 4.11-b).

➤ Interpretación litológica de la facies Muschelkalk medio (M2) en el sondeo Reus-1

El intervalo del sondeo Reus-1 correlacionado con la zona identificada como confinante en el sondeo SE-4, corresponde al tramo comprendido entre los 2038 y 2100 m de profundidad. Para la interpretación litológica en detalle de esta zona, se han representado en una gráfica de interrelación los valores de radioactividad gamma natural (GR) y resistividad lateral profunda (LLD) (Figura 4.12). En este caso, los valores de densidad aparente (RHOB) proporcionan la escala de color de los puntos representados. Se han diferenciado dos grupos de puntos en dicho *cross-plot* (A, B), que se explican a continuación con más detalle:

Grupo A: tramo 2036 – 2080 m

Existe en este grupo de puntos un predominio de valores de velocidad de ondas P (V_p) comprendidos entre 3000 y 3500 m/s, es decir los más bajos de todo el tramo Muschelkalk medio, de altos valores de radioactividad gamma natural (91 – 180 API) y bajos valores de resistividad lateral profunda. También la resistividad lateral somera (LLS) es baja en todo este tramo (27 - 45 $\text{ohm}\cdot\text{m}$), que suelen ser valores propios de una geología arcilloso-limosa. Los perfiles de los registros en este tramo analizado presentan mucha irregularidad lo que indica que se trata de materiales poco compactos y fácilmente erosionables.

A la profundidad de 2053 m, se observa una anomalía de la tendencia general en las diagrfias con respecto a lo descrito (marcado con signo de interrogación en la Figura 4.12) un nivel con un valor elevado de resistividad LLD (500 $\text{ohm}\cdot\text{m}$), correlacionándose con un valor mínimo de GR, y asimismo, se corresponde también con un máximo de densidad RHOB de 2.70 g/cm^3 y una velocidad de ondas P muy elevada (del orden de 6000 m/s). Teniendo en cuenta los valores de estos registros, podría tratarse de un nivel carbonatado, aunque no resulta definitiva la interpretación.

Según los resultados obtenidos a partir de los análisis de DRX llevados a cabo a diferentes profundidades, hay presencia de yeso (resultados detallados de DRX en Anexo III). Los ripios analizados por DRX a la profundidad de 2036 m (Ref.: MREUS-1), dan como resultado, como mineral principal dolomita, y como minerales secundarios yeso. Los resultados de los análisis de DRX para una muestra tomada a los 2056 m (Ref.: MREUS-2), dan como mineral principal yeso, y como minerales secundarios, dolomita, cuarzo y minerales de la arcilla. Otra muestra analizada, tomada a los 2068 m de profundidad (Ref.: MREUS-3, en la foto de la Figura 4.12) reveló la presencia de yeso y cuarzo como componentes principales, y como componentes secundarios, dolomita y minerales de la arcilla (Anexo III).

Los tramos englobados en el grupo de puntos A, por las propiedades de los registros estudiados, se han interpretado como una formación esencialmente lutítica, muy homogénea, como así lo indican las respuestas elevadas de GR, y los valores de velocidad, así como de densidad ($2.3 - 2.67 \text{ g/cm}^3$). Los perfiles de las curvas se ven altamente irregulares (el perfil del *caliper* lo confirma) indicando que se trata de un material poco compacto en general. Los valores de resistividad lateral profunda indican también la naturaleza lutítica de la formación, con valores entre 20 y 120 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. Complementariamente, los análisis de DRX revelan un elevado contenido yesífero en este tramo.

Estos materiales constituyen un potente espesor, que alcanza los 55 m netos, y como se puede observar en la Figura 4.12, aparentemente muy homogéneo.

Grupo B: tramo 2080 - 2108 m

El grupo de puntos englobado bajo la letra B en el *cross-plot*, corresponde a las mayores resistividades, y los valores más bajos de radioactividad gamma natural (GR) con respecto al grupo A, además de presentar los valores de densidad aparente (RHOB) más elevados, superiores a 2.75 g/cm^3 . El perfil del *caliper* mecánico (diámetro del sondeo), el de densidad RHOB y el de GR, se hacen más uniformes, lo que indica que la formación es más competente.

Desde 2080 a los 2096 m de profundidad, las resistividades LLD y LLS experimentan un incremento general y se observan niveles con valores en torno a los $120 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ de media, así como también el valor de la densidad DRHO (2.75 g/cm^3) y de la velocidad de ondas P, que presenta un valor ya de 4470 m/s en esos intervalos (Figura 4.12). A partir de 2096 m de profundidad y hasta los 2108 m, la resistividad eléctrica experimenta otro incremento mayor ($390 - 2100 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), y la radioactividad GR desciende hasta valores bajos (45 API). Los valores de densidad presentan valores muy elevados, superiores a 2.8 g/cm^3 , y la velocidad de ondas P indica en este tramo valores también muy elevados, superiores a 4800 m/s.

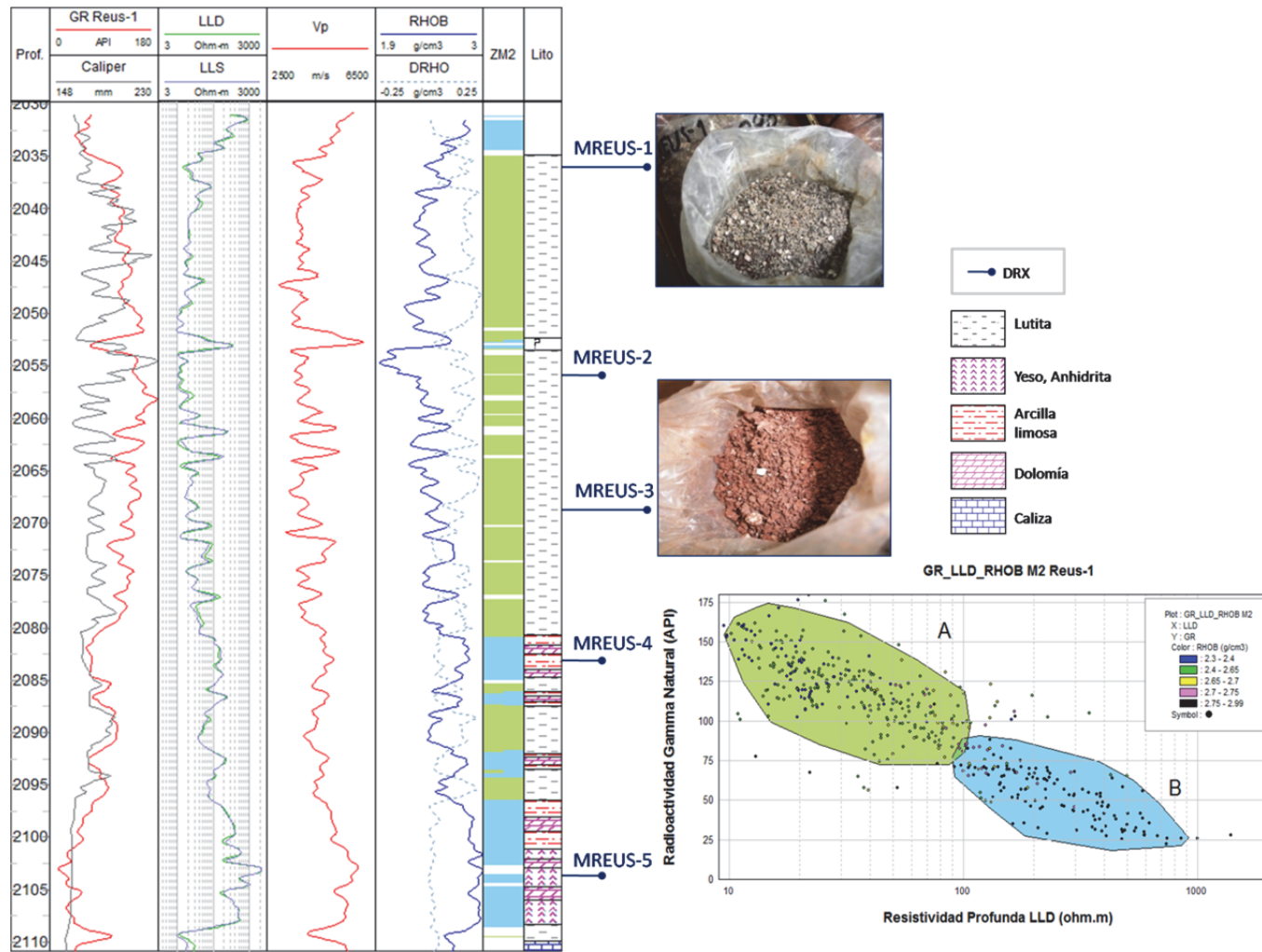


Figura 4. 12. *Cross-plot* de Radioactividad Gamma Natural (GR) y Resistividad Lateral profunda (LLD) frente a la densidad aparente (RHOB) para la facies Muschelkalk M2 en el sondeo Reus-1: se han diferenciado 2 grupos de puntos (A, B). Diagramas para el tramo estudiado, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *Cáliper* mecánico, perfil de resistividad lateral profunda (LLD) y somero (LLS), velocidad de ondas P (Vp), densidad aparente (RHOB) y curva de corrección por densidad (DRHO), columna con la zonación establecida (ZM2) y columna litológica interpretada. Se indican las profundidades de los análisis de DRX realizados, y dos fotos de ripios.

A las profundidades de 2084 y 2104 m, se analizaron dos muestras de ripios (Referencias MREUS-4 y MREUS-5 respectivamente), y se ha podido constatar la presencia de yeso como mineral principal, y de dolomita y cuarzo como minerales secundarios.

Se ha interpretado este grupo B como una formación lutítica con intercalaciones de arcillas limosas y algún nivel de dolomía hasta la profundidad de 2096 m, en que la formación se hace aún más limosa y parece haber presencia de carbonatos como componentes secundarios (dolomía). Los valores elevados de densidad aparente, así como baja respuesta de GR, están indicando que el tramo B está enriquecido con evaporitas, como así lo atestiguan los análisis mediante DRX, que han revelado un elevado contenido en yeso y anhídrita.

El espesor de las capas de lutitas en este tramo ronda los 3 o 4 m, y tanto las capas de arcilla limosa como las intercalaciones de carbonatos y de sulfatos (yeso, anhídrita) presentes, no superan los 2 m de espesor.

Debido a la presencia de carbonatos, se ha considerado este tramo como un tramo de transición a la facies Muschelkalk inferior.

➤ Interpretación litológica de la facies Muschelkalk inferior (M1) en el sondeo Reus-1

En base a la correlación establecida en el Capítulo 3, el tramo identificado como almacén en el sondeo SE-4 se ha identificado y correlacionado a partir de los 2110 m de profundidad en el sondeo Reus-1, identificándose a su vez como la facies M1.

El registro del *cáliper* mecánico está indicando, con un perfil muy uniforme, que todo el intervalo estudiado en la facies Muschelkalk M1 del sondeo Reus-1 presenta un elevado grado de competencia en los materiales.

Construyendo la gráfica de interrelación con el registro de velocidad de ondas P (V_p), la respuesta de resistividad lateral profunda (LLD) y de densidad aparente (RHOB) para la facies Muschelkalk inferior del tramo estudiado se han distinguido dos grupos de puntos (Figura 4.13). Los dos grupos muestran valores muy elevados de V_p (> 4800 m/s), y se han resaltado con colores morado (grupo C) y verde (grupo D).

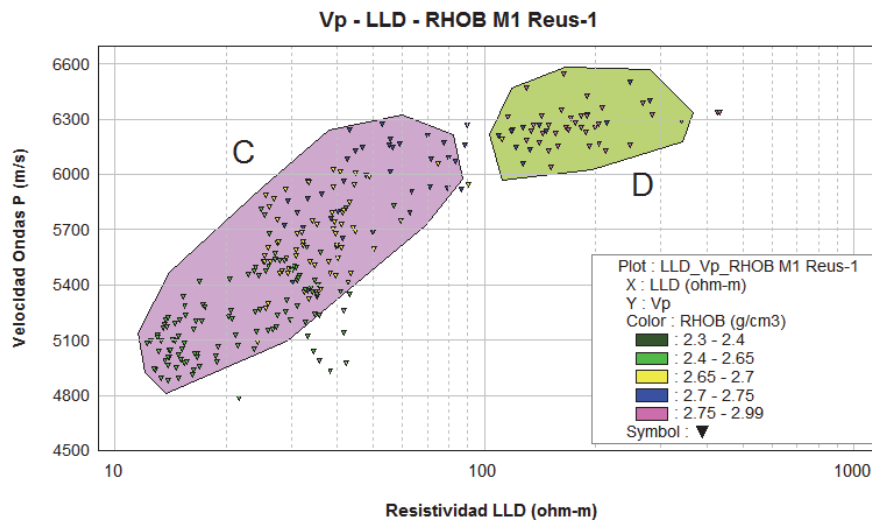


Figura 4. 13. *Cross-plot* de la velocidad de ondas P (Vp) y resistividad lateral profunda (LLD) frente al valor de la densidad aparente (RHOB) para el tramo 2110 – 2147 m del sondeo Reus-1, correspondiente a la facies M1. Se han distinguido dos grupos de puntos (C, D).

Estos grupos de puntos se han proyectado en vertical en una columna de zonación junto con algunos de los registros en la facies M1 del sondeo Reus-1 (Figura 4.14). Los límites de las zonaciones establecidas no coinciden exactamente con los tramos litológicos interpretados, debido a que la zonación es un método orientativo, que da una indicación de la presencia de una determinada litología, cuyos límites dependerán finalmente del conjunto de registros a analizar.

Grupo C: tramos 2109 – 2114 m, 2120 – 2139 m y 2141 – 2144 m

Presenta los valores más bajos de resistividad LLD de la zona almacén estudiada, inferiores a 100 ohm·m, así como los valores más bajos de radioactividad gamma natural (< 30 API). Los valores de velocidad de ondas P son elevados, estando comprendidos entre los 4800 y 6000 m/s (Figura 4.14). El valor de la densidad aparente (RHOB) está comprendido entre los 2.4 y los 2.7 g/cm³.

Un análisis de DRX a una muestra de ripios a la profundidad de 2128 m (Ref. MREUS-7) indica como mineral principal dolomita, y yeso y cuarzo como minerales secundarios, y como minerales trazas cabe destacar la presencia de calcita y minerales de la arcilla.

Se han interpretado estos tramos, en base a estos parámetros y al valor de la velocidad de ondas P y de resistividad, como una caliza en general (dolomítica posiblemente), distribuida en

forma de potentes paquetes de 2 a 20 m de espesor, muy homogénea, sin intercalaciones litológicas significativas. Al inicio del tramo, de los 2110 a los 2112 m de profundidad aproximadamente, se ha identificado un posible intervalo de apenas de un metro de espesor, de calizas margosas, por su elevado valor de radioactividad gamma natural, y una resistividad y velocidad de ondas P aún por debajo de lo que se esperaría de una formación carbonatada propiamente dicha.

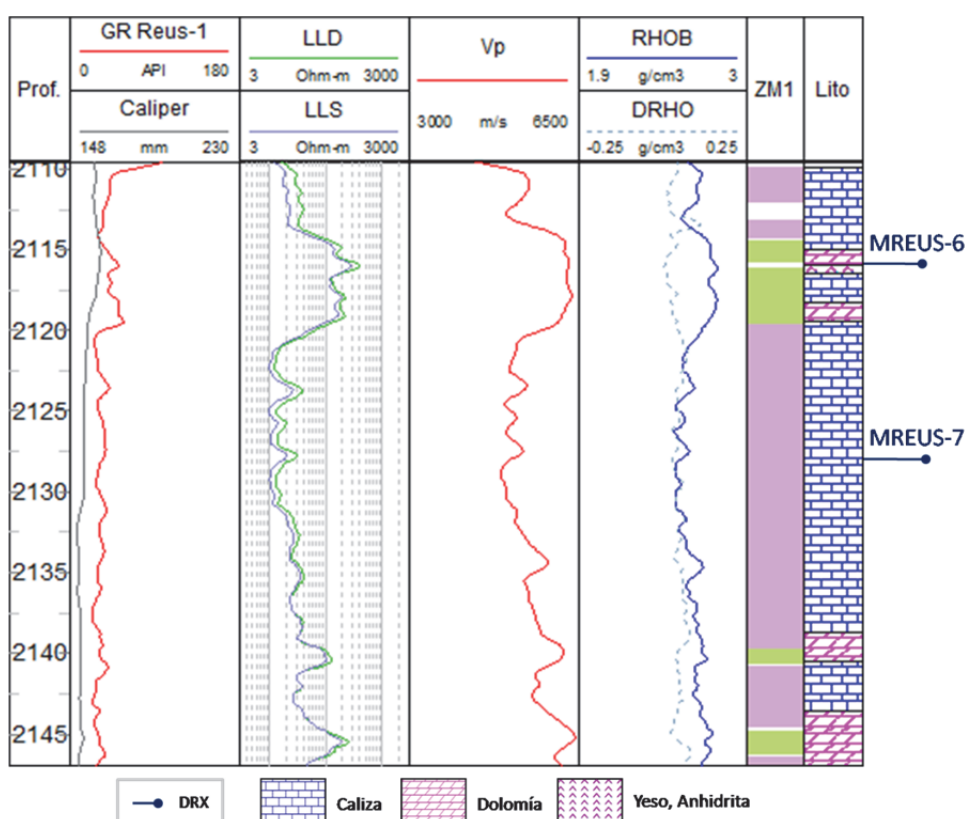


Figura 4. 14. Diagramas en el tramo estudiado de la facies M1 del sondeo Reus-1, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *Cáliper* mecánico, perfil de resistividad lateral profunda (LLD) y somera (LLS) en escala logarítmica, velocidad de ondas P (Vp), densidad aparente (RHOB) y densidad corregida (DRHO), columna de zonación a partir del *cross-plot* (ZM1) y la columna litológica interpretada. Se indican las profundidades de los análisis de DRX realizados.

Grupo D: tramos 2114 – 2120 m, 2139 – 2141 m y 2144 – 2147 m

El grupo de puntos englobado bajo la letra D presenta los valores más elevados de resistividad lateral profunda (LLD) y somera (LLS) de toda la zona almacén del tramo estudiado, con valores de LLD en general entre 130 y 430 ohm·m (Figura 4.14). Los perfiles de velocidad de ondas P y de densidad (RHOB) muestran una tendencia muy regular, con valores superiores a 6000 m/s para el primero y valores comprendidos entre 2.7 y 2.8 g/cm³. Estos valores de

densidad son los habituales que se esperaría para una formación de caliza o dolomía pura; de 2.66 – 2.74 para la caliza y 2.8 – 2.99 g/cm³ para la dolomía (Serra, 2008; Dresser Atlas, 1983; Schlumberger, 1989a).

Se ha llevado a cabo un análisis mediante DRX de una muestra de ripios a la profundidad de 2116 m (Ref. MREUS-6). El resultado indica la presencia de yeso como mineral principal, y como minerales secundarios, anhidrita y dolomita.

En base a todos estos parámetros, en especial al valor de densidad y velocidad Vp, se ha interpretado el grupo D en general como tramos dolomíticos de reducido espesor (1 – 4 m).

4.1.3 Conclusiones

La interpretación de las diferentes litologías atravesadas por el sondeo SE-4, y plasmadas en la columna estratigráfica suministrada inicialmente por el IGME, se ha modificado de acuerdo con las interpretaciones realizadas a partir de todos los análisis de datos disponibles, y del análisis y estudio de las diagráfias existentes. Esta interpretación ha sido llevada a cabo a una mayor resolución que la disponible inicialmente, mejorando los diferentes aspectos de la misma.

En base a las interpretaciones litológicas realizadas, se ha identificado la facies Muschelkalk inferior o M1 del sondeo SE-4 (Arbolí) como la formación geológica reservorio, localizándose entre los 67 y los 106.6 m de profundidad (final del sondeo). Como su formación confinante en el mismo sondeo se ha identificado, entre los 11 y los 67 m de profundidad, la facies Muschelkalk medio. El límite entre ambas facies, previamente establecido por el IGME, ha sido modificado ligeramente, situándolo en los 67 m.

Se han podido correlacionar estratigráficamente, mediante el uso de diagráfias, las facies M2 y M1 identificadas en el sondeo SE-4 con sus análogas en el sondeo petrolífero antiguo y profundo Reus-1, localizándose éstas entre los 2039 y 2110 m aproximadamente y los 2110 y 2150 m de profundidad respectivamente. El sondeo Reus-1 se encuentra a 18.5 km de distancia del sondeo SE-4 en dirección Sureste (SE), por lo que se confirma una considerable continuidad lateral de facies.

Se han identificado dos zonas litológicamente diferentes en ambos sondeos:

- Una zona superior, donde las diagráfias muestran valores elevados de Radioactividad Gamma Natural y valores bajos de Resistividad Normal, además de velocidades de ondas P bajas. El grado de compactación es pequeño tal como muestran los perfiles del diámetro del

sondeo (*cáliper*) y la irregularidad de los perfiles de los demás registros. Esta zona ha sido identificada como la facies Muschelkalk medio o M2, y se ha interpretado como una zona arcilloso-lutítica, con niveles centimétricos a capas de espesor decamétrico. Se han interpretado abundantes intercalaciones evaporíticas (de yeso y/o anhidrita) en forma de niveles de espesor milimétrico a centimétrico, aunque también en forma dispersa. Los resultados de DRX y análisis de muestras en lámina delgada, confirman esta litología. En ocasiones aparece una facies más limosa, sobre todo al final del tramo. El espesor de esta zona arcilloso-lutítica en SE-4 ronda los 25 m, mientras que en Reus-1 alcanza los 75 m, ambos con una notable homogeneidad, a excepción de la zona de transición con M1.

- Una segunda zona, más profunda, cuyas lecturas de las diagráfias presentan valores bajos de Radioactividad Gamma Natural y valores elevados de Resistividad eléctrica, además de un grado de compactación elevado visible en el perfil del *cáliper*. Los valores de velocidad de ondas P son mayores que en la facies Muschelkalk M2, observándose también un incremento en el valor de la densidad aparente. Todos los registros muestran un perfil más suave, indicando que se trata de litologías más compactas. Esta zona ha sido identificada como la facies Muschelkalk inferior o M1, y se ha interpretado como una zona de naturaleza carbonatada (calizas y dolomías). El espesor de esta zona en el sondeo SE-4 es potente, alcanzando los 40 m, mientras que en el sondeo Reus-1, se han identificado paquetes de calizas entre 2 y 20 m de espesor, con intercalaciones esporádicas de niveles de dolomías que oscilan entre 1 y 4 m de espesor.

Si se comparan los *cross-plots* (Figura 4.15) de los registros de GR frente a Vp y resistividad normal (SE-4) o lateral (Reus-1) para los tramos estudiados en los sondeos SE-4 y Reus-1 (se ha optado por esta representación por los registros comunes en ambos sondeos), se diferencian dos grupos de puntos en ambos sondeos, que han sido identificados como las facies M2 (color verde) y las facies M1 (color naranja) en cada sondeo. En la gráfica correspondiente a SE-4 la distribución de puntos está controlada exclusivamente por el valor de GR, mientras que en Reus-1, ambos parámetros, GR y Vp, controlan la distribución. Lo más destacado de ambas gráficas son los valores tan considerablemente diferentes en la velocidad de ondas P, más elevados en las facies de Reus-1 (3300 – 6500 m/s) que en pertenecientes a SE-4 (2000 – 3200 m/s). Las causas de esta diferencia de valores radican, por una parte, en el incremento de la compactación de los materiales en Reus-1, debido a la diferencia de profundidad existente (más de 2000 m aproximadamente entre las facies someras y las profundas), y por extensión, en la naturaleza textural de las formaciones (el incremento de presión por profundidad, implica reordenación estructural y compactación de granos).

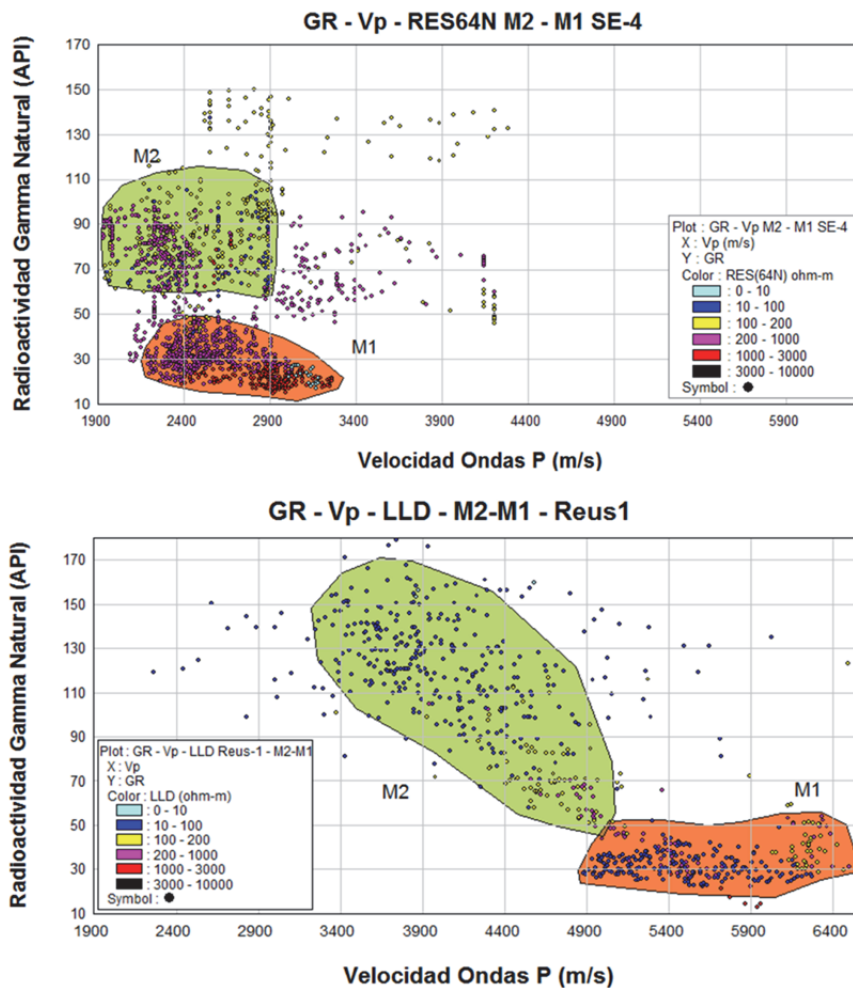


Figura 4. 15. Cross-plots resultantes para las facies M2 y M1 del sondeo SE-4 (imagen superior) y Reus-1 (inferior), con los registros de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente a Velocidad de ondas P (Vp) y Resistividad normal (imagen superior) y lateral (inferior). Se han diferenciado dos grupos de puntos en ambos sondeos.

La presencia de un elevado contenido evaporítico identificado en la facies M2 de SE-4 provoca que los valores de Radioactividad Gamma Natural (GR) leídos sean inferiores a los esperados en una formación arcilloso-lutítica, oscilando entre 60 y 110 API mayoritariamente. En cambio, en la facies M2 de Reus-1, la Radioactividad Gamma Natural leída, alcanza valores en general más elevados, hasta los 170 API. Esto podría indicar una menor presencia de yeso y anhidrita en dicha facies, y por tanto, una menor ductilidad en los materiales confinantes.

La existencia de dolomitización parcial en prácticamente la totalidad de la facies M1 del sondeo SE-4, sobre todo a partir de los 85 m de profundidad, podría provocar la atenuación de la amplitud de la señal sónica, y afectar a la propagación de las ondas sónicas de forma que retrasa la llegada de las mismas en dicho sondeo. Las propiedades petrográficas, geoquímicas y mineralógicas de la dolomita evolucionan con la profundidad (Machel, 1997, Mountjoy, 1999), y por tanto, el resultado de la diagénesis suele ser una dolomita con diferente textura y

composición. Este hecho provocará por tanto, lecturas de registros tan diferentes dentro de una misma formación dolomítica. En este estudio no sabemos si en la facies M1 del sondeo profundo Reus-1 existe dolomitización, pero de existir, habría que reconocer primeramente el modelo de dolomitización que presenta (mezcla, enterramiento, etc.), y si los fluidos de formación responsables son independientes de las condiciones del subsuelo.

Las facies M2 de ambos sondeos, presentan espesores aceptables como formaciones sello (Chadwick *et al.*, 2008), en ambos casos, superiores a los 20 m. Asimismo, la facies M1 en el sondeo SE-4 presenta un espesor adecuado como formación almacén, superior a los 40 m; en el sondeo Reus-1, la facies carbonatada M1 presenta también un rango de espesor aceptable (>20 m).

No hay indicios de la existencia de una zona fallada en los tramos estudiados de ambos sondeos, a excepción del tramo 61.5 – 65 m de profundidad, correspondiente a la zona de transición de la facies M2 a la facies M1 en el sondeo SE-4.

En la Tabla 4.3, se muestran algunos de los parámetros estimados y registrados en el sondeo SE-4 y en el sondeo profundo Reus-1. Se observa que los valores de Vp son en general más elevados en el sondeo profundo de petróleo, debido a una mayor profundidad y por tanto, a una mayor compactación del material.

Tabla 4. 3. Parámetros estimados y registrados en los sondeos SE-4 y Reus-1: Vsh = volumen de arcillosidad; Vp = velocidad de ondas P; Rt = resistividad Normal profunda; SP = potencial espontáneo.

	Formación	Litología	Vsh (%)	Vp (m/s)	Rt (ohm·m)	SP (mV)
SE-4	Confinante	Lutita / Arcilla	-	1900 - 2900	50 - 550	470 - 552
	Reservorio	Caliza micrítica y dolomítica	14 - 35	2000 - 3000	540 - 790	487 - 537
		Dolomicrita	6 - 14	2500 - 3500	940 - 1300	460 - 530
Reus-1	Confinante	Arcilla / Lutita	-	3000 - 3500	27 - 45	-
	Reservorio	Caliza	4 - 8	4800 - 6000	< 100	-
		Dolomía	5 - 7	> 6000	> 100	-

4.2 Sondeo SB-4 (Bacarot – Alicante) y sondeo Benejúzar-1 (Benejúzar – Alicante)

En la Tabla 4.4, se presenta un resumen de las diagrafas adquiridas en esta tesis, en el sondeo somero SB-4. Se dispuso además del registro potencial espontáneo (SP) realizado por la empresa CGS. Aunque también se ha contado con los registros de resistividad Normal corta (RES16N) y resistividad Normal larga (RES64N), finalmente no se han utilizado como base interpretativa pues presentan lecturas excesivamente uniformes y bajas (<10 ohm·m), causadas posiblemente por niveles elevados de salinidad en el agua de la formación, y ello podría conducir a error en la interpretación litológica.

Como apoyo a la interpretación litológica, se analizaron un total de 5 muestras en polvo mediante DRX (resultados en Anexo III), y 6 muestras en lámina delgada.

Tabla 4. 4. Registros adquiridos en el sondeo SB-4; Radioactividad Gamma Natural (GR), imagen acústica de sondeo (ABI), registro sónico de onda completa (FWS), y muestras analizadas, mediante Difracción de Rayos X (DRX) y mediante lámina delgada (LD) en la Fm. Torremendo y Fm. Las Ventanas del sondeo somero SB-4.

SB-4	Diagrafas				Muestras	
	GR	OBI	ABI	FWS	DRX	LD
Torremendo	0 - 167	27 - 141 m			3	-
Las Ventanas					2	6

En cuanto al sondeo profundo de petróleo Benejúzar-1, se ha dispuesto de los registros de Radioactividad Gamma Natural (GR), resistividad normal profunda (RES64N) y somera (RES16N) y el registro de velocidad de ondas P (Vp) para la interpretación litológica del tramo estudiado.

4.2.1 Interpretación litológica de la Formación Torremendo y la Formación Las Ventanas en el sondeo SB-4

Para el tramo 30 – 167 m de profundidad, se ha representado, mediante histograma, el valor de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente a su frecuencia. A partir de esta representación se han definido dos grupos de valores, que han servido para definir los límites litológicos de dicho registro. En la Figura 4.16-a, se puede observar el histograma resultante, y las dos agrupaciones de frecuencias obtenidas: el grupo resaltado con círculo verde, agrupa los puntos con los valores más elevados de GR (75 - 120 API), y grupo resaltado con círculo naranja, se

caracteriza por presentar los valores más bajos de GR (<40 API). Atendiendo a esta zonación, se ha identificado al primer grupo (color verde) como la formación geológica confinante (Formación Torremendo o Margas del TAP), y al segundo grupo de puntos (color naranja) como la formación geológica almacén (Formación Las Ventanas o Formación Calizas de Algas). En base a dicha representación, junto con las observaciones de los testigos y también del registro de imagen acústica (ABI), observado en la Figura 4.16, se ha establecido el límite entre ambas zonas a la profundidad aproximada de 107 m aproximadamente.

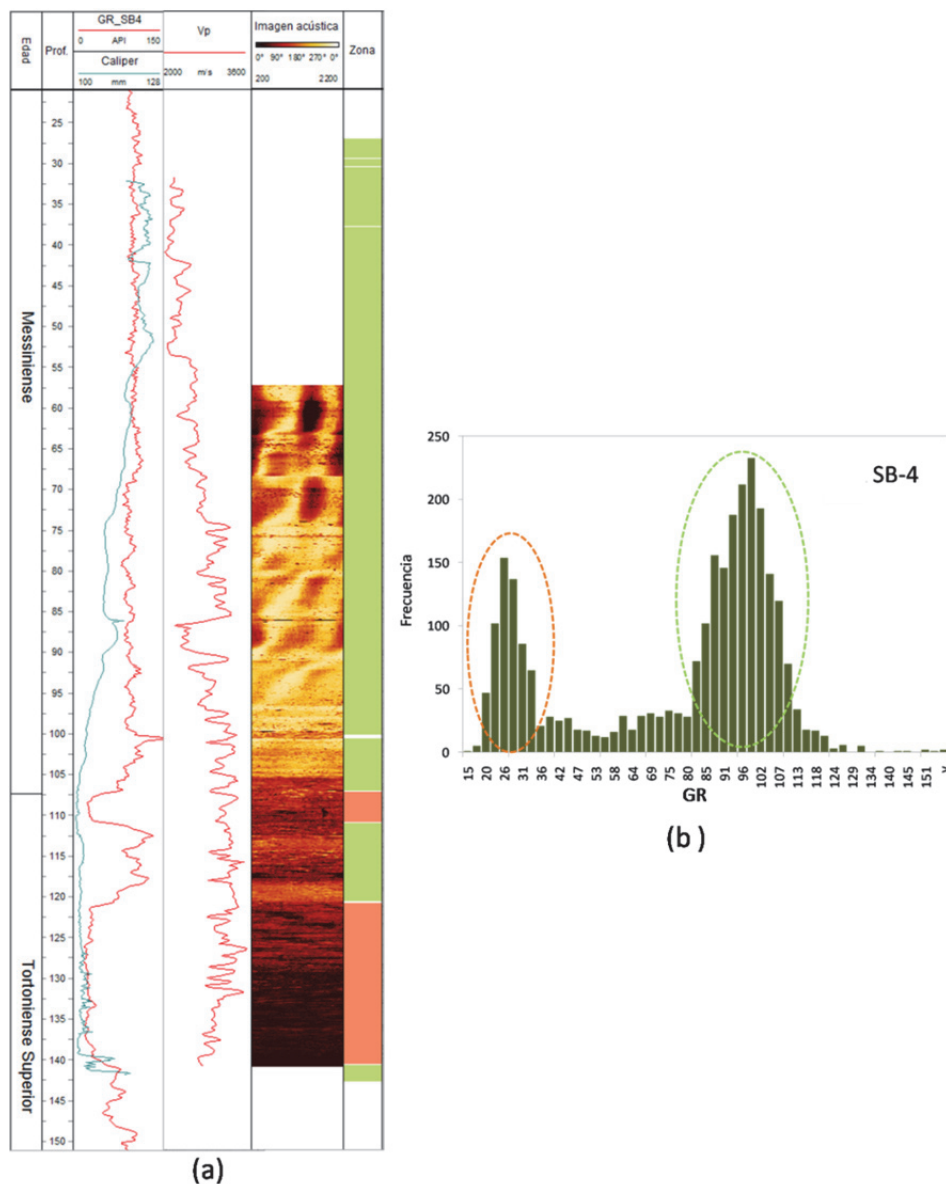


Figura 4. 16. (b) Histograma de valores de radioactividad Gamma Natural (GR) en el tramo 30 – 167 m del sondeo SB-4. Se han diferenciado dos grupos de frecuencias de GR, resaltadas con círculos naranja y verde. (a) Registros de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *caliper* acústico, velocidad de ondas P (Vp), imagen acústica de la pared del sondeo (ABI) y columna de zonación establecida a partir del histograma.

➤ **Interpretación litológica de la Formación Torremendo en el sondeo SB-4**

Hasta los 30 m de profundidad, el sondeo estaba entubado y solo se dispone del registro de radioactividad GR, y de las observaciones realizadas sobre muestras de mano para la interpretación litológica.

Para una mejor interpretación litológica de la Fm. Torremendo, se han representado, mediante *cross-plot*, los registros de radioactividad gamma natural (GR) y la velocidad de ondas P (Vp) entre los 30 y los 107 m (Figura 4.17). Se observa en la figura que el valor de GR es aproximadamente constante en toda la zona, con algunos pocos puntos cuya respuesta supera las 150 unidades API, y no se puede establecer ninguna zonación, por lo que se le ha asignado una misma litología a todo el tramo estudiado perteneciente a la Fm. Torremendo.

Los perfiles espectrales de U^{238} , Th^{232} y K^{40} se muestran bastante irregulares en todo este tramo, manteniéndose paralelos en muy pocos intervalos a lo largo de todo el sondeo. La mayor abundancia del K es una constante a lo largo de todo el tramo sello, indicándonos que se trata de una formación con contenido micáceo. De las relaciones espectrales Th/K, Th/U y U/K, destacan por encima de los demás algunas respuestas elevadas en la relación Th/U, por ejemplo a 17, 27 o 45 m de profundidad aproximadamente. Esta relación podría estar indicando cambios en las condiciones *Redox* del ambiente deposicional, y por tanto revela cambios litológicos (como intercalaciones de niveles arcillosos).

Los análisis de DRX efectuados sobre una muestra tomada a los 39 m de profundidad (Ref.: MBAC-4S) dieron como componente principal la calcita, y como componente secundario ankerita, además de trazas de mica. Los análisis realizados en muestras tomadas a las profundidades de 43 y 65 m (Ref.: MBAC-2S y MBAC-8S respectivamente), dieron en ambas los mismos resultados: calcita como componente principal, cuarzo, ankerita y dolomita como componentes secundarios, y como elementos trazas mica.

La imagen acústica de sondeo no muestra cambios estructurales ni aparentemente texturales, indicando la elevada homogeneidad de la formación rocosa en todo tramo (Figura 4.17). Apenas se han identificado estructuras sedimentarias y prácticamente hay ausencia de fracturas. Se observa un ejemplo de la homogeneidad estructural en el registro de imagen acústica de la Figura 4.17.

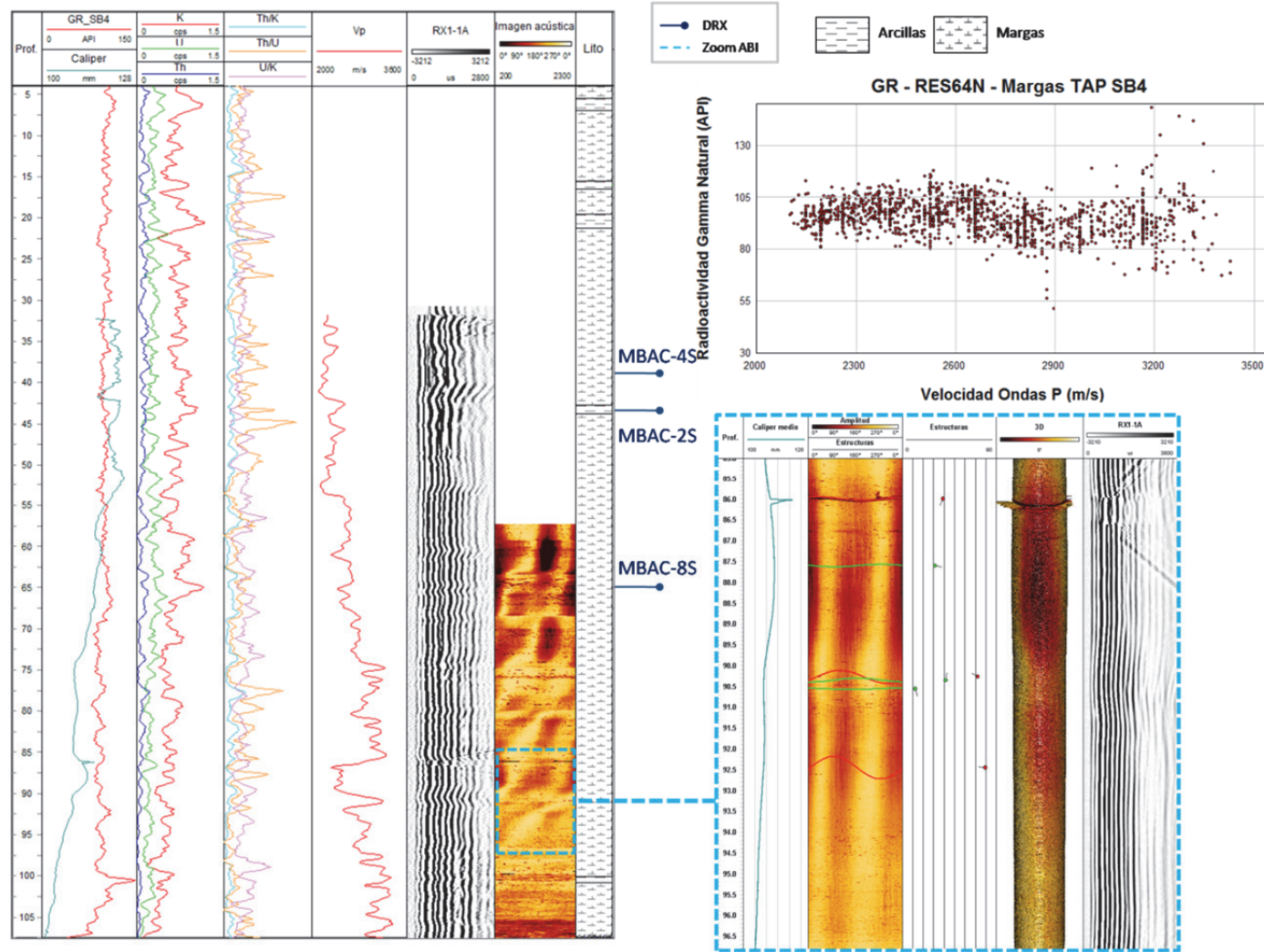


Figura 4. 17. Registros en la Fm. Margas del TAP en el sondeo SB-4, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural, *cáliper* acústico, valores de espectrometría del U, Th y K y las relaciones Th/K, Th/U y U/K, velocidad de ondas P (Vp), llegada de la señal acústica al primer receptor (RX1-1A), imagen acústica y columna litológica interpretada. *Cross-plot* (margen superior derecha) de velocidad de ondas P frente a GR, entre los 30y 107 m. Se indican las profundidades a las que se tomaron muestras para analizar mediante DRX, así como un ejemplo de imagen acústica con las estructuras sedimentarias y fracturas identificadas entre 85 y 96 m de profundidad.

Los resultados de DRX así como las observaciones a visu de los testigos y la respuesta del registro GR indican que este tramo está formado por un paquete potente de margas, de más de 50 m de espesor, con alguna capa intercalada de arcillas o lutitas, de espesor comprendido entre 1 y 2 metros aproximadamente.

➤ Interpretación litológica de la Formación Las Ventanas en el sondeo SB-4

El valor de profundidad del techo de esta formación difiere ligeramente del establecido previamente por el IGME, que se situaba en torno a los 108 m. El análisis e interpretación de las diagráfias ha permitido corregir ese dato.

Se ha asignado un valor de radioactividad gamma natural menor de 50 API para toda la zona almacén. En general, la Formación Las Ventanas en SB-4 se caracteriza por un descenso global de la respuesta de radioactividad gamma natural con respecto a la formación superior. El rango de Vp es muy amplio, situándose entre 2700 y 3500 m /s.

El registro sísmico solo ha alcanzado la profundidad de 142 m aproximadamente, con lo que se ha realizado el *cross-plot* de GR versus Vp hasta dicha profundidad (Figura 4.18). La diferenciación litológica en el resto del tramo se ha hecho en base a la zonación tomando como referencia fundamentalmente los registros de radioactividad y los estudios de láminas delgadas.

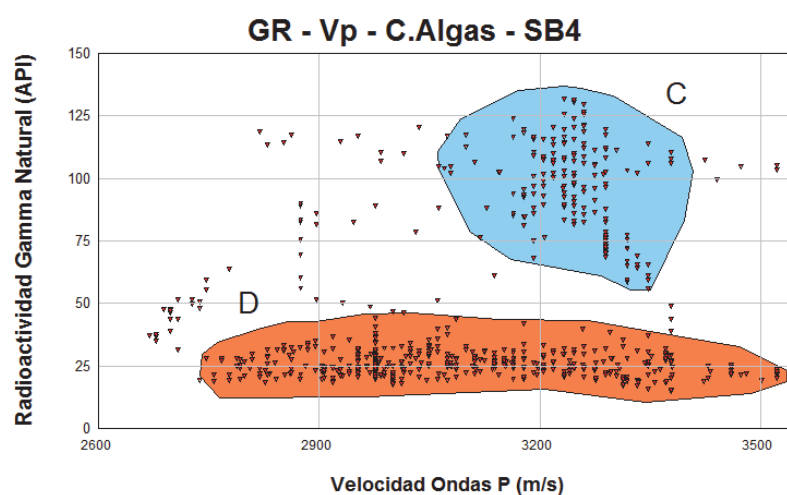


Figura 4. 18. *Cross-plot* de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente Velocidad de ondas P (Vp) para la Formación Calizas de las Ventanas del sondeo SB-4. Se han diferenciado dos grupos de puntos(C,D).

En el *cross-plot*, se han diferenciado dos grupos de puntos: uno resaltado en azul, cuyo valor medio de GR es superior a 80 API, y presenta lecturas de Vp entre 3160 y 3500 m/s, y otro grupo de puntos resaltado en color naranja, y cuyos valores de radioactividad gamma natural son bastante más bajos (27 API de media), y el valor de Vp es menor de 3100 m/s. Se les ha asignado la letra C y D respectivamente. La zonación establecida de esta forma se ha proyectado en una columna junto con el resto de las diagragfías utilizadas para la interpretación litológica (Figura 4.19).

A continuación se explican en detalle los grupos:

Grupo C: tramos 111 – 121 m y 140 – 154 m

Se caracterizan los tramos englobados en el grupo C por presentar en general, valores elevados de GR, hasta de 118 unidades API.

Desde los 111 a los 121 m de profundidad, se observa un valor medio de GR elevado (96 unidades API), lo que se ha interpretado como un elevado contenido margoso visible en las muestras de mano. El valor de la velocidad de ondas P, alcanza una media de 3000 m/s.

En los perfiles de las relaciones de espectrometría, cabe destacar simplemente un mayor valor general en la relación U/K, debido nuevamente al elevado contenido en materia orgánica (Figura 4.19). No obstante, muestra valores menores que los tramos del grupo D. Sí en cambio se observa una mayor abundancia del K. Esto se debe a la naturaleza más arcillosa del tramo C.

El perfil del *cáliper* acústico muestra homogeneidad, dando evidencias por tanto que en este tramo la formación se mantiene cohesionada.

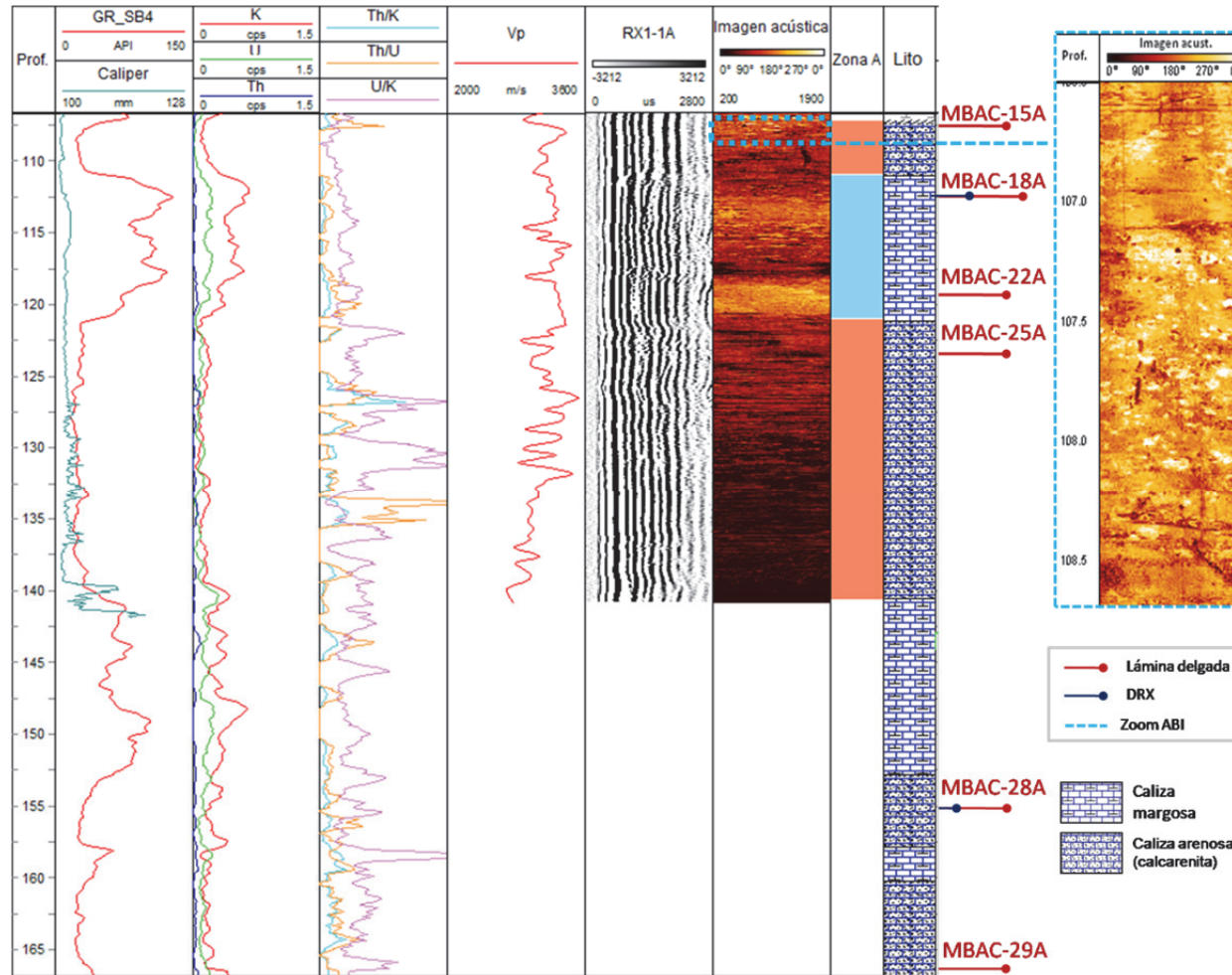


Figura 4. 19. Diagramas en la Fm. Calizas de las Ventanas en el sondeo SB-4, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* acústico, espectrometría de K, U y Th y las relaciones cualitativas Th/K, Th/U y U/K, velocidad de ondas P (Vp), llegada de la señal sónica al primer receptor (RX1-1A), imagen acústica (ABI), columna de zonación (Zona A) y columna litológica interpretada. Se indican las profundidades a las que se tomaron muestras para análisis de DRX y lámina delgada, y un ejemplo de imagen acústica correspondiente al tramo 106.5 – 108.6 m.

Una de las muestras estudiada en lámina delgada en este tramo C (Ref.: MBAC-18A) corresponde a la profundidad de 112 m aproximadamente. En el análisis al microscopio se trata de una roca sedimentaria carbonatada de textura grano-soportada (Figura 4.20-c). La muestra está formada únicamente por fragmentos de roca caliza bioclástica, de tamaño medio (de 1 a 4 mm de diámetro). Individualmente, cada fragmento presenta una geometría irregular, con bordes angulosos, y se compone de abundantes fragmentos bioclásticos, correspondientes principalmente a restos algales, restos de gasterópodos, bivalvos y espículas de equinodermos, envueltos por una matriz carbonatada micrítica, que puede alcanzar un tamaño microesparítico en los bordes de las cavidades de los restos fósiles. Se ha clasificado esta roca como una caliza tipo Grainstone de algas y bioclastos. A esta misma profundidad, se analizó una muestra mediante DRX en polvo, (misma referencia de muestra), dando como componente principal calcita, como componente secundario ankerita (Anexo III).

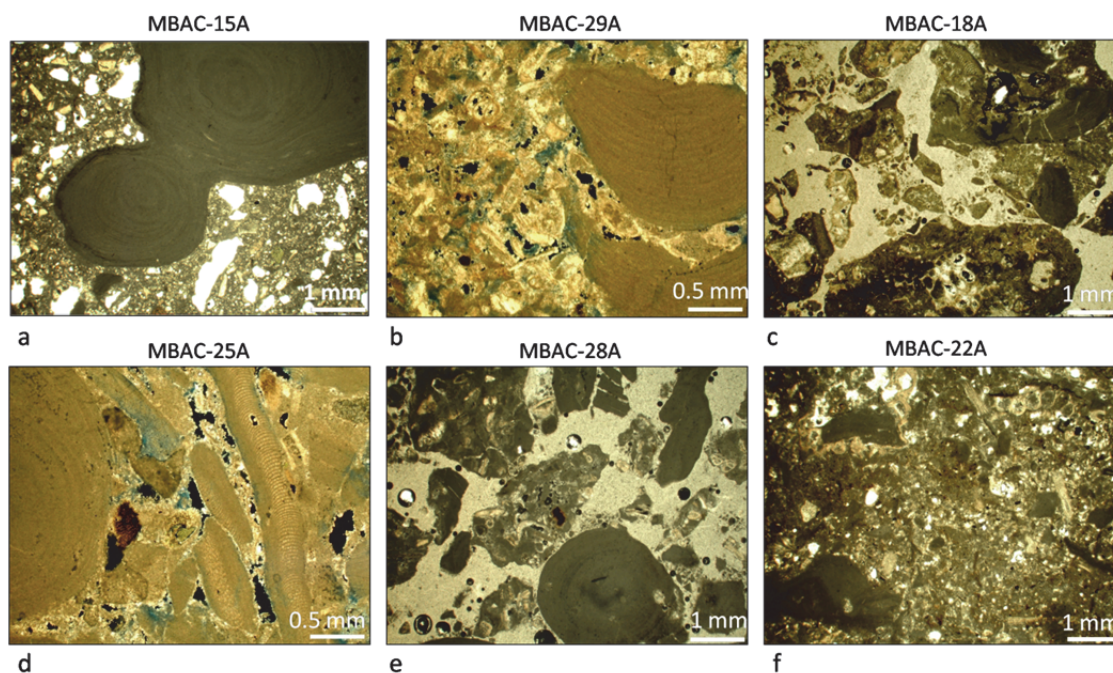


Figura 4. 20. Fotografías de las seis muestras en láminas delgadas estudiadas en la Fm. Calizas de las Ventanas del sondeo SB-4. Se indica la profundidad a la que fueron tomadas en la Figura 4.18. Las fotos a, b, d y f corresponden a una caliza Packstone bioclástica, y las fotos c y e, a una caliza Grainstone bioclástica.

A los 118 m de profundidad se estudió otra muestra en lámina delgada, con referencia MBAC-22A, (Figura 4.20-f). Se trata de una roca carbonatada de textura heterogranular. La muestra se compone de numerosos bioclastos, de naturaleza muy variada (gasterópodos, foraminíferos, equinodermos...) y tamaño muy heterogéneo (entre 0.5 a 1.5 mm). El espacio entre bioclastos está ocupado por una matriz carbonatada. En la fotografía de la Figura 4.21, se pueden

observar los bioclastos a simple vista. Se ha clasificado esta muestra como una caliza tipo Packstone bioclástica donde predominan las algas.

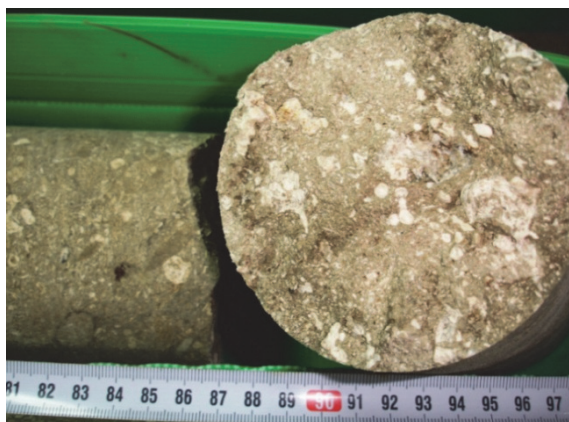


Figura 4. 21. Fotografía del testigo donde se tomó la muestra MBAC-22A a los 117.9 m de profundidad. Se pueden observar con nitidez los numerosos oncoides presentes.

Se estudió una última muestra en lámina delgada (Referencia MBAC-29A), tomada a los 167 m de profundidad, y a la cual no se dispone de registros geofísicos. La muestra corresponde a una caliza tipo Packstone bioclástico con abundante presencia de algas rodoíceas (Figura 4.20-b). Es de iguales características que la muestra MBAC-25A.

Se ha interpretado este tramo C como una caliza margosa con elevado contenido bioclástico, visible tanto en las muestras de mano como en el reconocimiento al microscopio. El elevado contenido margoso lo confirma la elevada respuesta en el registro de radioactividad gamma natural (GR) y la disminución en la velocidad de las ondas P.

Grupo D: tramos 107.3 – 111 m, 121 – 141 m, 153 – 167 m

Este grupo de puntos se caracteriza por presentar los valores más bajos de radioactividad GR de toda la zona almacén del sondeo SB-4 tal como se puede observar en el *cross-plot* de la Figura 4.18. El tramo comprendido entre los 153 m y los 167 m de profundidad se ha incluido en este grupo de puntos D, en base al registro GR y a las observaciones realizadas sobre muestras en lámina delgada y observaciones a visu.

El tramo 107.3 – 111 m de profundidad presenta valores de GR muy bajos, del orden de 30 unidades API, además del valor insignificante en la respuesta de los tres isótopos U, Th y K.

En este tramo, se ha estudiado una muestra en lámina delgada a la profundidad de 107.4 m, con referencia MBAC-15A (Figura 4.20-a). Se trata de una roca carbonatada con textura granosoportada, heterogranular, de tipo bioclástica, es decir constituida por partículas

esqueletales de organismos secretores de carbonato. Se han podido identificar numerosos restos fósiles, de diversa naturaleza (foraminíferos, espículas de equinodermos, bivalvos, etc., pero sobre todo algas rodofíceas...). En la fotografía de la lámina, se observa un fragmento de un alga rodofícea (alga roja) de tamaño mayor a 5 mm, rodeada de otros pequeños fragmentos bioclásticos. La matriz es micrítica. Según la clasificación de Dunham (1962), se trata de una caliza *Packstone* de algas y bioclástica.

De 121 a 140.5 m de profundidad, el perfil del *cáliper* acústico muestra una elevada irregularidad sobre todo a partir de los 127 m y hasta los 137 m, indicando poca consistencia del material. Se ha estudiado otra muestra en lámina delgada (Ref.: MBAC-25A), tomada a los 124.2 m de profundidad (Figura 4.20-d). El análisis al microscopio confirma que se trata de una roca carbonatada de textura granosoportada, con abundante matriz micrítica. La muestra se compone de numerosos bioclastos de naturaleza muy variada (gasterópodos, foraminíferos, equinodermos...) y tamaño muy heterogéneo (entre 0.1 a 2mm). En la foto de la lámina se observa, en la parte izquierda, un fragmento milimétrico de alga rodofícea, abundante en toda la muestra. Se ha clasificado esta muestra como una caliza tipo *Packstone* bioclástica. No presenta diferencias significativas con la muestra MBAC-15A.

Se puede observar el registro correspondiente al tramo entre 120 y 144 m y una foto del testigo en esta zona en la Figura 4.22, donde se aprecia la elevada fracturación y disgregación del mismo. Este rasgo indicaría un cambio en la naturaleza de la formación, que pierde cohesión debido posiblemente a la elevada presencia de bioclastos que provocan una notable porosidad. Se observan puntos con una alta relación espectral U/K (Figura 4.19), que estarían indicando presencia importante de materia orgánica. Se aprecia también otro punto elevado en la relación Th/U a la profundidad de 134 m que podría indicar la existencia de un pequeño intervalo detrítico.

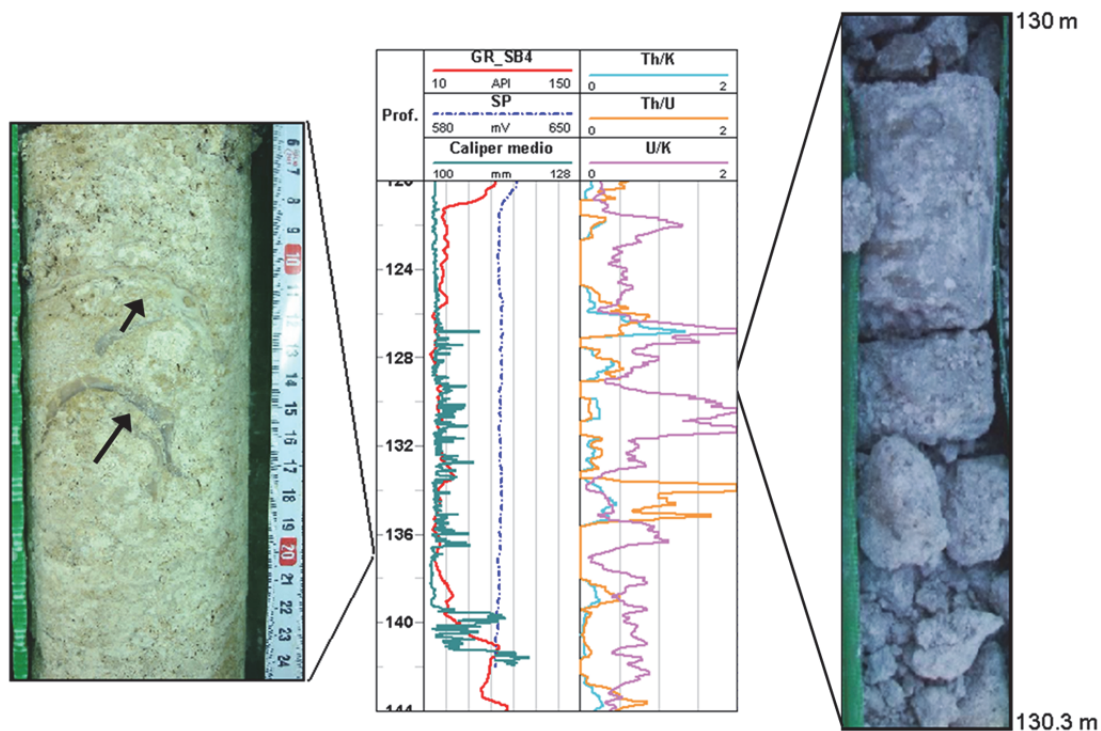


Figura 4. 22. Registros entre 120 y 144 m en el sondeo SB-4, de izquierda a derecha: GR, SP y *cáliper* acústico, relaciones espectrales Th/K, Th/U y U/K en un tramo de calcarenita. Señalados sobre ésta última, se muestra una fotografía del testigo entre 130 y 130.3 m, y el punto donde se tomó la muestra MBAC-25A. En la foto de la izquierda y señalados con flechas se observan dos trazas de ostreidos.

A partir de los 155 m de profundidad, el valor medio de radioactividad gamma natural es bajo (30 API) lo que indica que no hay presencia significativa de arcilla, observándose un nivel con un valor que asciende hasta los 70 API, y que se ha considerado de naturaleza margosa. La relación U/K elevada es la característica dominante, lo que indica el enriquecimiento en materia orgánica del sub-tramo 155 - 166, sobre todo a la profundidad de 158 m.

Para el último tramo del sondeo, se ha estudiado en lámina delgada una muestra (Ref.: MBAC-28A) tomada a una profundidad de 155.7 m (Figura 4.20-e). La muestra al microscopio presenta textura granosoportada, con abundantes fragmentos bioclásticos heterogranulares (formas angulares y minoritariamente subredondeados), de tamaño comprendido entre 1 y 3 mm aproximadamente. Los bioclastos identificados son principalmente restos algales, bivalvos y espículas de equinodermos. Se ha clasificado esta muestra como una caliza Grainstone bioclástica, de iguales características texturales que la muestra MBAC-18A.

Se ha realizado un análisis de DRX a la misma profundidad que la de la muestra MBAC-28A y los resultados indican como mineral principal la calcita y como mineral secundario la ankerita, apareciendo el cuarzo como mineral accesorio (Anexo III).

De acuerdo con todas estas propiedades citadas, a los estudios de DRX y al análisis de las láminas delgadas, los tramos en D se han clasificado como una caliza arenosa bioclástica. Al microscopio se han identificado las muestras, según la clasificación textural de Dunham (1962), como una caliza de tipo Packestone, con elevado contenido en fragmentos de algas.

Los análisis de calcimetría para cuantificar el contenido de carbonato en el sondeo SB-4, llevados a cabo por Reyes (2012) en su tesis doctoral, confirman esta clasificación, con valores de carbonato cálcico de 65.6 % y de 94.5% para la Fm. Las Ventanas.

4.2.2 Interpretación litológica de la Formación Torremendo y la Formación Pujálvarez en el sondeo Benejúzar-1

A partir de la representación gráfica de los registros GR y Vp, para el tramo perteneciente a los 330 – 916 m de profundidad del sondeo Benejúzar-1, se han diferenciado tres grupos de puntos, A, B y C (Figura 4.23-a). Como se puede observar en el *cross-plot*, los valores de resistividad, al igual que sucedía en la Fm. Las Ventanas del sondeo SB-4, son excesivamente bajos (<10 ohm·m), y no han sido tomados en cuenta para la interpretación litológica final.

Las agrupaciones establecidas han sido proyectadas en una columna de zonación junto con los registros disponibles en este sondeo (Figura 4.23-b). A continuación, se explica la interpretación litológica de cada grupo.

El grupo de puntos A, resaltado con el color verde en el *cross-plot*, presenta los valores más elevados de GR, superiores a los 50 API, y los más bajos de Vp, por debajo de los 3700 m/s aproximadamente. Este grupo se localiza hasta los 596 m de profundidad aproximadamente, y se identifica con la última parte de la Formación Torremendo. Presenta un perfil de GR muy irregular, indicando que es una litología poco compacta. Se ha interpretado este tramo como una marga. En este grupo se han interpretado escasos niveles de espesor 2-4 m de margas arenosas.

El grupo con los valores más elevados de Vp de toda la gráfica (3900 - 5200 m/s), y con valores de GR menores de 60 API aproximadamente, ha sido resaltado en color amarillo y bajo la letra B, localizándose al inicio de la Formación Pujálvarez. El perfil de los registros es más homogéneo, indicativo de una mayor competencia de materiales. Presenta un espesor de 55 m como se puede observar en la Figura 23-b, y ha sido interpretado como un paquete de areniscas (de matriz carbonatada posiblemente), con alguna fina intercalación de margas. Este paquete se considera un posible almacén, y sería el equivalente a las calizas arenosas o calcarenitas de las Ventanas identificadas en el sondeo SB-4.

Finalmente el grupo C de puntos, resaltado en color naranja en el *cross-plot* y en la columna de zonación, presenta valores de GR elevados, similares a los del grupo de puntos A, entre 50 y 150 API. Los valores de Vp en cambio son elevados, superiores a los 3900 m/s. Dados estos valores, se ha interpretado como una formación margosa, pero con contenido arenoso. Se localiza por debajo de las areniscas interpretadas anteriormente (Figura 4.23-b).

4.2.3 Conclusiones

La representación gráfica o interrelación entre registros (*cross-plots*) ha ayudado en la interpretación litológica del sondeo SB-4. Se ha complementado con el estudio petrográfico de muestras mediante lámina delgada y análisis de Difracción de RX efectuados en muestras de testigo. De acuerdo con esta interpretación, la columna litológica del sondeo SB-4 suministrada inicialmente por el IGME ha sido modificada.

La posición tectónica y paleogeográfica que ocupa el sondeo SB-4 (sector norte) con respecto a los sondeos antiguos y profundos de petróleo del sector sur (Benejúzar-1, La Mata-1, San Miguel de Salinas-1 y San Miguel de Salinas-2), en una cuenca caracterizada por la existencia de discontinuidades a gran escala en su relleno, ha imposibilitado una correlación estratigráfica mediante diagrfías entre la Formación Las Ventanas del sondeo SB-4 y una formación geológica análoga en los sondeos profundos. No obstante, la formación Pujálvarez del sondeo Benejúzar-1 se considera la equivalente a la Formación Las Ventanas en el sector sur (Corbí, 2010). En dicho sondeo, se ha procedido a realizar la interpretación litológica del tramo 330 – 916 m de profundidad.

Existe elevada homogeneidad litológica en las formaciones geológicas atravesadas por el sondeo somero SB-4. Los registros geofísicos de imagen óptica y acústica (OBI y ABI) realizados confirman los cambios litológicos y han permitido la identificación de muy escasas fracturas. En el sondeo profundo de Benejúzar-1, también se confirma una significativa homogeneidad litológica.

En base a los resultados obtenidos de la interpretación litológica, se han identificado dos zonas litológicas diferentes en el sondeo SB-4:

- Una zona superior, desde la superficie a los 107 m de profundidad aproximadamente, identificada como la Formación Torremendo (localmente Margas del TAP). Es litológicamente muy homogénea, donde las respuestas de las diagrfías muestras valores elevados de Radioactividad Gamma Natural, y valores bajos de velocidad de ondas P. Se ha interpretado este tramo como una formación margosa, con un espesor de más de 100 m, y alguna esporádica intercalación de 1- 2 m de lutitas o arcillas. Hacia la parte final del tramo, se produce un incremento del contenido arenoso de las margas, como transición a la formación inmediatamente inferior. No se ha identificado fracturación significativa ni heterogeneidades litológicas destacables, tal como se confirma en las muestras de testigos. Esta formación ha sido identificada entre los 83 y 608 m de profundidad en el sondeo Benejúzar-1, localizado en el sector sur de la Cuenca del Bajo Segura.

- Una segunda zona, inferior, desde los 107 a los 167 m de profundidad, identificada como la Formación Las Ventanas (o Calizas de Algas). Se caracteriza por valores bajos de Radioactividad Gamma Natural y valores moderados de velocidad de ondas P. En general, el perfil del diámetro de sondeo indica una mayor compactación de materiales que el tramo superior. Litológicamente está constituida por calizas arenosas (calcarenitas) y calizas margosas, con elevado contenido en bioclastos y algas. A nivel microscópico se han interpretado niveles de calizas tipo Grainstone (a los 112 y 156 m de profundidad), que típicamente suelen constituir uno de los tipos de reservorios carbonatados más comunes. Este tramo ha sido identificado por el IGME como la formación almacén (IGME, 2009). En el sondeo Benejúzar-1, dentro de la Formación Pujálvarez, que se considera la equivalente a dicha formación, se ha interpretado un paquete de areniscas el tramo 596 - 650 m, que podrían ser análogas a las calizas de algas de SB-4 (poseen matriz carbonatada según la empresa perforadora).

En la Figura 4.24, se pueden ver los *cross-plots* de GR frente a Vp para las formaciones confinantes (Fm. Torremendo) y formaciones almacén (Fm. Las Ventanas y Fm. Pujálvarez) obtenidos en los sondeos SB-4 y Benejúzar-1.

Se puede apreciar una diferencia litológica que viene reflejada por la diferencia de distribución en los rangos de valores: mientras que en el sondeo somero SB-4 se distinguen claramente dos tipos de litofacies (los puntos presentan una clara separación en dos grupos, basada en el criterio de GR frente al de Vp), en el sondeo profundo Benejúzar-1, los valores son muy homogéneos, lo que dificulta la diferenciación litológica. A pesar de ello, en este último sondeo se han diferenciado tres grupos; un grupo arcilloso-margoso (color verde), otro de naturaleza arenosa (amarillo), y finalmente se ha distinguido un tercer grupo de transición, interpretado como margas arenosas (color gris en el *cross-plot*).

En cuanto a los valores de la velocidad de ondas P, se puede observar que el rango es mayor en el sondeo profundo, 2100 - 4900 m/s aproximadamente, frente al rango reflejado en el *cross-plot* del SB-4, 2100 - 3500 m/s. El incremento de Vp en el sondeo profundo con respecto a los valores del sondeo somero, es debido al aumento de presión con la profundidad, y por tanto, a una mayor compactación de materiales, lo que se traduce en una formación más rápida.

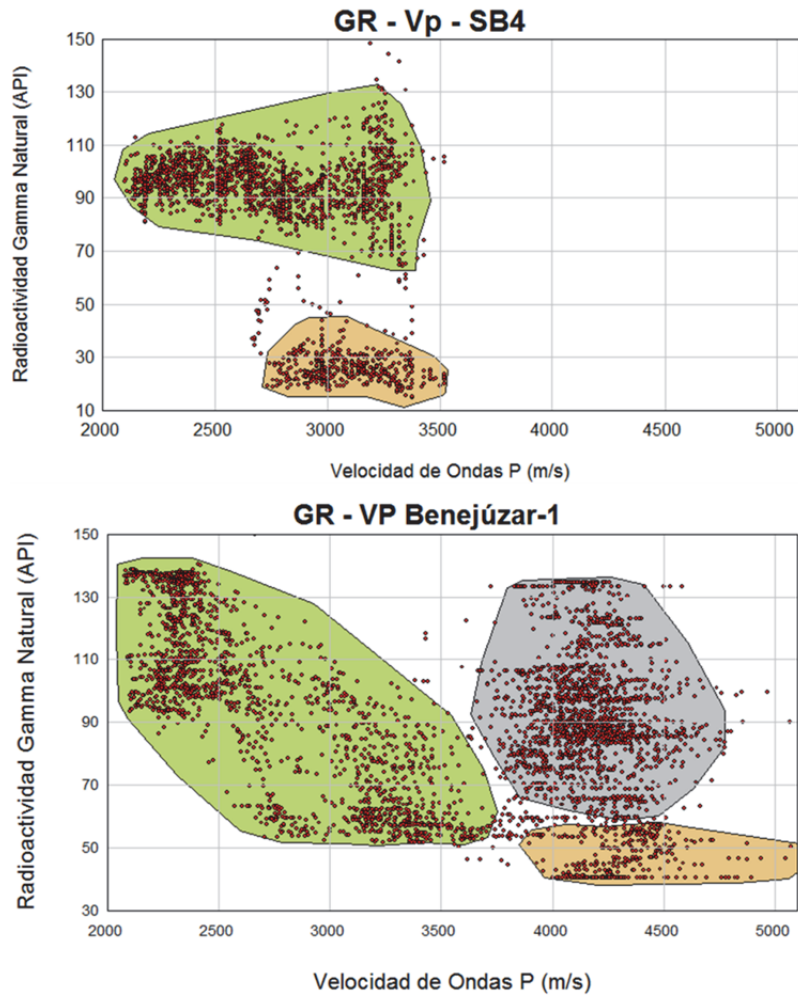


Figura 4. 24. *Cross-plot* de los registros de Radioactividad Gamma Natural y Velocidad de ondas P para la Fm. Margas de Torremendo y Fm. Calizas de las Ventanas del sondeo SB-4 (superior), y Fm. Torremendo y Fm. Pujálvarez del sondeo Benejúzar-1 (inferior).

En la Tabla 4.5 se puede ver un resumen de los parámetros estimados y otros valores obtenidos directamente de las diagráfias para las formaciones confinantes (Fm. Torremendo) en los sondeos SB-4 y Benejúzar-1, y para las formaciones reservorio en ambos sondeos (Fm. Las Ventanas y Fm. Pujálvarez respectivamente).

Tabla 4. 5. Parámetros estimados y registrados en los sondes SB-4 y Benejúzar-1. Vsh = volumen de arcillas; Vp = velocidad de ondas P; SP = potencial espontáneo.

	Formación	Litología	Vsh (%)	Vp (m/s)	SP (mV)
SB-4	Confinante	Marga / Lutita	-	2100 - 3300	614 - 635
	Reservorio	Caliza margosa	12 - 50	3100 - 3500	616 - 626
		Caliza arenosa (calcarenita)	3 - 7	< 3100	< 616
Benejúzar-1	Confinante	Marga	-	2100 - 3400	-
	Reservorio	Arenisca carbonatada	14 - 20	3900 - 4900	-

5. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FORMACIONES CARBONATADAS RESERVORIO

En esta tesis se ha realizado la evaluación petrofísica de dos posibles almacenes carbonatados, la facies Muschelkalk inferior (M1) y la Formación Las Ventanas, cuya interpretación litológica ha sido expuesta en el Capítulo 4.

A partir de la información de diagrafas de sondeos, del análisis de muestras, de la realización de ensayos en campo y laboratorio, y mediante el empleo de determinadas fórmulas y medidas, se ha podido obtener un conjunto de parámetros petrofísicos para la valoración final de dichas formaciones geológicas como almacenes de CO₂ en el espacio peninsular.

5.1 Caracterización y evaluación petrofísica de la facies Muschelkalk inferior en SE-4 y Reus-1

La estimación de la porosidad en la facies Muschelkalk M1 del sondeo SE-4 se ha llevado a cabo a partir del registro sísmico de onda completa y a partir del estudio al microscopio de 4 muestras en lámina delgada, además de un ensayo en laboratorio llevado a cabo sobre una muestra. De los ensayos de laboratorio, se extrajo la porosidad total (\emptyset_t) y la porosidad efectiva (\emptyset_e).

Mediante el estudio conjunto del registro acústico de imagen (ABI) y el registro sísmico de onda completa (FWS), se ha podido realizar una valoración inicial cualitativa de la permeabilidad en el sondeo SE-4, diferenciando si se trata de una permeabilidad textural o bien una permeabilidad secundaria, es decir, por fracturas. El conteo de las fracturas identificadas a partir de la imagen acústica, también ha permitido establecer una valoración inicial de la estabilidad estructural tanto de las formaciones geológicas sello como almacén.

Las medidas cuantitativas de permeabilidad realizadas en el sondeo SB4 han sido de dos tipos: en campo, mediante 2 ensayos de permeabilidad Lugeon, y en el laboratorio, estimando la conductividad hidráulica.

Complementariamente, se ha establecido una valoración de tramos potencialmente permeables mediante el estudio de la atenuación de la energía acústica en el registro sísmico de onda completa con la determinación del parámetro I_k-Seis.

En el sondeo profundo Reus-1 se ha estimado la porosidad a partir del registro de densidad (RHOB) y del registro sísmico (DT), mediante el procedimiento explicado en el Capítulo 2.

5.1.1 Porosidad y permeabilidad en el sondeo SE-4

➤ Porosidad

Observando en la Figura 5.1 el perfil de porosidad sísmica en la facies M1 del sondeo SE-4, se puede decir en líneas generales, que presenta una gran variabilidad.

Se ha establecido una zonación en la curva de porosidad sísmica, según se ha explicado en la Metodología, para obtener un perfil de variación entre los diferentes tramos que presentan valores similares, y comparar la evolución del parámetro en profundidad. De esta forma se ha obtenido un valor de porosidad mínima, media y máxima (Figura 5.1).

En el tramo 67 - 90 m de profundidad, interpretado como caliza (micrítica y caliza dolomítica), se ha estimado un valor de porosidad sísmica elevado, entre 18 y 36 %. En el tramo 90 – 106 m, interpretado como dolomías, los valores de porosidad sísmica calculados también son elevados, entre 17.5 y 31%. Ambas geologías presentan valores similares, aunque las dolomías presentan una menor variabilidad (desviación estándar).

Desde los 69 hasta los 75 m de profundidad, en el registro de imagen acústica, se observa una elevada presencia de fracturación (varios mm de abertura), que puede constituir un fácil entramado para un sistema poroso, pero algunas de ellas se encuentran rellenas de lutita, lo que reduce la calidad como formación reservorio. En concreto para el tramo 70.5 - 74 m, se aprecia en la Figura 5.2-b, la imagen acústica en detalle, correspondiente a la caliza micrítica; se observa la elevada presencia de fracturación (porosidad secundaria). Son fracturas naturales de alto ángulo la mayoría (75-88°), abiertas (3 mm – 1 cm de abertura) y de marcado carácter penetrativo. La atenuación de la señal sísmica en el perfil del registro FWS lo confirma.

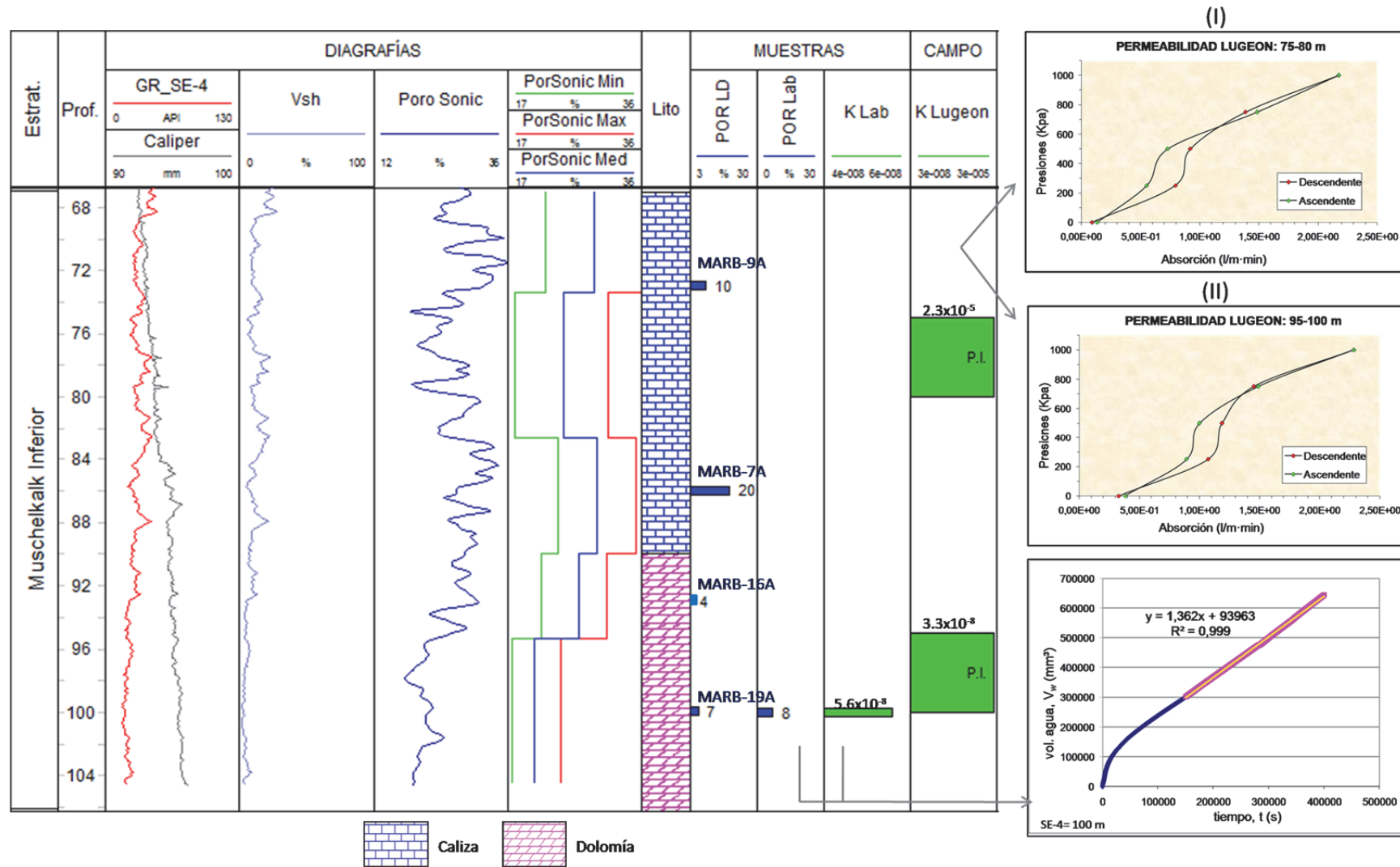


Figura 5. 1. Diagrafías en la facies M1 del sondeo SE-4, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), cáliber acústico, volumen de arcillosidad (Vsh), porosidad sónica (Poro Sonic), valores de porosidad sónica mínima, máxima y media establecidos a partir de zonación, columna litológica interpretada, porosidades en lámina delgada (POR LD) con las referencias de las muestras, porosidad de laboratorio (PORLab), conductividad hidráulica de laboratorio (K Lab) y permeabilidad Lugeon (ambas en cm/s). Figura superior derecha: gráficos de permeabilidad Lugeon en dos tramos de profundidad (I = 75 – 80 m, II = 95 – 100 m). Figura inferior derecha: curva de consolidación obtenida en el ensayo de conductividad hidráulica en laboratorio para una muestra tomada a 100 m de profundidad.

El estudio de la porosidad a 73.9 m de profundidad, sobre una muestra de caliza micrítica en lámina delgada (Ref. MARB-9A), ha revelado que la porosidad identificada es debida fundamentalmente a fisuración, y representa menos de un 6 % de la porosidad total, aproximadamente.

En la Figura 5.2-a, también se puede observar otra imagen acústica de sondeo registrada entre los 74.1 y los 75 m de profundidad sobre caliza, donde se ha identificado un elevado número de fracturas, y la presencia de estilolitos horizontales. Estos estilolitos reflejan la sustitución de un material por un fenómeno de disolución por presión, observándose una superficie rugosa que a menudo contiene las partes insolubles (pirita, óxidos, etc.). Merino *et al.* (1983) sugirieron que los estilolitos paralelos a la estratificación, que son los mayoritariamente observados en este tramo, se forman en áreas de alta porosidad, y la mayoría de los transversales, se forman a lo largo de fracturas preexistentes.

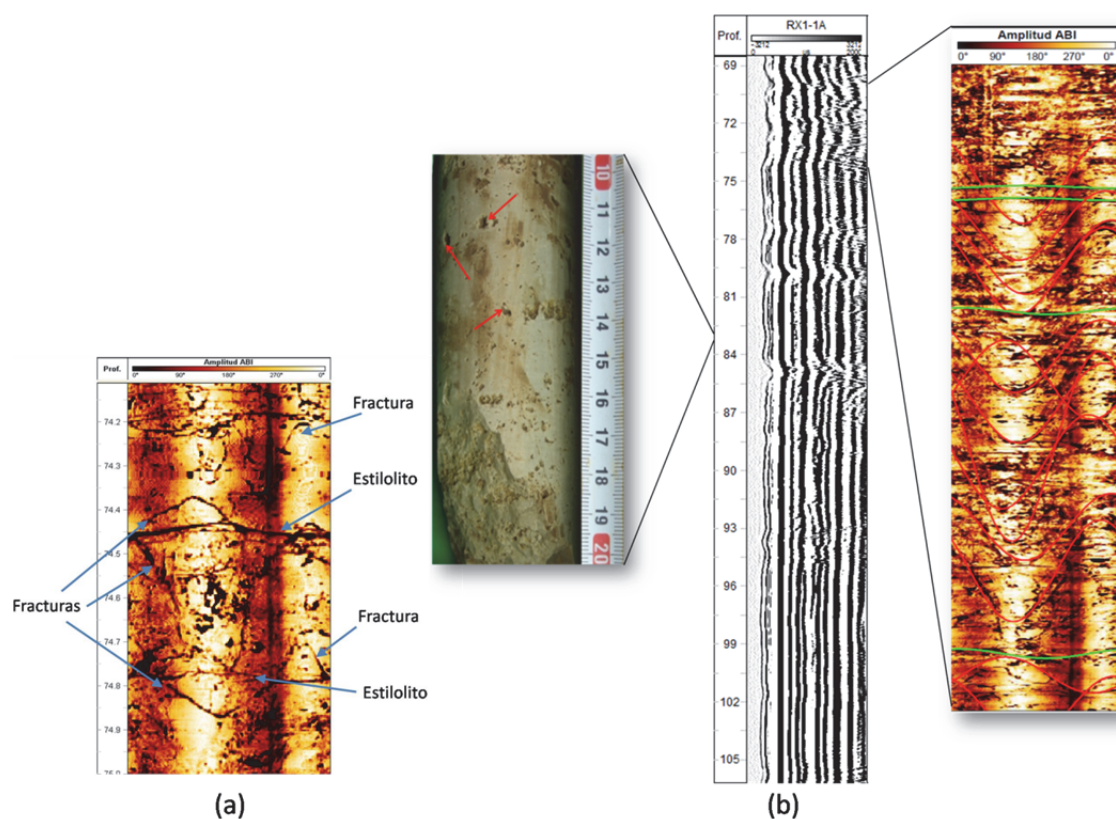


Figura 5. 2. (a) Imagen acústica perteneciente al tramo 74.1 - 75 m en la facies M1 del sondeo SE-4, interpretado como caliza, donde se observa la identificación de fracturas y de estilolitos. (b) Diagráfia de la señal sónica registrada en el primer receptor (RX1-1A) desde los 69 hasta los 106 m, con una foto de un tramo de testigo (izquierda) donde se puede observar la presencia de pequeñas vacuolas (*vugs*) y una imagen acústica ampliada con la identificación de escasas laminaciones (líneas verdes) y de abundante fracturación (rojas), para el tramo 70.5 - 74 m de profundidad (derecha).

Se observan, sobre todo a partir de los 85 m de profundidad, sobre los testigos del sondeo, oquedades (vugs) de tamaño predominantemente milimétrico (Figura 5.2-b), producto de la dolomitización, que suele desarrollar este tipo de porosidad de forma más abundante que en las calizas (por el elevado grado de disolución que el proceso implica). A partir de 94 m, las oquedades se hacen menos abundantes o desaparecen, y a partir de los 97 m aproximadamente, aumentan de tamaño (acentimétrico) pero son mucho menos abundantes. Este hecho podría ser el causante del incremento de la V_p , con el consiguiente descenso de la porosidad sónica (Figura 5.1). La porosidad sónica no responde a la porosidad secundaria (oquedades) así que en este caso, el descenso de porosidad es porque la dolomía presenta un mayor nivel de compactación que la caliza.

El estudio en lámina delgada de una muestra de dolomicrita, tomada a los 86.2 m de profundidad (Ref.: MARB-7A), revela una porosidad media (Archie, 1952; Sander, 1967), de tipo interpartícula mayormente, obteniendo un valor medio del 12.7%, aunque en algunos puntos se alcanza un valor elevado, de hasta el 25.5%, y una distribución de la porosidad muy heterogénea (Figura 5.3). En las zonas donde se observa un mejor desarrollo del proceso de dolomitización, la porosidad presenta un valor de 9 %. Se ha estimado que el tamaño promedio de poros se sitúa en 185 μm , es decir, se trataría de mesoporos (Choquette & Pray, 1970). Los poros de menor tamaño, visibles únicamente al microscopio, se sitúan alrededor de 80 a 90 μm , y los poros de máximo tamaño identificados, alcanzan una magnitud de hasta 350 μm .

A partir de los 87 m de profundidad, la presencia de fracturas disminuye, lo que también es visible en el registro FWS (Figura 5.2-b). Se trata de una formación menos brechificada. Y a partir de los 93 m de profundidad y hasta el final del sondeo, apenas se han identificado fracturas, lo que indica la elevada estabilidad estructural de la formación geológica.

La porosidad observada en una muestra en lámina delgada de dolomicrita (Ref. MARB-16A), tomada a los 93.5 m de profundidad, es fundamentalmente de tipo intercrystalino, observándose dolomitización (Figura 5.3). Esta porosidad es muy irregular y se ha estimado en torno a un 4 %, con un tamaño de poro pequeño (<60 μm), es decir, microporosidad. Teóricamente, los poros intercrystalinos, debido a una serie de características petrográficas específicas (poros abundantes y en general pequeños y homogéneos, bien comunicados), suele generar rocas de elevada porosidad y permeabilidad, con una porosidad muy constante y uniforme (Alonso *et al.*, 1987).

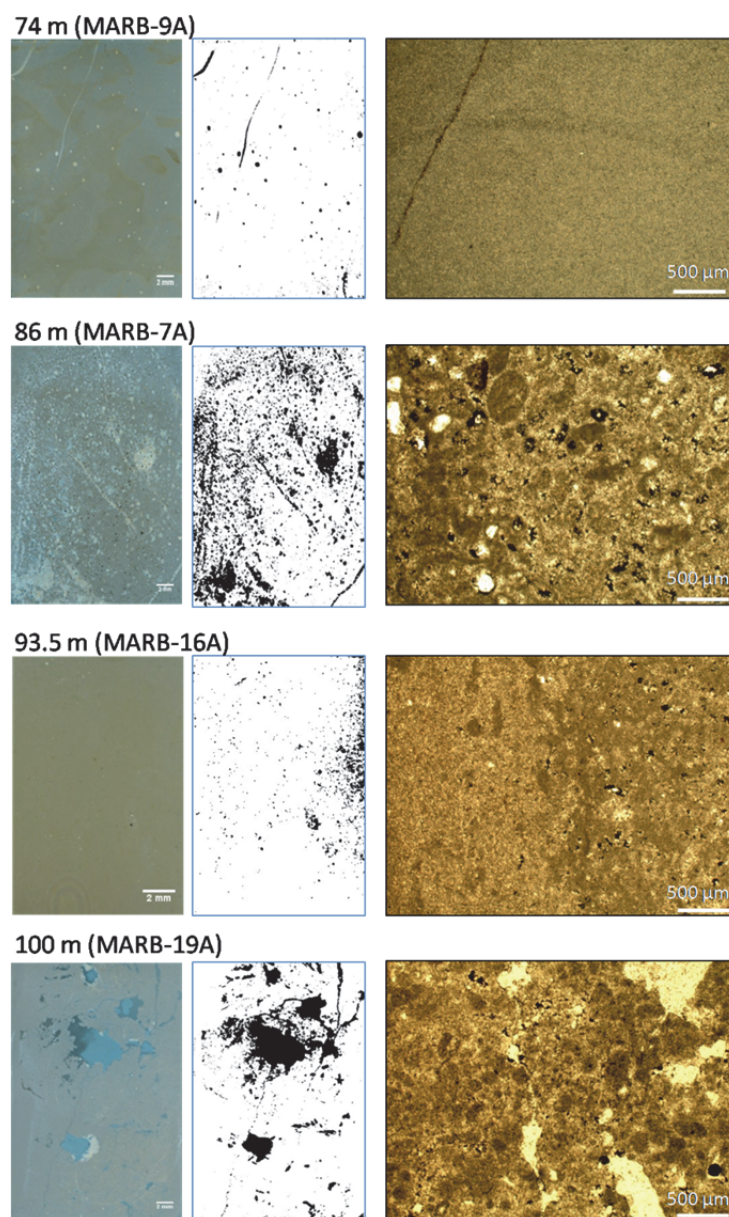


Figura 5. 3. Estimación de la porosidad en lámina delgada de tres muestras pertenecientes a la facies M1 del sondeo SE-4: tres muestras de dolomía micrítica con referencias MARB-7A, MARB-16A y MARB-19A, tomadas a los 86.2, 93.5 y 100 m de profundidad respectivamente, y una muestra de caliza micrítica (Ref.: MARB-9A) tomada a los 74 m. Todas las láminas fueron teñidas con Azul de Metileno para poder identificar mejor la porosidad. Las imágenes a la izquierda son las áreas escaneadas de las láminas, las imágenes centrales es la misma imagen pero con la estimación de la porosidad (en negro) (ambas a escala. 2 mm), y las imágenes de la izquierda son las fotografías tomadas al microscopio en un punto aleatorio de la muestra (escala: 0.5 mm o 500 μ m).

A los 100 m de profundidad, la porosidad estudiada sobre lámina delgada en otra muestra de dolomiticrita (Ref.: MARB-19A), revela que se trata de una porosidad uniforme, observándose algunas cavidades aisladas de 3 a 6 mm de diámetro, y pequeñas fracturas de un espesor menor de 1 mm (Figura 5.3). Se ha determinado, macroscópicamente y de forma general, una

porosidad total baja, del 7% aproximadamente, aunque a nivel microscópico este valor total podría aumentar considerando los pequeños poros de orden micrométrico presentes en la lámina. Este valor de porosidad estimado en lámina delgada es similar al obtenido en laboratorio mediante ensayo de gradiente hidráulico controlado sobre una muestra de testigo a esta misma profundidad; la porosidad efectiva y la porosidad total obtenidas, fueron de 7.5 % y 7.7 % respectivamente.

➤ Permeabilidad

Se ha realizado una primera estimación cualitativa visual de la permeabilidad, acompañándola de algunas estimaciones numéricas a partir de ensayos de campo y laboratorio, lo que ha permitido realizar una valoración inicial de las zonas que podrían ser permeables. Disponer de medidas continuas y numerosas de laboratorio es costoso, por lo que la visualización de zonas permeables a partir de diagrfías resulta de gran ayuda.

- A partir de diagrfías

El número de fracturas identificadas desde los 69 hasta los 104 m a partir de la imagen acústica se puede ver en la Figura 5.4. Se trata de fracturas naturales, algunas de alto ángulo (75-88°), abiertas (> 3 mm de abertura) y otras cementadas por calcita, y finalmente algunas de marcado carácter penetrativo. A partir de los 79 m de profundidad aproximadamente y hasta el final del sondeo apenas se han podido identificar fracturas. En la Figura 5.4, se puede observar la representación de las proyecciones polares de las fracturas identificadas en la facies M1 del sondeo SE-4, y un histograma con la frecuencia de sus buzamientos. En dicho histograma, se puede apreciar que predominan los buzamientos de rango 70-85°. En general, la caracterización y estudio de fracturas a partir de la imagen acústica de la pared del sondeo en SE-4 indica que las fracturas son poco abundantes, sobre todo a partir de los 80 m de profundidad.

El perfil del registro FWS confirma la presencia de fracturas (Figura 5.2-b), con la consecuente atenuación de la señal sónica registrada. Existe por tanto una permeabilidad de carácter secundario, debida a la presencia de esas fracturas. La elevada presencia de cavidades (vugs) en la formación, observadas en los testigos, podrían ser las causantes de dichas atenuaciones en la amplitud de la señal sónica.

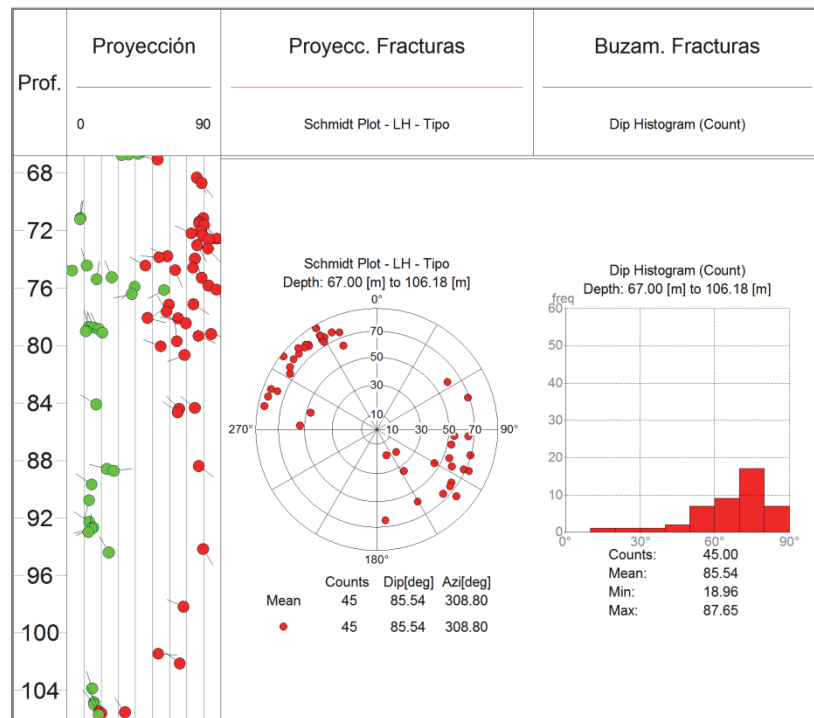


Figura 5. 4. Facies Muschelkalk inferior (M1) del sondeo SE-4, de izquierda a derecha: Proyección polar de estructuras sedimentarias (laminación = verde, fracturación = rojo); proyección estereográfica equiareal de las fracturas identificadas; representación mediante histograma de las frecuencias de los buzamientos de fracturas.

- A partir de ensayos Lugeon

Se realizó un ensayo de permeabilidad Lugeon en el tramo 75 – 80 m de profundidad. La gráfica de la Figura 5.1-I permite observar la relación presión – absorción, que proporciona ayuda en la interpretación del comportamiento de la roca durante el tiempo de inyección (fuente: IGME). Observando la gráfica de comportamiento se observan dos tendencias: una tendencia de flujo laminar, en el que los valores Lugeon de incremento y descenso en esa zona son aproximadamente iguales. Después del flujo laminar, existe una tendencia de atoramiento (Houlsby, 1976), existiendo una diferencia importante entre el valor de caudal a la presión máxima y el valor a la presión mínima. Durante el tramo de flujo laminar, el tramo descendente (en rojo) presenta un caudal superior al ascendente, respondiendo así a un comportamiento no elástico de la roca, bien debido a fracturación hidráulica o por lavado de relleno. A partir de ahí, el tramo descendente muestra un caudal inferior al ascendente, de acuerdo a un comportamiento elástico de la roca, con devolución de parte del agua inyectada durante el ensayo (atoramiento). El valor de inyectabilidad obtenido para este tramo fue de 2.17 U.L (2.2×10^{-5} cm/s o 22.3 mD). Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), correspondería a una formación prácticamente impermeable (PI). La imagen acústica del sondeo en este tramo

confirma que apenas existen fracturas, y la mayoría de las que se han identificado, están cementadas, o con una separación no visible.

Se realizó otro ensayo de permeabilidad en el tramo 95 – 100 m (Figura 5.1-II). El valor de inyectabilidad obtenido para este tramo fue de 2.28 U.L. Siguiendo la clasificación de González de Vallejo *et al.*, (2002), el valor de la permeabilidad es de 2.3×10^{-5} cm/s (23.3 mD). Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), corresponde a una formación prácticamente impermeable (PI). La curva de comportamiento para el tramo 95 – 100 m sigue la misma tendencia que seguía la curva para el tramo 75 – 80 m. Se aprecia un comportamiento laminar a mitad del ensayo, y finalmente atoramiento a presión máxima.

Se puede ver un resumen de los valores resultantes en la Tabla 5.1.

Tabla 5. 1. Resultados obtenidos de los ensayos Lugeon, en Unidades Lugeon (U.L.) y cm/s, realizados en la facies M1 del sondeo SE-4 (P.I.= prácticamente impermeable).

Formación	Tramo ensayado (m)	U.L.	cm/s	Clasificación*
Facies Muschelkalk Inferior	75 - 80	2.17	2.2E-05	P.I.
	95- 100	2.28	2.3E-05	P.I.

*Olalla y Sopeña, 1991

Ambos ensayos indican, como se puede comprobar, que en esos dos tramos de sondeo la permeabilidad es muy baja.

- A partir de ensayos en laboratorio

A partir de una muestra de testigo tomada a los 100 m de profundidad (dolomicrita), se realizó un ensayo en laboratorio de gradiente hidráulico controlado. La gráfica de estabilización del ensayo (zona rosa) obtenida se puede observar en la Figura 5.1, donde se observa que la estabilización se produce a los 150000 segundos (42 horas aproximadamente). La conductividad hidráulica resultante para esta muestra es muy pequeña, de $5,6 \times 10^{-10}$ m/s que, según la clasificación de Mejías & López-Geta (2003), correspondería a una formación de baja permeabilidad (BP).

- A partir del estudio de atenuación de la energía acústica

Con el objetivo de hacer una estimación de las zonas permeables en la facies M1 del sondeo SE-4, se estimó el parámetro Ik-Seis siguiendo la metodología utilizada por Mari & Guillemot (2012).

Se observa en la Figura 5.5 los parámetros acústicos Ik-Seis, la atenuación y el índice Ic (*Shape Index*), así como la porosidad sónica calculada, el registro sónico de onda completa, el valor de la velocidad de ondas P, la imagen acústica de la pared del sondeo y los resultados en dos ensayos Lugeon resultantes en la facies M1 del sondeo SE-4.

Se identifican dos tramos con un incremento del factor Ik-Seis, de 77 a 79 m y de 83 a 89 m, y que se correlacionan bien con el índice Ic. Contrariamente, el ensayo Lugeon realizado entre los 75 y 80 m, tal como indicó anteriormente, revela que no existe permeabilidad (P.I.). En estos tramos, a priori permeables por el índice Ik-Seis, apenas se han identificado fracturas, por lo que la permeabilidad vendría dada en este caso por una permeabilidad de tipo primario.

En el tramo ensayado Lugeon 95 – 100 m, los ensayos de permeabilidad revelaron una formación prácticamente impermeable (P.I.), coherentes con los resultados obtenidos en el perfil de Ik-Seis y de Ic en dicho tramo, que no indican existencia de permeabilidad.

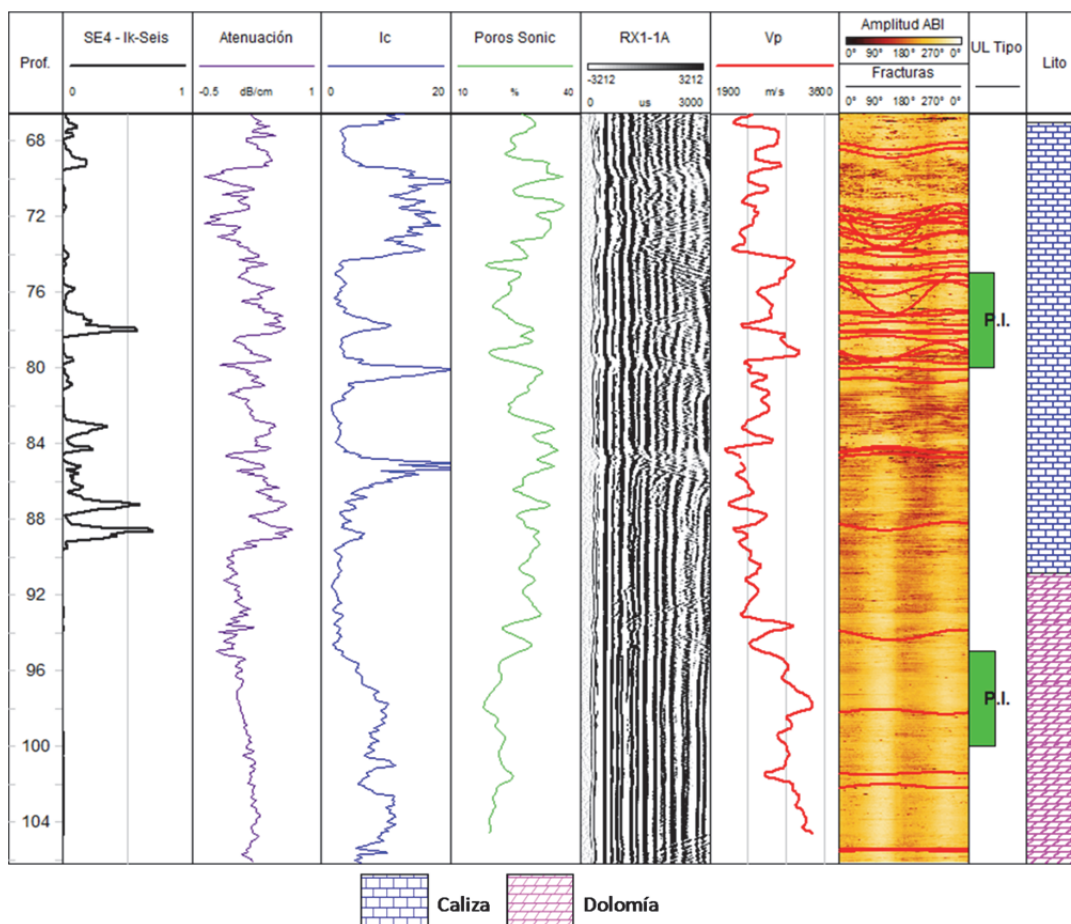


Figura 5. 5. De izquierda a derecha, parámetro Ik-Seis obtenido a partir del estudio de atenuación de la energía acústica, atenuación, Índice de Forma Ic (*Shape Index*), porosidad sónica, llegada de la señal sónica al primer receptor (RX1-1A), velocidad de ondas P (Vp), imagen acústica de sondeo (Amplitud ABI) y fracturas identificadas a partir de él, valoración de permeabilidad Lugeon según Olaya & Sopeña (1991) (Prácticamente Impermeable = PI), y columna litológica interpretada.

5.1.2 Valoraciones petrofísicas en el sondeo Reus-1

➤ Porosidad

Los valores de porosidad estimados a partir del registro de densidad (RHOB) son, en general, similares a los mostrados en el perfil de porosidad sónica en la facies Muschelkalk M1 del sondeo Reus-1. Hay dos tramos donde la porosidad por densidad es claramente mayor: 2120 – 2134 m y 2144 – 2147 m. Esta notable diferencia se debe a la existencia probablemente de fracturas en esos dos tramos.

En las calizas interpretadas de la facies M1 estudiada del sondeo Reus-1 (Figura 5.6), se ha estimado un valor de porosidad sónica no superior al 14%. En el pequeño tramo de calizas

margas interpretado en la zona límite con la facies M2, se ha estimado una porosidad sónica baja, del 8% como máximo.

Asimismo, la porosidad calculada a partir del registro de densidad aparente (RHOB) da valores de hasta 18 % para las calizas. Los mayores valores de porosidad por densidad se encuentran en el tramo 2121 – 2133 m.

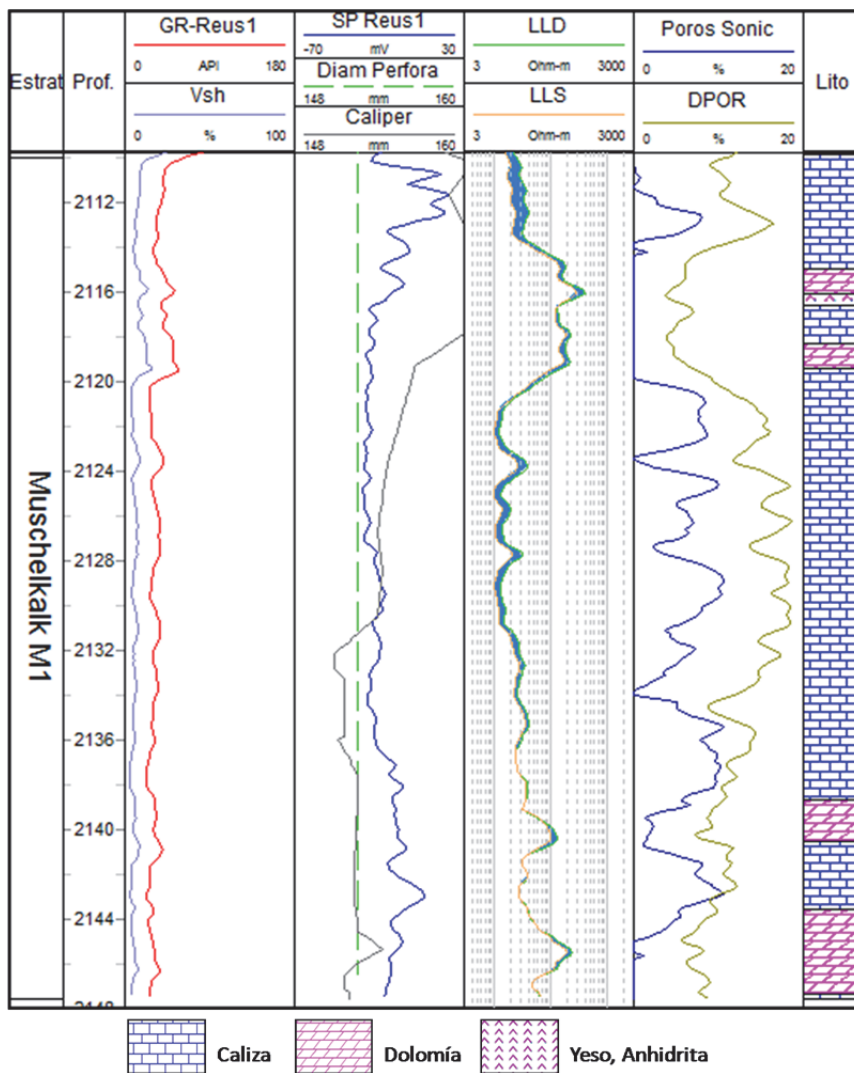


Figura 5. 6. Registros en el tramo 2110 – 2147 m (facies M1) del sondeo Reus-1, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), volumen de arcillosidad (Vsh), Potencial Espontáneo (SP), diámetro de perforación, *cáliper* mecánico, resistividad lateral profunda (LLD) y lateral somera (LLS), velocidad de ondas P (Vp), porosidad sónica (Poros Sonic), porosidad estimada a partir del registro de densidad aparente (DPOR) y columna litológica interpretada.

En los niveles dolomíticos interpretados, el valor de la porosidad sónica estimado comprende entre 1 y 9%, mientras que el de la porosidad por densidad oscila en estos niveles entre 6 y

9%, observándose valores más irregulares en la parte final del tramo estudiado, a partir de los 2139 m de profundidad.

El valor de la porosidad por densidad en las dolomías interpretadas en la parte final del tramo estudiado es mayor que en la parte superior, donde los valores oscilan entre 3 y 7 %. Estos valores son menores que los estimados a partir del registro sísmico, lo cual podría ser debido a la presencia de arcilla en este pequeño nivel. En este sentido, se requiere más información para concretar las causas de esa anomalía.

➤ Permeabilidad

En el tramo entre 2110 y 2135 m de profundidad, se observa un distanciamiento de las curvas de las resistividades lateral somera y profunda (LLS y LLD respectivamente), indicando que podría existir invasión de fluidos y por tanto, potencial permeabilidad (Figura 5.6). A partir de los 2131 m de profundidad y hasta los 2137 m, el *cáliper* mecánico presenta un valor menor que el observado en el perfil de perforación; esto podría ser debido a una filtración del lodo de perforación hacia la formación. La deflexión negativa de la curva SP en este tramo, podría confirmar también la existencia de permeabilidad (siempre que el lodo de perforación sea más resistivo que el agua de formación).

5.1.3 Conclusiones

A partir del análisis del registro sísmico de onda completa en el sondeo SE-4, y del registro DT en Reus-1, se han podido estimar la velocidad de las ondas P (V_p) en la facies Muschelkalk inferior, y finalmente la porosidad. En la Tabla 5.2, se pueden observar los rangos estimados de porosidad sísmica (ϕ_s) y porosidad por densidad (ϕ_d) para la facies M1 de los sondeos SE-4 y Reus-1, así como la porosidad a partir de lámina delgada (ϕ_{LD}), la porosidad total estimada en laboratorio (ϕ_{tLab}), la permeabilidad estimada en laboratorio (K_{Lab}) y la permeabilidad obtenida mediante ensayos Lugeon (K_{Lugeon}) en el sondeo SE-4.

La diferencia de profundidad va a influir en las propiedades de porosidad de las formaciones geológicas (Hayes, 1979). Es normal por tanto, que los materiales estudiados de la facies M1 del sondeo Reus-1, superior a los 2100 m, presenten valores de porosidad inferiores a los que presenta la formación análoga en SE-4, situada a escasos 100 m bajo la superficie.

Tabla 5. 2. Tabla resumen de los parámetros petrofísicos estimados en la facies Muschelkalk Inferior del sondeo SE-4 y del tramo 2110 – 2147 m de Reus-1; porosidad sónica (\varnothing_s), porosidad por densidad (\varnothing_d), porosidad en lámina delgada (\varnothing_{LD}), porosidad total en laboratorio (\varnothing_{tLab}), permeabilidad estimada en laboratorio (K Lab), permeabilidad Lugeon (K Lugeon).

	Formación	Litología	\varnothing_s (%)	\varnothing_d (%)	\varnothing_{LD} (%)	\varnothing_{tLab} (%)	K Lab (cm/s)	K Lugeon (cm/s)
SE-4	Muschelkalk Inferior	Caliza (micrítica, dolomítica)	17 - 36	-	73.9 m=3 - 6 86.3 m=13-26	-	-	75-80m=2.2E-05
		Dolomía, dolomicrita	17 - 31	-	93.5 m= 4 100 m= 7	7.7	100 m=5.58E-08 cm/s	95-100m=2.3E-05
Reus-1	Muschelkalk Inferior	Caliza margosa	8	9 - 11	-	-	-	-
		Caliza (dolomítica?)	< 14	< 18	-	-	-	-
		Dolomía	1 - 7	6 - 9	-	-	-	-

➤ Porosidad

El reservorio M1 en el sondeo SE-4 parece estar afectado de forma notable por procesos de diagénesis temprana, propios de enterramientos superficiales a intermedios, que incluye fracturación, algunas fases de disolución (estilolitización) y disolución por dolomitización. En este sentido, la porosidad identificada en láminas delgadas en M1 de SE-4 está relacionada principalmente con la presencia de fisuras y con oquedades; presenta mayormente mesoporosidad (2 mm – 60 μm), aunque también hay presencia de microporosidad (< 60 μm). También predomina la porosidad intercrystalina. Se ha observado que las muestras que presentan predominantemente porosidad por fracturación y macroporosidad (2 mm), poseen un menor porcentaje de porosidad, frente a las muestras que presentan microporosidad, demostrando lo influyente que es la microporosidad en el valor de la porosidad final.

Los valores de porosidad estimados a partir de lámina delgada en el sondeo SE-4 dan resultados muy variables (de 3 a 26 %), coincidiendo con los valores de porosidad procedentes del ensayo de laboratorio en la muestra analizada de dolomicrita tomada a los 100 m de profundidad.

Las porosidades sónica y por densidad estimadas en la facies M1 de Reus-1 presentan valores de bajos a medios (< 18%). Las condiciones de enterramiento profundo de M1 en el sondeo Reus-1 (> 2100 m), han generado que se produzca un descenso en el valor de la porosidad inicial en los carbonatos, y que influya en la porosidad final. Al tratarse de una formación equivalente, es probable que las calizas también estén dolomitizadas, tal como se ha

observado en el sondeo SE-4, y de ser así, el enterramiento habría actuado redistribuyendo la porosidad y reduciéndola. Otros eventos diagenéticos como la cementación, especialmente a grandes profundidades, también podrían haber contribuido a reducir la porosidad, estando implicados anhidrita, calcita o incluso dolomita como elementos cementantes (Mountjoy *et al.*, 1999).

➤ Permeabilidad

Se ha realizado una valoración cualitativa de la permeabilidad en la facies M1 del sondeo SE-4. Aunque las observaciones realizadas a través de los registros de resistividad podrían indicar la existencia de dos zonas con invasión de fluidos, los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio coincidentes con dichas zonas de supuesta invasión (75 – 80 y 95 – 100 m), confirman lo contrario. Las valoraciones cualitativas de permeabilidad, llevadas a cabo en la facies M1 del sondeo Reus-1, indican una posible zona permeable en el tramo comprendido entre 2131 y 2150 m.

Se observa a lo largo de toda la facies M1 del sondeo SE-4, la presencia de oquedades de tamaño milimétrico la mayoría. Las oquedades desaparecen a partir de 93 m, volviendo a observarse a partir de los 97 m de profundidad, donde aumentan su tamaño aunque su presencia es menor. Las oquedades no parecen presentar conectividad visible, lo que indica que no darían lugar a un incremento de la permeabilidad.

La fracturación identificada en la facies M1 es escasa, con una mayor presencia hasta los 84 m de profundidad; el tramo 70 - 78 m presenta una mayor frecuencia de fracturas y fisuras (< 1 mm). Algunas de las fracturas identificadas están cementadas por arcilla, carbonato o anhidrita/yeso. También se han identificado superficies estilolíticas horizontales, que podrían indicar existencia de permeabilidad. En los reservorios de calizas, las micro-fracturas son el principal tipo de fracturación, y la proporción de porosidad conectada con respecto a la porosidad total está relacionada con la permeabilidad (Ling *et al.*, 2014).

Los resultados de los ensayos de permeabilidad Lugeon realizados en dos tramos del sondeo SE-4 pertenecientes a la facies M1 se pueden ver en la Tabla 5.2. Estos valores, siguiendo la clasificación de Olalla & Sopena (1991), corresponderían a formaciones prácticamente impermeables (PI), y se correlacionan bien con las observaciones realizadas respecto a la identificación de fracturas a partir de la imagen acústica en dichos tramos.

La estimación cualitativa de la permeabilidad a partir del análisis de la atenuación de la señal acústica en la facies M1 del sondeo SE-4 revela dos tramos con posible presencia de

permeabilidad, comprendidos entre 76 y 78 m, y entre 83 y 89 m de profundidad. Los resultados de permeabilidad Lugeon para el tramo 75 – 80 m indican una formación prácticamente impermeable, lo que indica que la permeabilidad valorada para este tramo mediante el parámetro lk-Seis no se debe a fracturas sino que podría ser de carácter primario o textural. Los resultados Lugeon obtenidos para el tramo 95 – 100 m son coherentes con el parámetro lk-Seis resultante en este tramo.

➤ Valoración final del par sello – almacén

En la Tabla 5.3, se pueden observar algunos de los parámetros que se han tenido en cuenta como indicadores positivos o no en la valoración final de las facies M2 y M1 de los sondeos SE-4 y Reus-1.

La existencia de una escasa porosidad total en lámina delgada, principalmente de tipo intragranular y secundaria (debida a fracturas y oquedades), y una porosidad conectada poco significativa o prácticamente nula, además de valores de permeabilidad bajos obtenidos mediante ensayos Lugeon y ensayos de laboratorio, se puede concluir que la facies M1 estudiada en el sondeo SE-4, a priori, no muestra las condiciones idóneas de porosidad y permeabilidad deseados para una formación almacén (Chadwick *et al.*, 2008).

Las porosidades estimadas en la facies M1 de Reus-1 presentan valores de bajos a medios. Se consideran valores cuestionables como buenos indicadores para una formación reservorio (Chadwick *et al.* 2008).

Tabla 5. 3. Valoraciones de las formaciones sello y almacén en las facies M2 y M1 de los sondeos SE-4 y Reus-1 (\emptyset_t = porosidad total, \emptyset_e = porosidad efectiva).

		Litología	Prof. (m)	Continuidad lateral	Espesor* (m)	Poros. \emptyset_t y \emptyset_e (%)	Permeab. (mD)
SE-4	Sello	Lutita / Arcilla	0- 67	Buena	67	-	-
	Almacén	Caliza micrítica y dolomítica / Dolomicrita	67 - 106	Buena	39	3 - 26	< 25
Reus-1	Sello	Lutita / Arcilla	2035 - 2110	Buena	75	-	-
	Almacén	Caliza / Dolomía	2110 - 2191	Buena	81	< 15	-

(*) Espesor neto para el almacén

5.2 Caracterización y evaluación petrofísica de la Formación Las Ventanas en SB-4 y la Formación Pujálvarez en Benezúzar-1

La estimación de la porosidad en la Formación Calizas de Algas del sondeo SB-4 se ha realizado a partir del registro sísmico, del estudio en microscopio de 6 muestras en lámina delgada y de las estimaciones llevadas a cabo mediante ensayo en laboratorio (porosidad total y porosidad efectiva).

En el estudio cualitativo de permeabilidad a partir de diagráfias, se han utilizado el registro sísmico y el registro de imagen acústica.

Las medidas cuantitativas de permeabilidad realizadas en el sondeo SB-4 han sido de dos tipos: en el laboratorio, sobre 2 muestras, estimando la conductividad hidráulica, y en campo mediante 6 ensayos de permeabilidad Lugeon.

Mediante el estudio de la atenuación de la energía acústica en el registro sísmico, se ha llevado a cabo una identificación de tramos potencialmente permeables, por medio de la estimación del parámetro Ik-Seis.

En el sondeo Benezúzar-1, se estimó la porosidad a partir del registro sísmico y neutrón.

5.2.1 Porosidad y permeabilidad en el sondeo SB-4

➤ Porosidad

El valor estimado de porosidad sísmica no presenta importantes variaciones en todo el tramo estudiado de la Formación Calizas de las Ventanas del sondeo SB-4 (Figura 5.7). Se observan en general valores elevados en las calizas arenosas y en las calizas margosas, con estimaciones comprendidas entre un 28 y un 36 % aproximadamente.

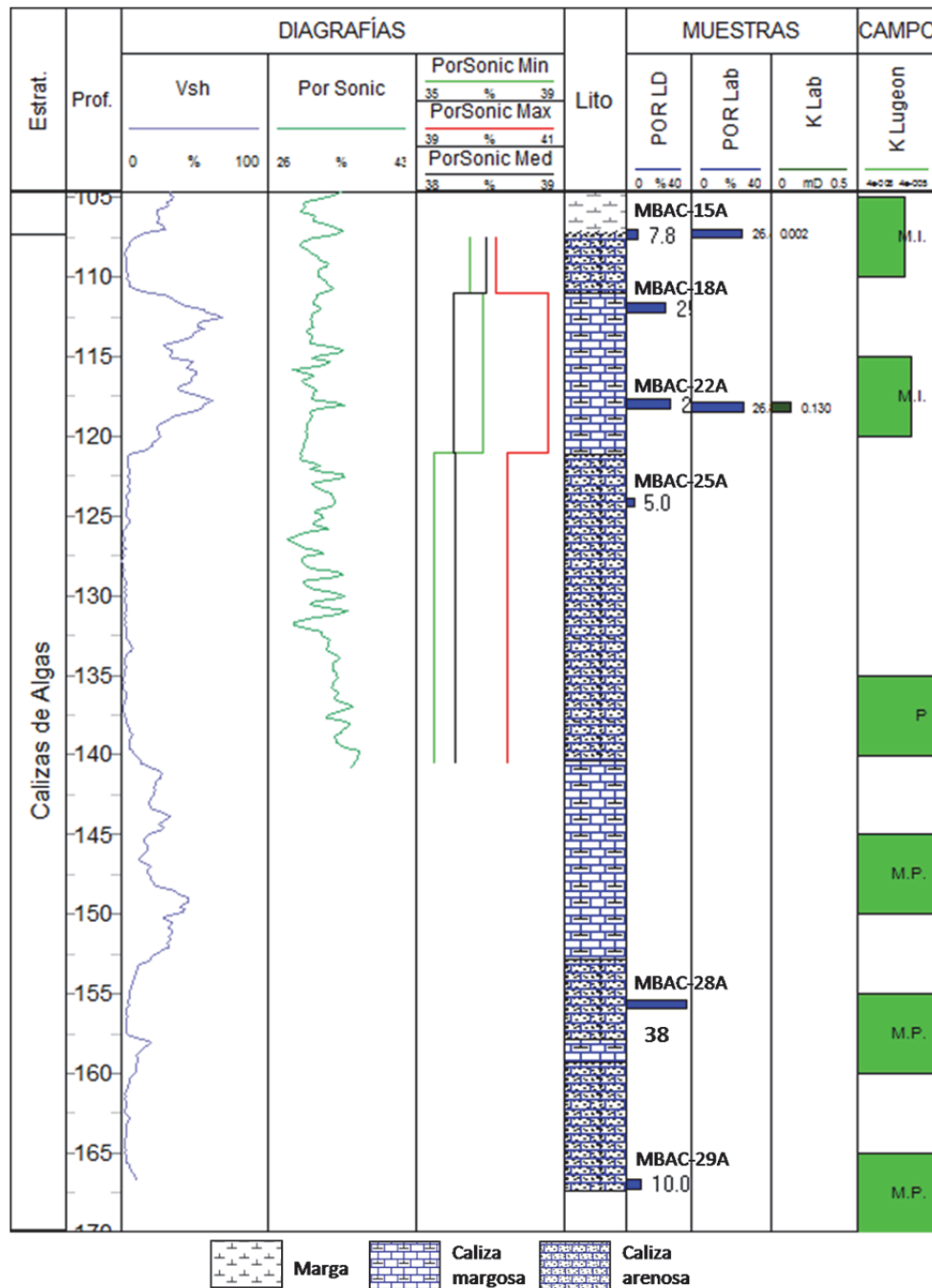


Figura 5. 7. Registros disponibles en la Fm. Calizas de las Ventanas del sondeo SB-4, de izquierda a derecha: volumen de arcillosidad (Vsh), porosidad sónica estimada y gráficos de porosidad sónica mínima, máxima y media estimadas a partir de zonación, columna litológica interpretada, porosidad a partir de lámina delgada (POR LD) y referencias de las muestras, porosidad estimada en laboratorio (POR Lab), conductividad hidráulica de laboratorio (K Lab) y permeabilidad Lugeon (K Lugeon). Se indica la valoración de la permeabilidad Lugeon según la clasificación de Olalla & Sopena (1991): muy impermeable (MI), permeable (P) y muy permeable (MP).

El estudio de porosidad al microscopio de las calizas interpretadas en la Fm. Calizas de algas del sondeo SB-4 revela valores muy diversos, desde el 3% al 39%. En la Figura 5.8, se muestra un resumen de la estimación de la porosidad en las 6 láminas estudiadas; la imagen de la izquierda corresponde a la imagen de la lámina a partir de la cual se estudió la porosidad, y la imagen de la derecha, presenta la porosidad resaltada gráficamente en color negro. Sobre esta segunda imagen es sobre la que se estimó el porcentaje de porosidad.

A partir de la muestra tomada a la profundidad de 107.4 m (Ref.: MBAC-15A), se ha estimado una porosidad poco significativa, del 8 % (Figura 5.8-a). Se trata de una porosidad distribuida de forma muy irregular y de tipo intra e interpartícula preferentemente, aunque también se observó abundante porosidad móldica. A los 107.3 m se realizó sobre una muestra un ensayo de laboratorio, cuyos resultados mostraron una porosidad efectiva del 20 %, y una porosidad total del 26 %.

A los 112 m de profundidad, la muestra en lámina delgada interpretada como Grainstone bioclástica (Ref.: MBAC-18A) reveló una porosidad muy abundante, puesto que además de las pequeñas cavidades huecas de los restos fósiles, entre los distintos fragmentos de roca no hay cemento sino la resina de impregnación (Figura 5.8-b). En conjunto, se ha estimado entre un 21 y un 29 % de porosidad. Es una porosidad de tipo inter e intrapartícula fundamentalmente.

El estudio de porosidad al microscopio sobre la muestra de caliza Packstone bioclástica, tomada a los 118 m de profundidad (Ref. MBAC-22A), ha revelado que la porosidad se distribuye de manera irregular, siendo sobre todo de tipo móldica (*vugs*) aunque también se observa la de tipo intrapartícula formando parte de los bioclastos (Figura 5.8-c). Para esta muestra se ha estimado un valor elevado de porosidad, en torno al 28%. La estimación de la porosidad calculada en laboratorio a partir de una muestra tomada aproximadamente a esta profundidad, entre los 118 y 118.4 m, ha revelado un valor similar, de 26.8 % y de 25.8 % de porosidad total y de porosidad efectiva respectivamente.

Continuando en profundidad, a los 124.2 m, el estudio de la muestra en lámina delgada MBAC-25A, interpretada como una Packstone bioclástica, mostró que el espacio entre los bioclastos está ocupado por una matriz carbonatada. Existe además una cierta porosidad en forma de cavidades. La porosidad es principalmente de tipo intrapartícula, distribuyéndose de manera irregular (Figura 5.8-d), y en función del tramo de la lámina se estima una porosidad baja, comprendido entre el 3 y el 7 %. En general el tamaño de los poros es grande, oscilando entre 50 y 500 μm (mesoporo a megaporo).

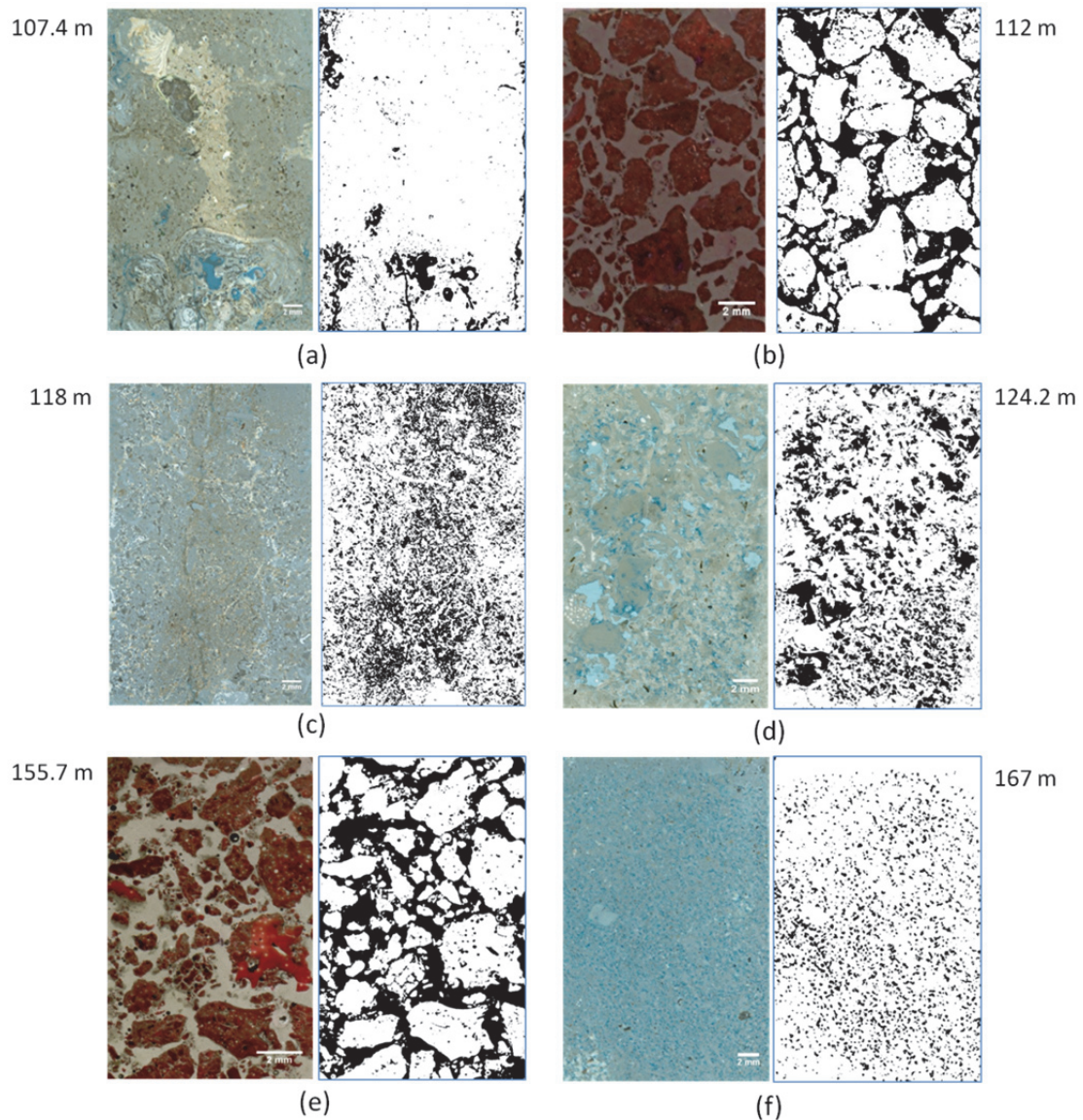


Figura 5. 8. Estimación de la porosidad a partir del estudio de seis muestras en láminas delgadas pertenecientes a la Formación Calizas de las Ventanas del sondeo SB-4. Se indican las profundidades de la muestra al lado de cada lámina: (a) Muestra tomada a los 107.4 m de profundidad (Ref. MBAC-15A).(b) Muestra tomada a los 112 m de profundidad (Ref. MBAC-18A), teñida de rojo de alizarina para distinguir el carbonato; el color rosado entre los fragmentos de bioclastos corresponde a la resina epoxi, y por tanto a la porosidad. (c) Muestra perteneciente a los 118 m de profundidad (Ref. MBAC-22A).(d) Muestra a los 124.2 m (Ref. MBAC-25A).(e) Muestra a los 155.7 m (Ref. MBAC-28A), perteneciente a una Grainstone bioclástica. (f) Muestra tomada a los 167 m de profundidad (Ref. MBAC-29A). Las láminas *a*, *c*, *d* y *f* corresponden a calizas Packstone bioclásticas y fueron teñidas con azul de metileno para distinguir mejor la porosidad. Las muestras *b* y *e* corresponden a calizas Grainstone bioclásticas. Escala de 2 mm en todas.

En otra muestra tomada a los 155.7 m de profundidad (Referencia MBAC-28A), se estimó una porosidad muy elevada, con un valor de 38 % aproximadamente, de tipo interpartícula sobre todo (Figura 5.8-e), y también intrapartícula. Finalmente, para la lámina MBAC-29A perteneciente a los 167 m de profundidad, se estimó una porosidad del 10% (Figura 5.8-f).

➤ Permeabilidad

- A partir de diagráfias

Desde los 128 m de profundidad hasta los 142 m, se observa mayor friabilidad de la formación, tal como se confirma en la irregularidad del perfil del *cáliper* acústico, así como en las observaciones a visu del testigo. Este factor estaría favoreciendo la existencia de permeabilidad.

A partir de la imagen acústica, en la Fm. Las Ventanas en SB-4, apenas se han identificado fracturas, como se puede ver en la Figura 5.9, donde se muestra la representación de las proyecciones polares de las fracturas identificadas, y un histograma de la frecuencia de sus buzamientos. Se trata por tanto, de una formación notablemente homogénea y estructuralmente estable. La fracturación identificada es muy poco abundante y de carácter poco penetrativo, y algunas fracturas se encuentran cementadas por calcita, tal como se ha confirmado mediante las observaciones a visu.

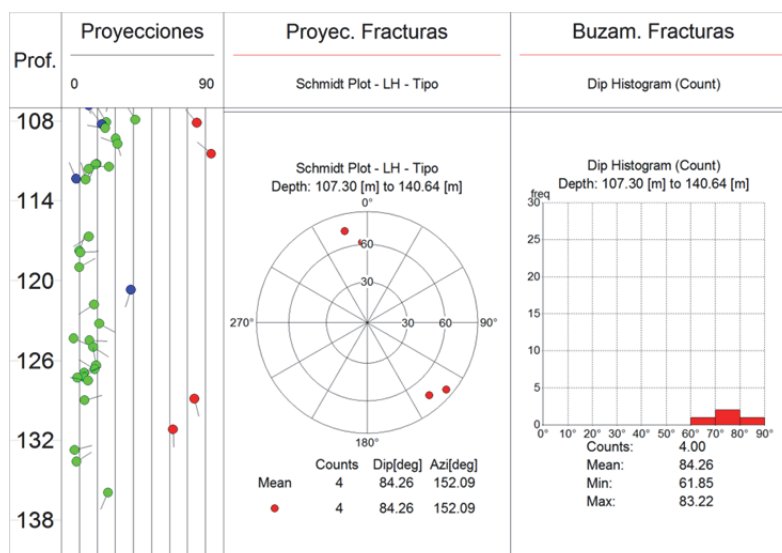


Figura 5. 9. Identificación estructural en la Fm. Las Ventanas del sondeo somero SB-4, de izquierda a derecha: proyección polar de las estructuras sedimentarias (verde) y fracturas (rojo) identificadas, proyección estereográfica equiareal (Schmidt) de las fracturas, y representación, mediante histograma, de las frecuencias de los buzamientos de fracturas.

- A partir de ensayos Lugeon

Se han realizado varios ensayos de permeabilidad Lugeon en las calizas arenosas bioclásticas; en el tramo 105 – 110 m, que comprende una parte de la formación Margas del TAP y otra a la Fm. Calizas de las Ventanas, el valor de permeabilidad (inyectabilidad) obtenido fue de 0.24 U.L. (2.4×10^{-6} cm/s). Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), correspondería a una formación muy impermeable (MI). Si se observa la forma de la gráfica presión-absorción para este tramo (Figura 5.10-a), los valores de absorción aumentan en el proceso de la prueba hasta llegar a un atoramiento, seguido de un destaponamiento al aumentar la presión. Al decrecer la presión de inyección, se produce el proceso inverso. La imagen acústica para este tramo 105 – 110 m, y el correspondiente *cáliper* acústico (Figura 5.7), indican que no existen irregularidades importantes en la formación geológica, y que apenas hay fracturación.

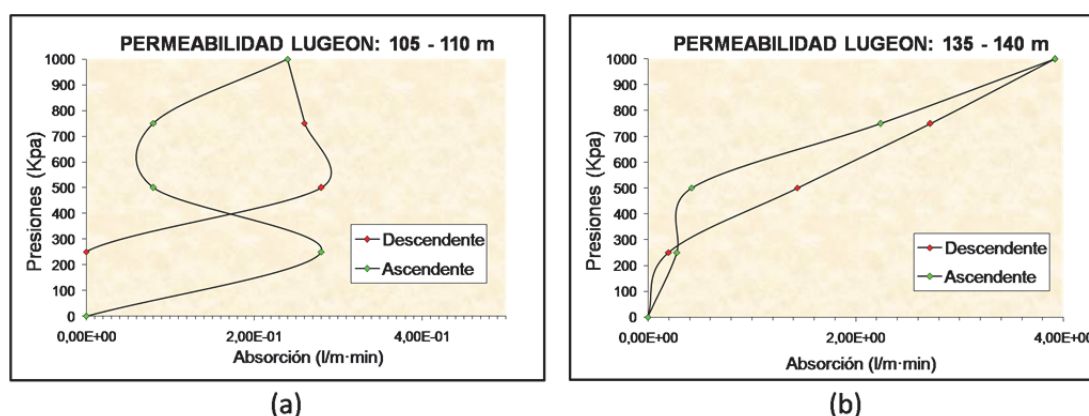


Figura 5. 10. Curvas presión-absorción obtenidas en los ensayos de permeabilidad Lugeon realizados en los tramos 105 – 110 m y 135 – 140 m de profundidad en las Calizas de las Ventanas del sondeo SB-4.

Entre los 115 y 120 m de profundidad, interpretado como calizas margosas, se realizó otro ensayo de permeabilidad Lugeon. El valor de la permeabilidad resultante ha sido de 0.36 U.L. Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), correspondería a una formación muy impermeable (MI). El registro de imagen acústica para este tramo no indicó ningún rasgo de debilitamiento estructural en la pared del sondeo y no se ha identificado fracturación (Figura 5.7). Se trata por tanto de un tramo estructuralmente estable ya que no hay cambios importantes en el perfil del diámetro; el perfil no presenta apenas irregularidades, lo que indica que la formación se comporta de forma homogénea y compacta. Tampoco presenta permeabilidad textural como se puede observar en la recepción de la señal sónica (RX1-1A), confirmando la impermeabilidad indicada por el ensayo Lugeon.

En el tramo 135 – 140 m, interpretado también como caliza arenosa, el valor de la inyectabilidad obtenido mediante ensayo Lugeon fue de 3.92 U.L. Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), correspondería a una formación permeable (P). Observando la gráfica presión-absorción resultante (Figura 5.10-b), se aprecia poca tasa de absorción durante un incremento elevado de presión inicial, es decir, la variación de la absorción no es lineal. Apenas se produce atoramiento; una vez se estabiliza la presión, se produce una absorción lineal y constante hasta el máximo de presión.

Entre los 145 y los 150 m de profundidad, constituido por la misma litología, la permeabilidad estimada a partir de Lugeon dio un valor de 7.68 U.L., es decir muy permeable (MP) según Olalla y Sopeña (1991). A los 1000 KPa no ascendió más la presión y en la descarga a 750 KPa, tampoco. No se pudo realizar la gráfica de la evolución de la absorción con respecto a la presión. Tampoco se dispone de los valores numéricos del ensayo Lugeon realizado entre los 155 y los 160 m, por lo que no se ha podido obtener la gráfica de presión-absorción final, ya que en el ensayo, a 500 KPa de presión, ésta no ascendió más. El valor final de la inyectabilidad fue superior a 6 U.L. Se trataría por tanto de una formación muy permeable (MP).

En la Tabla 5.4, se pueden ver todos los resultados de los ensayos de permeabilidad Lugeon obtenidos en la Formación Las Ventanas en el sondeo SB-4.

Tabla 5. 4. Resultados de permeabilidad Lugeon, en Unidades Lugeon (U.L.) y cm/s, de los ensayos realizados en la Fm. Las Ventanas en el sondeo SB-4 (MI =muy impermeable; P=permeable; MP= muy permeable).

Formación	Tramo ensayado (m)	U.L.	cm/s	Clasificación*
Fm. Calizas de Algas	105 – 110	0.24	2.4E-06	M.I.
	115 – 120	0.36	3.6E-06	M.I.
	135 – 140	3.92	3.9E-05	P.
	145 – 150	> 6	7.7E-05	M.P.
	155 - 160	> 6	> 1.6E-05	M.P.

*Olaya y Sopeña, 1991.

En base a los ensayos de permeabilidad Lugeon se observa por tanto una trayectoria creciente en profundidad; desde los valores muy impermeables entre los 105 y 120 m, hasta valores muy permeables en la parte final del sondeo, a partir de los 130 m de profundidad aproximadamente.

- A partir de ensayos en laboratorio

El resultado obtenido del ensayo en laboratorio de conductividad hidráulica efectuado sobre una muestra de testigo tomada a los 107.2 m, perteneciente a una muestra de caliza arenosa, en la zona de transición de las margas de Torremendo hacia la Caliza de algas, es de 1.4×10^{-11} m/s (0.0015 mD). Según la clasificación de Mejías & López-Geta (2003) pertenece a una formación de baja permeabilidad (BP). Otra muestra ensayada, de caliza margosa, tomada a los a los 118 m de profundidad, dio como resultado un valor de 1.3×10^{-09} m/s (0.13 mD). Este valor corresponde a una formación poco permeable (PP) según Mejías & López-Geta (2003).

Las curvas de estabilización de los ensayos en célula triaxial se pueden observar en la Figura 5.11. La figura representa los cambios los valores de cambio volumétrico (V_w) en función del tiempo (t). Los valores se estabilizan en el tramo coloreado en rosa, que es cuando se toman los valores numéricos para la determinación de K_w . Si comparamos ambas gráficas, en la muestra (b), se produce una estabilización más rápida de la caliza que en la muestra (a), donde se produce la estabilización con más lentitud y con un menor cambio de volumen. La muestra (b), tomada a los 118 m de profundidad aproximadamente, presenta un mayor cambio de volumen, posiblemente como consecuencia de una menor densidad, que generará una conductividad mayor a través de la muestra, tal como se ha podido confirmar en los resultados obtenidos en laboratorio.

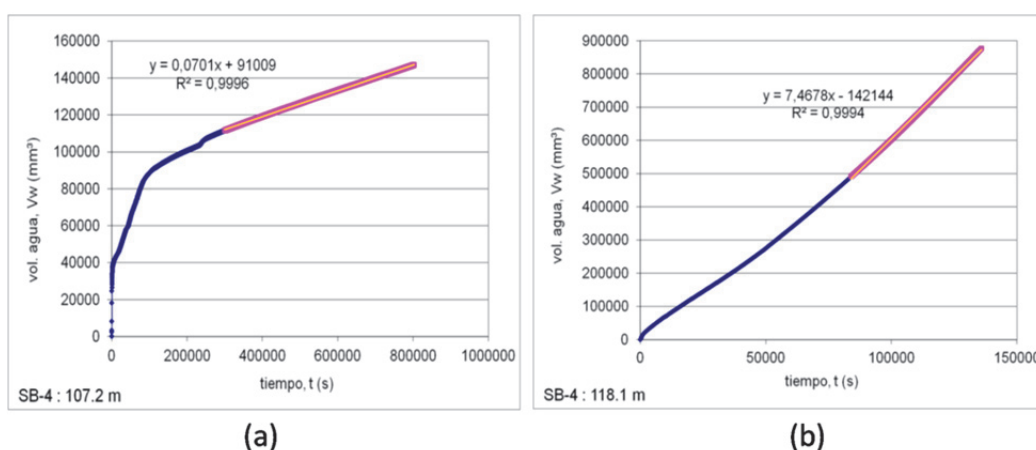


Figura 5. 11. Curvas del consolidación obtenidas mediante el ensayo de permeabilidad hidráulica controlada para dos muestras de la Fm. Calizas de las Ventanas en el sondeo SB-4: izquierda, muestra a los 107.2 m (caliza arenosa) y derecha, 118.1 m de profundidad (caliza margosa).

- A partir del estudio de atenuación de la energía acústica

Con el objetivo de hacer una estimación de las zonas permeables en la Fm. Calizas de Algas del sondeo SB-4, se estimó el parámetro Ik-Seis según la metodología utilizada por Mari & Guillemot (2012). El valor de superficie específica (Ss) utilizado fue el obtenido en los ensayos de laboratorio, y el de la porosidad (\emptyset), fue el estimado a partir del registro sínico.

El perfil del parámetro Ik-Seis obtenido se puede observar en la Figura 5.12. El parámetro, que ha sido normalizado, muestra un incremento en los tramos 116 - 118, 122 - 124 m, y a partir de los 136 m y hasta el final. El índice de forma o *Shape Index* (Ic) observado en la Figura 5.12 muestra coherencia con el parámetro Ik-Seis para el tramo 116 – 118 m, por lo que podría existir cierta permeabilidad en esa zona, sin embargo, el valor de permeabilidad Lugeon en esa zona es de Muy Impermeable.

Si se compara el Ik-Seis, a nivel cualitativo, con los resultados obtenidos a partir de los ensayos Lugeon, se observará que solo hay coherencia de resultados en el tramo final indicado, lo que indicaría la presencia de permeabilidad a partir de los 134 m aproximadamente. En esa zona se observa un aumento de la atenuación.

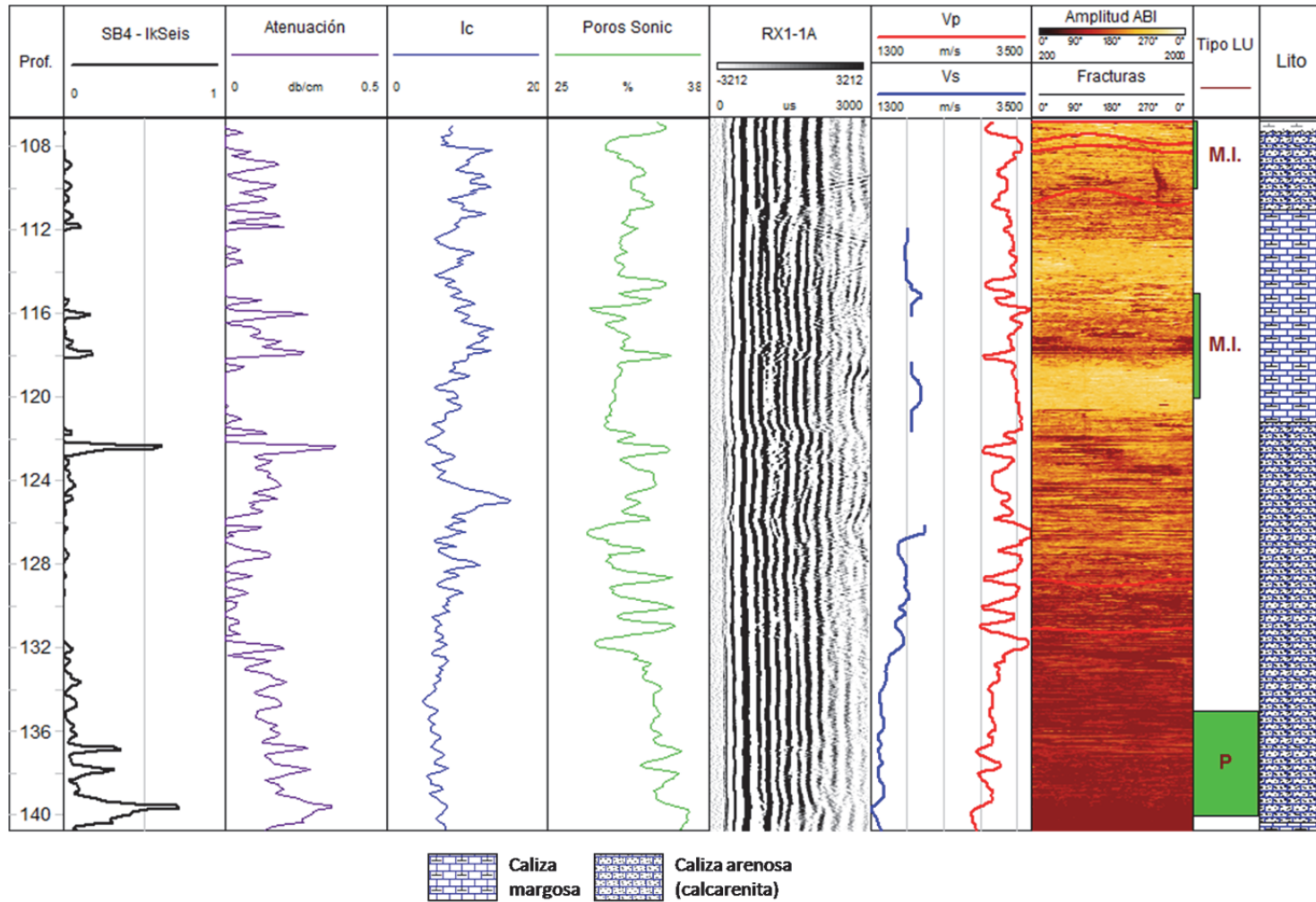


Figura 5. 12. Tramo 107– 141 m en el sondeo SB-4, de izquierda a derecha: parámetro Ik-Seis estimado, atenuación, índice de forma (Ic) o ShapeIndex, porosidad sónica, llegada de la señal acústica al primer receptor (RX1-1A), velocidad de ondas P (Vp) y ondas S (Vs), imagen acústica de sondeo (Amplitud ABI) y fracturas (líneas rojas) identificadas a partir de la imagen, tipología de los tramos ensayados mediante Lugeon según Olaya & Sopeña (1991) (M.I. = Muy impermeable; P = Permeable), y columna litológica interpretada.

5.2.2 Valoraciones petrofísicas en el sondeo Benejúzar-1

Según el informe técnico de la empresa perforadora, la elevada cementación en los reservorios areniscosos, puede inducir a errores cuantitativos en la interpretación petrofísica final de las diagrfías, alterando la calidad del almacén. No obstante esta cementación es local y manifiesta variaciones importantes según el informe.

Las porosidades neutrón y sónica según el informe técnico presentan valores que oscilan entre 10 y 24 % en el caso de las primeras, y entre 7 y 17 % en el caso de las segundas.

Los valores de porosidad sónica estimados en esta tesis no difieren mucho de los resultados obtenidos por la empresa perforadora, oscilando entre 5 y 19 % de mínimo y máximo respectivamente. Asimismo, la porosidad total aparente, estimada a partir del registro de densidad aparente y registro de porosidad neutrón, está dentro del rango 8 – 18% aproximadamente.

5.2.3 Conclusiones

En la Tabla 5.5, se pueden observar los rangos de algunos valores petrofísicos obtenidos para la Formación Las Ventanas del sondeo somero SB-4 y para la Formación Pujálvarez del sondeo profundo de petróleo Benejúzar-1: Porosidad sónica (ϕ_s), porosidad neutrón (ϕ_n), porosidad por densidad (ϕ_d), porosidad a partir de lámina delgada (ϕ_{LD}), porosidad total estimada en laboratorio (ϕ_{tLab}), permeabilidad estimada en laboratorio (K Lab) y permeabilidad obtenida mediante ensayos Lugeon (K Lugeon).

Tabla 5. 5. Valores estimados en la Fm. Calizas de las Ventanas de SB-4 y en la equivalente, Fm. Pujálvarez del sondeo Benejúzar-1: Porosidad sónica (\emptyset_s), porosidad neutrón (\emptyset_n), porosidad por densidad (\emptyset_d), porosidad en lámina delgada (\emptyset_{LD}), porosidad en laboratorio (\emptyset_{tLab}), y conductividad hidráulica de laboratorio (K Lab) y permeabilidad Lugeon (K Lugeon).

	Formación	Litología	\emptyset_s (%)	\emptyset_d (%)	\emptyset_n (%)	\emptyset_{LD} (%)	\emptyset_{tLab} (%)	K Lab (cm/s)	K Lugeon (cm/s)
SB-4	Las Ventanas	Caliza arenosa bioclástica (calcarenita)	28 - 36	-	-	3 - 38	26	Zona Transición = 1.4E-09	105 - 110 m = 2.4E-06 135 - 140 m = 3.9E-05 155 - 160 m > 6E-05
		Caliza margosa bioclástica		-	-	21 - 29	27	118 m = 1.3E-07	115 - 120 m = 3.6E-06 145 - 150 m = 7.7E-05
Benejúzar-1	Pujálvarez	Arenisca calcárea (calcarenita?)	5 - 19	7 - 14.5	10 - 24	-	-	-	-

➤ Porosidad

A partir del análisis del registro sísmico de onda completa, se han identificado valores específicos de velocidad de Ondas P en las calcarenitas y calizas margosas de la Formación Calizas de Algas del sondeo SB-4. A partir de los tiempos de tránsito de la matriz de la formación carbonatada, se han estimado los valores de porosidad sónica (\emptyset_s) para las diferentes litologías interesantes como almacén tanto en el sondeo SB-4 como en el sondeo de petróleo profundo Benejúzar-1 (Tabla 5.5). Estos valores son muy elevados en las calcarenitas del sondeo SB-4, mientras que los estimados en las de la formación equivalente, la Fm. Pujálvarez, han dado valores más bajos.

El estudio de muestras en láminas delgadas tomadas en la Fm. Calizas de Algas del sondeo SB-4 revela una porosidad total muy variable (Tabla 5.5). En general, abunda la porosidad de tipo interpartícula e intrapartícula, además de la mólida.

Los valores de porosidad total estimados a partir de lámina delgada, de ensayos de laboratorio (total y efectiva) en la formación carbonatada del sondeo SB-4, son superiores al 20%. Los valores de porosidad total y efectiva en la formación carbonatada de Benejúzar-1 oscilan entre 8 y 18 %.

➤ Permeabilidad

Mediante la observación de los perfiles del diámetro de perforación, SP o el registro sísmico de onda completa, se ha podido establecer una valoración visual, para la invasión de fluidos tanto en las calizas arenosas como en las calizas margosas del sondeo SB-4. En las calcarenitas de la Formación Pujálvarez, no se ha podido obtener ningún dato de permeabilidad.

A partir del estudio del registro de imagen acústica, se han identificado en el sondeo SB-4 dos familias de fracturas naturales en la Formación Las Ventanas, pero muy escasas. La fracturación es poco penetrativa, lo que confiere escasa permeabilidad de tipo "secundario". Algunas fracturas se encuentran cementadas por calcita, tal como se ha confirmado posteriormente mediante las observaciones a visu. En la Fm. Margas del TAP, la fracturación es ligeramente más abundante, siendo las fracturas en su mayoría cerradas o con una abertura no visible.

Los ensayos de permeabilidad Lugeon realizados en la Fm. Calizas de Algas del sondeo SB-4 muestran resultados muy diversos. En la Tabla 5.5, se pueden observar estos valores en cm/s; ningún resultado supera los 100 mD. La permeabilidad Lugeon responde a una permeabilidad por fracturación y a una escala tal que no es comparable a los resultados obtenidos a pequeña escala en laboratorio.

El resultado obtenido a partir del ensayo de conductividad hidráulica en laboratorio sobre una muestra perteneciente a la zona de transición de la Fm. Torremendo a la Fm. Las Ventanas en SB-4, dio un resultado de baja permeabilidad (BP). Otro ensayo realizado sobre una muestra tomada a los 118 m de profundidad, y correspondiente a una caliza margosa bioclástica, dio como resultado una formación poco permeable.

El parámetro Ik-Seis estimado en la Fm. Las Ventanas de SB-4 muestra la existencia de permeabilidad en dos tramos, desde 122 a 124 m, y a partir de los 136 m y hasta el final. La comparación con los resultados obtenidos a partir de los ensayos Lugeon a escala métrica, muestra una correspondencia evolutiva en profundidad entre ambos resultados, confirmándose un incremento perceptible de la permeabilidad a partir de los 134 m de profundidad aproximadamente. Los resultados de permeabilidad Lugeon y los resultados del parámetro Ik-Seis son coherentes.

La fracturación identificada a partir de imágenes acústicas apenas existe, y por tanto no se tiene en cuenta en cuanto a influencia en la permeabilidad de la formación.

➤ Valoración final del par sello – almacén

La Formación margas de Torremendo en el sondeo SB-4 podría ser una buena formación estanca debido a la apenas existencia de fracturas y su buena estabilidad estructural, una aceptable homogeneidad litológica y un espesor superior a los 100 m.

La Formación calizas de las Ventanas del sondeo SB-4 presenta valores de porosidad elevados (>20 %), tanto de porosidad sónica como de porosidad observada mediante lámina delgada. En este último caso, la porosidad es principalmente de tipo interconectada (efectiva).

No se evidencia una permeabilidad significativa por fracturas (secundaria), y tampoco se ha identificado, en el registro sísmico de onda completa, permeabilidad textural. Aunque los valores de permeabilidad Lugeon así como el parámetro Ik-Seis indican cualitativamente la existencia de cierta permeabilidad a partir de los 135 m de profundidad, los resultados numéricos, según Chadwick *et al.* (2008), son muy bajos como para ser indicadores positivos en una formación reservorio. De igual modo, los resultados de conductividad hidráulica obtenidos en laboratorio también se considerarían valores muy bajos (<10 mD) para una buena formación reservorio.

En la Tabla 5.6, se muestra un resumen de los valores finales indicativos positivos o cuestionables como formación sello y formación reservorio en los sondeos SB-4 y Banejúzar-1.

Tabla 5. 6. Parámetros estimados para la valoración de la formación sello y formación almacén de los sondeos SB-4 y Banejúzar-1 (\varnothing_t =porosidad total, \varnothing_e = porosidad efectiva).

		Litología	Prof. (m)	Continuidad lateral	Espesor* (m)	Poros. \varnothing_t y \varnothing_e (%)	Permeab. (mD)
SB-4	Sello	Marga / Lutita	0 - 107	Buena	107	-	-
	Almacén	Caliza arenosa (calcarenita)	107 - 167	Cambios laterales	60	20 - 27	2 – 78
Banejúzar-1	Sello	Marga	83 - 596	Buena	525	-	-
	Almacén	Arenisca carbonatada	607 - 654	Cambios laterales	47	8 - 18	-

(*) Espesor neto para el almacén

6. INTERPRETACIÓN LITOLÓGICA DE FORMACIONES DETRÍTICAS POTENCIALES PARA ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ Y DE SUS FACIES CONFINANTES

Las facies detríticas estudiadas en esta tesis abarcan dos zonas diferentes de la Península Ibérica. Por un lado, las Unidades Surpirenaica Central y Occidental, que acogen el sondeo somero SE-3 y los sondeos profundos Cajigar-1 y Monesma-1, respectivamente, y con ellos, el estudio de la formación reservorio Areniscas de Arén (Cretácico superior), y su confinante, el conjunto Formación Tremp (facies Garum) y Formación Posa. Y por otra parte, la Sierra de Alcaraz, en la Cordillera Bética, donde se han estudiado los tramos yesíferos (K4+K5), y los tramos arcillosos y arenosos (K3+K2) del Keuper (Triásico), identificados como potencial formación confinante y almacén respectivamente, y que han sido cortadas por el sondeo somero SB-1, y correlacionadas y estudiadas también en los sondeos profundos Salobral-1 y Carcelén-1.

6.1 Sondeo SE-3 (Orrit – Lleida) y sondeos Cajigar-1 y Monesma-1 (Huesca)

En la Tabla 6.1, se puede ver un resumen de los registros adquiridos en el sondeo somero SE-3 para esta tesis, y la información disponible para el estudio de las formaciones de interés. También se estudiaron los registros de resistividad Normal larga (RES64N) y Normal corta (RES16N), potencial espontáneo (SP), que fueron adquiridos por la empresa CGS (IGME, 2010).

Tabla 6. 1. Registros adquiridos en esta tesis en el sondeo SE-3: Radioactividad Gamma Natural (GR), imagen acústica de sondeo (ABI) y registro sónico de onda completa (FWS). Se indica el número de muestras analizadas mediante Difracción de Rayos X (DRX) y en lámina delgada (LD) en la facies Garum y Fm. Posa y en la Fm. Areniscas de Arén.

SE-3	Diagrafías			Muestras	
	GR	ABI	FWS	DRX	LD
Garum + Posa	0 – 160.5 m	30 – 160.5 m		5	2
Areniscas de Arén				1	6

Como apoyo a la interpretación litológica, se analizaron, mediante Difracción de Rayos X, 5 muestras de la facies Garum y 1 muestra en la Formación Areniscas de Arén, y 2 muestras en lámina delgada en la facies Garum y 6 en la Formación Areniscas de Arén (resultados detallados en Anexo III).

En el sondeo de petróleo Cajigar-1, se dispuso de un número reducido de registros: Radioactividad Gamma Natural (GR) y sónico (DT) (CGS, 1976). Como paso previo a la utilización de esta información, el registro GR tuvo que ser digitalizado.

Los registros disponibles para el tramo a interpretar litológicamente en el sondeo de petróleo Monesma-1, según su informe geológico (DeGolyer & McNaughton, 1960), son los representados en la Tabla 6.2. El análisis detallado de las diagráfias, unido a la correlación con los registros del sondeo somero SE-3 adquirido para esta tesis, ha proporcionado una interpretación de estos tramos de interés.

Tabla 6. 2. Registros disponibles para el estudio del sondeo Monesma-1: Radioactividad Gamma Natural (GR), Resistividad Normal Corta Amplificada (RES), Potencial Espontáneo (SP), calíper mecánico y registro de porosidad neutrón.

	GR	RES	SP	<i>Caliper</i> (Mecánico)	Neutron
Monesma-1	X	X	X	X	X

6.1.1 Interpretación litológica de la facies Garum y Formación Posa y de la Formación Areniscas de Arén en el sondeo SE-3

Los histogramas realizados con los valores de GR, RES64N y Vp permitieron comprobar que los datos presentaban dos claras agrupaciones de valores en el registro GR y en el RES64N.

Para establecer una diferenciación entre la formación confinante (facies Garum y Fm. Posa) y la formación reservorio (Formación Areniscas de Arén) en el sondeo SE-3, se ha representado, mediante *cross-plot*, el registro de radioactividad gamma natural (GR) frente al registro de resistividad normal larga (RES64N) (Figura 6.1).

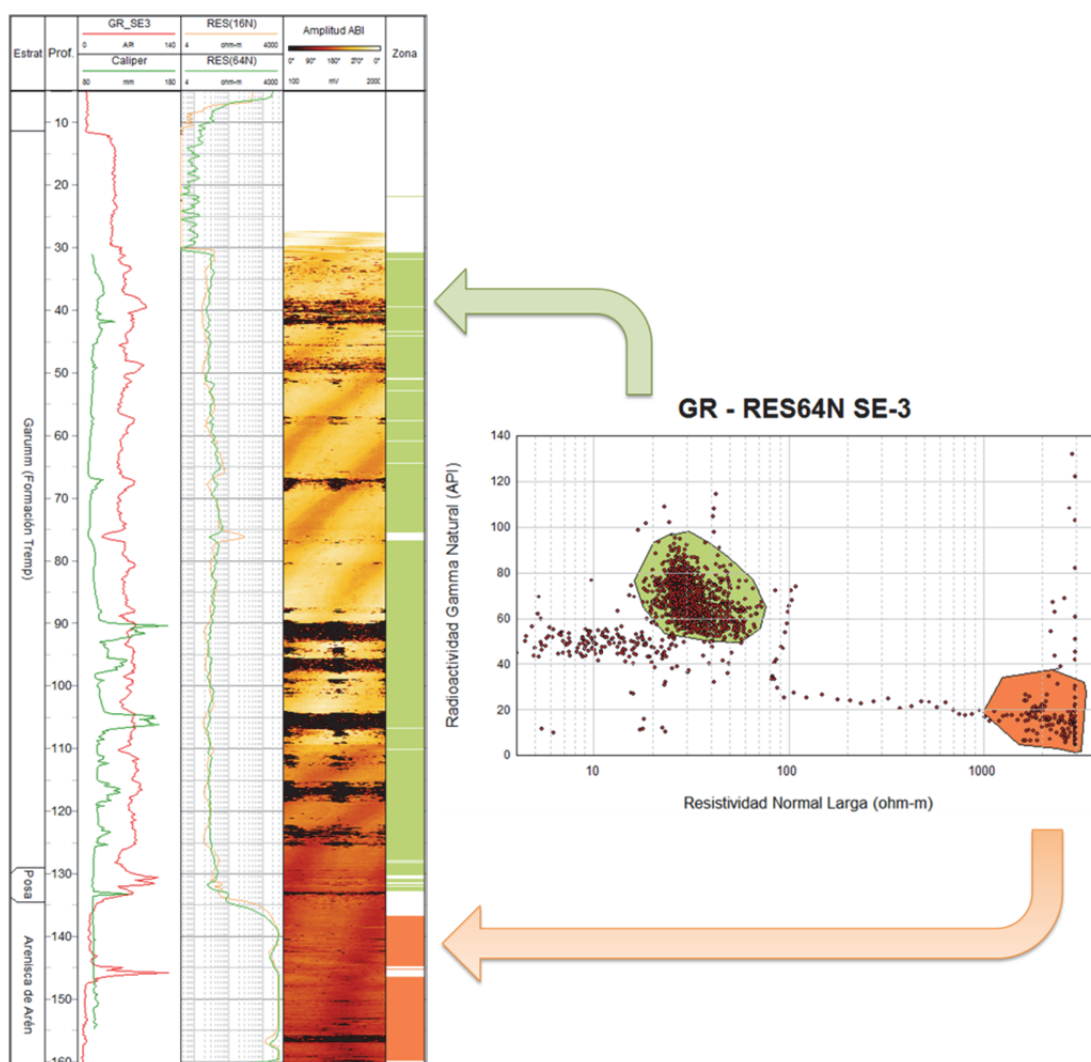


Figura 6. 1. Registros en el sondeo SE-3, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), cáliper acústico, Resistividad Normal larga (RES64N) y corta (RES16N), imagen acústica de sondeo (ABI), columna cronoestratigráfica y columna de zonación según el *cross-plot* realizada entre los 11 y los 160.3 m de profundidad.

Se han diferenciado dos agrupaciones de lecturas; el grupo resaltado en color naranja posee los valores más elevados de resistividad y los más bajos de radioactividad gamma natural, mientras que los puntos englobados en la zona color verde presentan mayoritariamente los valores más elevados de GR de todo el sondeo, así como los más bajos de resistividad normal larga. Esta agrupación ha sido proyectada en profundidad junto con los demás registros, correspondiendo el grupo verde a la facies confinante, identificada por el IGME como la facies Garum y Fm. Posa (IGME 2009), y el grupo de puntos de color naranja, como la formación reservorio, identificada como la Fm. Areniscas de Arén. Se ha establecido el límite entre ambas en los 134 m de profundidad aproximadamente.

➤ **Interpretación litológica de la facies Garum en el sondeo SE-3**

De acuerdo con los registros de la testificación geofísica obtenidos y su representación mediante *cross-plot* en el apartado anterior, la formación considerada confinante del sondeo SE-3 se localiza desde superficie hasta los 134 m de profundidad aproximadamente (Figura 6.1). Para una interpretación litológica detallada de esta zona, se han representado, mediante *cross-plot*, el registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) y de Resistividad Normal Larga (RES64N), y se han tenido en cuenta los valores de la Velocidad de ondas P (Figura 6.2).

En el *cross-plot* se han diferenciado dos agrupaciones resaltadas en color verde y naranja (B y C respectivamente). El campo verde agrupa los valores más elevados de GR y los más bajos de resistividad RES64N, con valores de Vp muy fluctuantes (2000 - 3400 m/s). La zona naranja comprende las lecturas más elevadas de RES64N –muy dispersas – y las más bajas de GR para la zona de sello. Esta zonación ha sido proyectada en una columna en profundidad (Figura 6.2).

El tramo de la columna de zona de la Figura 6.2 marcado con la letra A, corresponde a la formación que estaba entubada durante la adquisición de datos, y no se incluyó en el *cross-plot* porque podría llevar a error su zonación. La interpretación litológica de este tramo ha contado con la ayuda de las observaciones de testigos.

A continuación se presenta una descripción más detallada de los diferentes tramos:

Grupo B: tramos 30 – 53 m y 89 – 126.3 m

El valor medio de la Radioactividad Gamma Natural en los tramos incluidos en el grupo B es moderado (65 API), y se caracteriza por presentar incrementos cíclicos llegando a alcanzar valores máximos comprendidos entre 76 y 100 API.

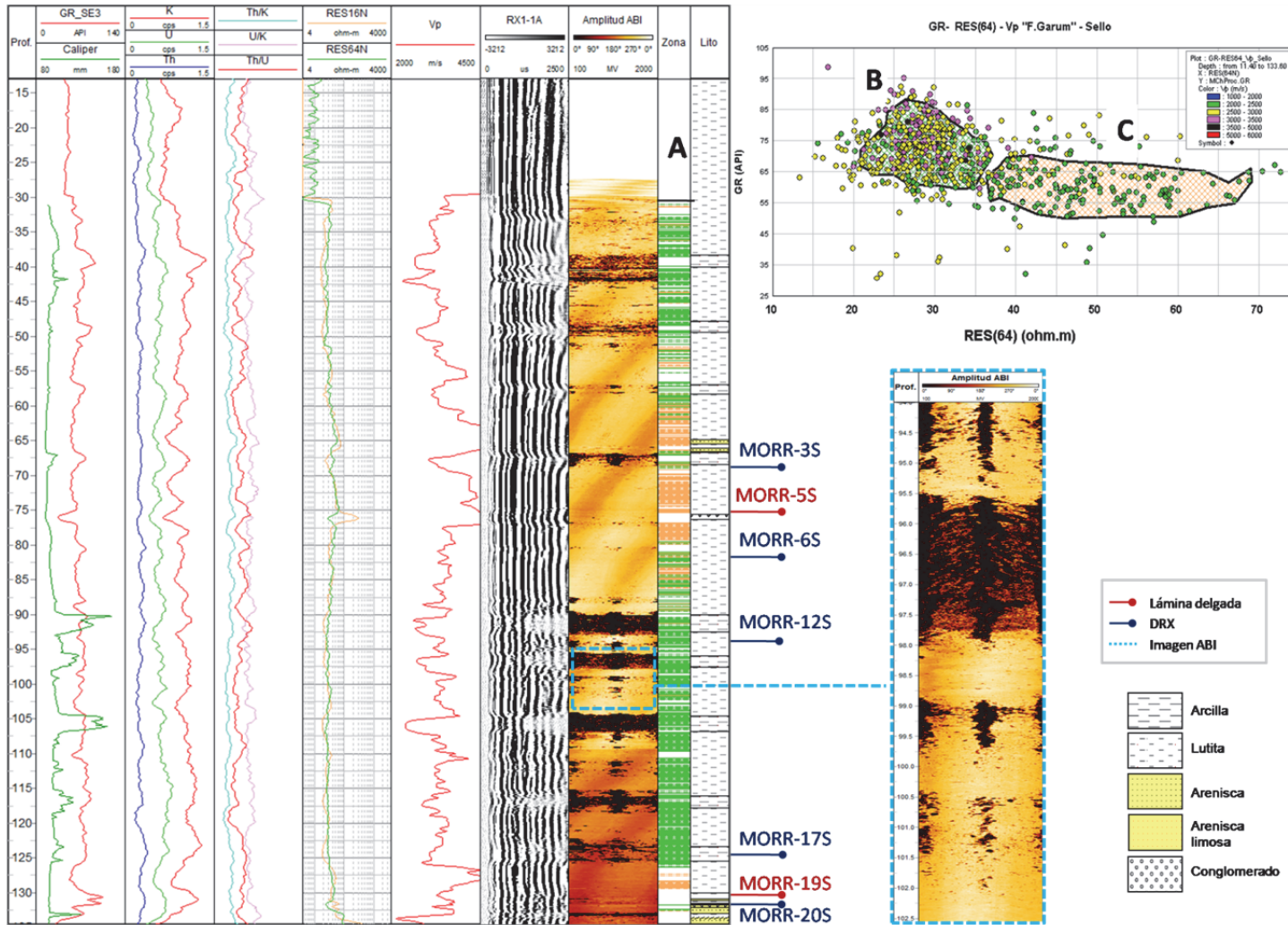


Figura 6. 2. Registros en la zona confinante del sondeo SE-3, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* acústico, valores de espectrometría (U, Th y K) y las relaciones espectrométricas (Th/K, U/K, Th/U), Resistividad Normal Corta (RES16N) y Normal Larga (RES64N), velocidad de ondas P (Vp), registro de señal sónica en el primer receptor (RX1-1A), imagen acústica (ABI), columna de zonación a partir del *cross-plot* y columna litológica interpretada. *Cross-plot*: GR frente a RES64N para la facies Garum y Formación Posa. Se indican las profundidades a las que se tomaron muestras para análisis de DRX y lámina delgada, así como la imagen acústica entre los 94 y 102.5 m de profundidad.

El valor medio de RES64N para los tramos B es bajo, del orden de 37 ohm·m y las lecturas presentan gran homogeneidad. En cambio, la relación Th/U en todo el tramo B es muy irregular, y estaría indicando los diferentes límites estratigráficos.

Desde los 89 m de profundidad, la respuesta de resistividad RES64N muestra un valor medio más bajo, de 29 ohm·m. También a partir de esta profundidad los valores de radioactividad espectral K^{40} , U^{238} y Th^{232} , aumentan su valor, indicando un mayor contenido arcilloso.

El perfil del *cáliper* acústico es irregular en las zonas donde existe un incremento de GR, lo que confirma que se trata de zonas más inestables y erosionables, más arcillosas. Destacan sobre todo dos niveles; de 90 a 98 m y de 105 a 107 m de profundidad en que se observa un diámetro de gran magnitud. Esto se refleja también en la imagen acústica, donde estos incrementos de diámetro se pueden identificar con las zonas oscuras (Figura 6.2). Estas zonas indican elevada erosión de la formación y fracturación, que viene atestiguada por el registro FWS, además de las observaciones de los testigos. En algunos casos, el material está totalmente disgregado. La señal del registro sónico de onda completa se hace más débil en esos niveles, mientras que en los registros de resistividad Normal larga y corta (RES64N y RES16N) se observa un descenso de la respuesta.

A la profundidad de 95 m y de 125 m, se tomaron dos muestras y se estudiaron mediante DRX (Referencia MORR-12S y MORR-17S respectivamente, Figura 6.2). Ambas muestras presentan calcita y cuarzo como componentes principales, y como componentes secundarios, minerales de la arcilla (mica, clorita, caolín y esmectita) (resultados detallados en Anexo III).

Por los valores bajos de resistividad y elevados de radioactividad gamma natural a lo largo de todos estos tramos, además de los valores estimados de Vp, se han interpretado estos tramos como los propios de una formación lutítica enriquecida en contenido limoso como así lo demuestran los análisis de DRX en polvo, y con presencia de niveles arcillosos. Los niveles cíclicos en los que el valor de GR y de *cáliper* acústico es superior, se han interpretado como intercalaciones arcillosas.

Grupo C: tramos 53 – 89 y 126 – 134 m

Se produce en estas secciones del sondeo un ligero incremento del valor de la resistividad con respecto al resto de los tramos descritos anteriormente, además de aumento valor de la velocidad de ondas P (Figura 6.2), que asciende hasta los 4500 m/s.

La respuesta GR apenas cambia con respecto a los tramos del grupo B, y el perfil del *cáliper* acústico muestra una mayor homogeneidad, indicando que es una zona más compacta.

A la profundidad aproximada de 76 m, se ha identificado un nivel con un descenso notable en la lectura del registro GR, y un incremento de la resistividad corta, identificándose como un nivel micro-conglomerático. Una muestra tomada en este mismo nivel, y estudiada en lámina delgada (Referencia MORR-5S) confirma esta interpretación (Figura 6.3): se pueden observar los granos redondeados a subredondeados, de un tamaño considerable (1 - 5 mm), englobados en una matriz granosoportada.

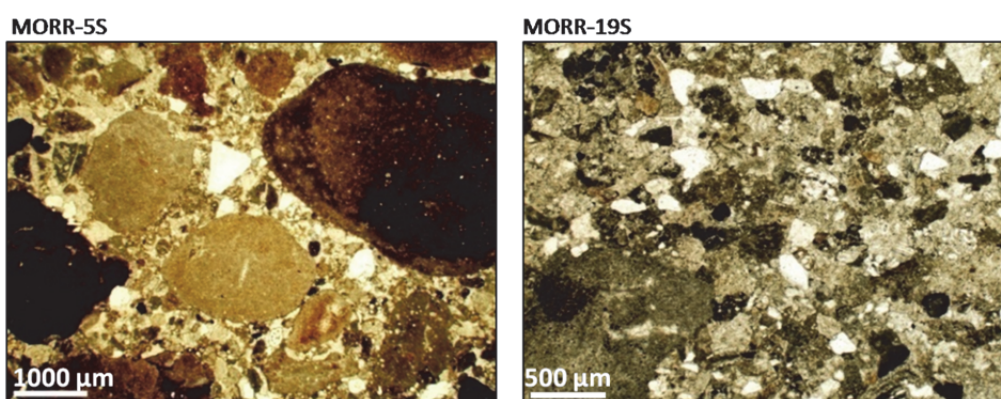


Figura 6. 3. Fotografías de las dos muestras estudiadas en lámina delgada en la formación sello del sondeo SE-3. La muestra con referencia MORR-5S fue tomada a los 76 m de profundidad, y pertenece a la facies Garum, y la muestra MORR-19S, tomada a los 131 m, se localiza en la Formación Posa. Ambas fotos están tomadas sin nicoles cruzados.

A los 67.7 y 81.5 m de profundidad, se han tomado dos muestras (Ref.: MORR-3S y Ref.: MORR-6S respectivamente) para analizar mediante DRX. Los resultados, similares en ambos casos, indican que los componentes principales son la calcita y el cuarzo, y los componentes secundarios minerales de la arcilla (Anexo III). Presenta pues la misma composición que el resto de muestras analizadas en el tramo B anteriormente descrito.

En la parte final de la zona sello, desde los 129 a 134 m, se observa un ligero incremento en la respuesta GR, y sobre todo, la proveniente del isótopo K^{40} ; el aumento brusco del contenido en potasio está indicando un cambio litológico. Estos niveles más elevados de radioactividad podrían deberse a restos de materia orgánica (vegetal) observados en el testigo y confirmados por la lectura elevada de U. Se observa también un incremento en los valores de resistividad, que indicarían la existencia de niveles más limoso-arenosos. Estos materiales presentan laminación paralela, tal como se confirma en la imagen acústica (Figura 6.4). Observando la curva V_p y el perfil de la primera llegada de la señal sónica al primer receptor, también se aprecia un incremento de la velocidad de ondas P (3900 - 4600 m/s) en este último tramo.

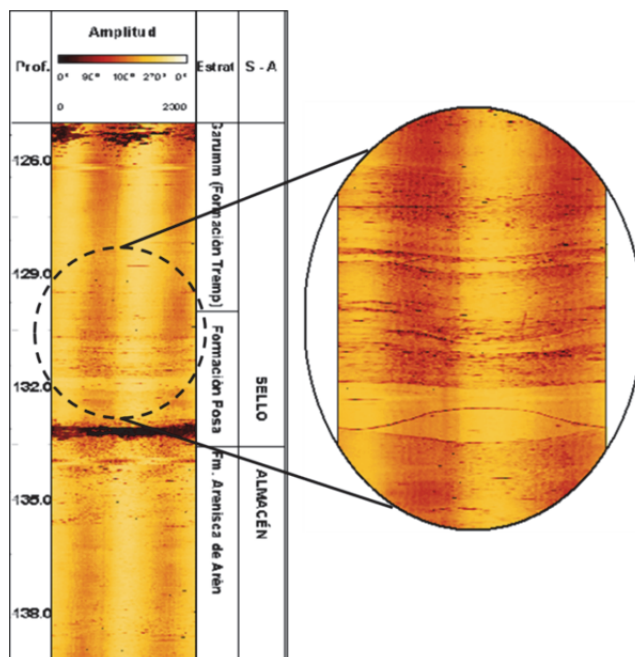


Figura 6. 4. Imagen acústica entre 126 y 138 m en la zona de transición, identificada como la Fm. Posa del sondeo SE-3. Se aprecia laminación paralela y subhorizontal. En los registros se corresponde con un incremento de la velocidad de ondas P y GR

El estudio al microscopio de una muestra tomada a los 131 m de profundidad (Ref.: MORR-19S) ha revelado que se trata de una litarenita con abundantes fragmentos carbonatados, bastante heterogranular (Figura 6.3). Los granos de cuarzo están cementados por cristales más pequeños con colores de interferencia de primer orden, es decir, minerales de la arcilla. El análisis mediante DRX también confirmó la presencia de minerales de la arcilla.

Este tramo C se ha interpretado como una lutita con alguna intercalación limoso-arenosa de mayor entidad que en el tramo B. Desde los 129 a los 123 m, la formación es aún más limosa, con niveles incluso arenosos, como así lo constata la lámina delgada y los valores de Vp.

➤ Interpretación litológica de la Formación Areniscas de Arén en el sondeo SE-3

Se han calculados los histogramas de distribución de los valores de GR entre 134 y 161 m, y para el registro Vp entre los 134 y 154 m de profundidad, dentro de la Fm. Areniscas de Arén (Figura 6.5). Tal como se puede ver en la figura, las distribuciones son unimodales en ambos casos, lo que se ha interpretado como una elevada homogeneidad litológica en la formación. Las observaciones en lámina delgada y de los testigos han ayudado en la interpretación litológica a una escala diferente.

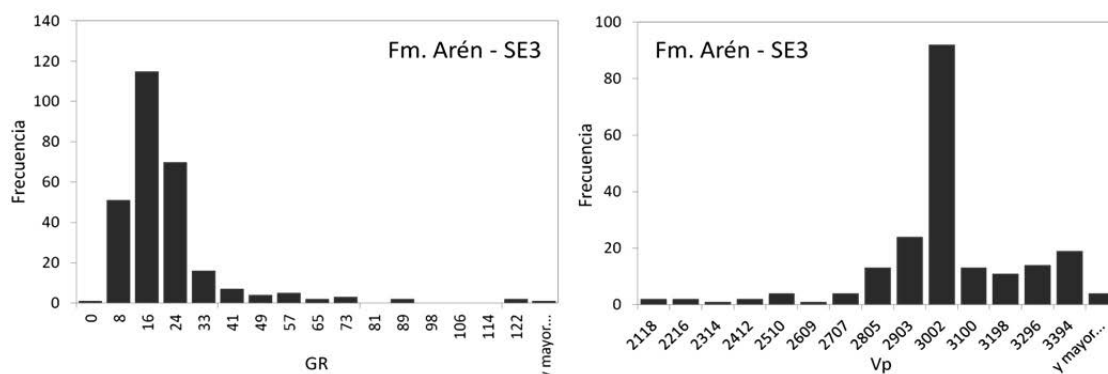


Figura 6. 5. Histogramas de Radioactividad Gamma Natural (GR) a la izquierda y de Velocidad de ondas P (Vp) a la derecha, en la Fm. Areniscas de Arén del sondeo SE-3. Como se puede observar, presentan una distribución marcadamente unimodal.

En la figura 6.6, se pueden observar los registros geofísicos que se han utilizado para la interpretación litológica en detalle, así como las profundidades donde se tomaron muestras para los diferentes análisis realizados. En general, se produce a partir de los 134 m de profundidad un descenso importante de radioactividad gamma natural (30 API). El valor de la resistividad RES64N es elevado en todo el reservorio, con un valor medio de 2200 ohm·m, y una desviación también elevada (556 ohm·m). El valor estimado de la velocidad de ondas P para la zona almacén oscila entre 2600 y 3500 m/s principalmente.

El diámetro del sondeo (*cáliper* acústico) muestra en general un perfil muy regular en todo el tramo de la Fm. Areniscas de Arén, indicando un nivel de compactación mayor que en la zona superior de sello.

Se observa un descenso en la respuesta de GR con respecto a la zona de sello (Figura 6.6), así como un incremento notable en las respuestas de las resistividades. La relación U/K se incrementa en varios puntos, debido a la presencia de fracturas (U disuelto precipitado).

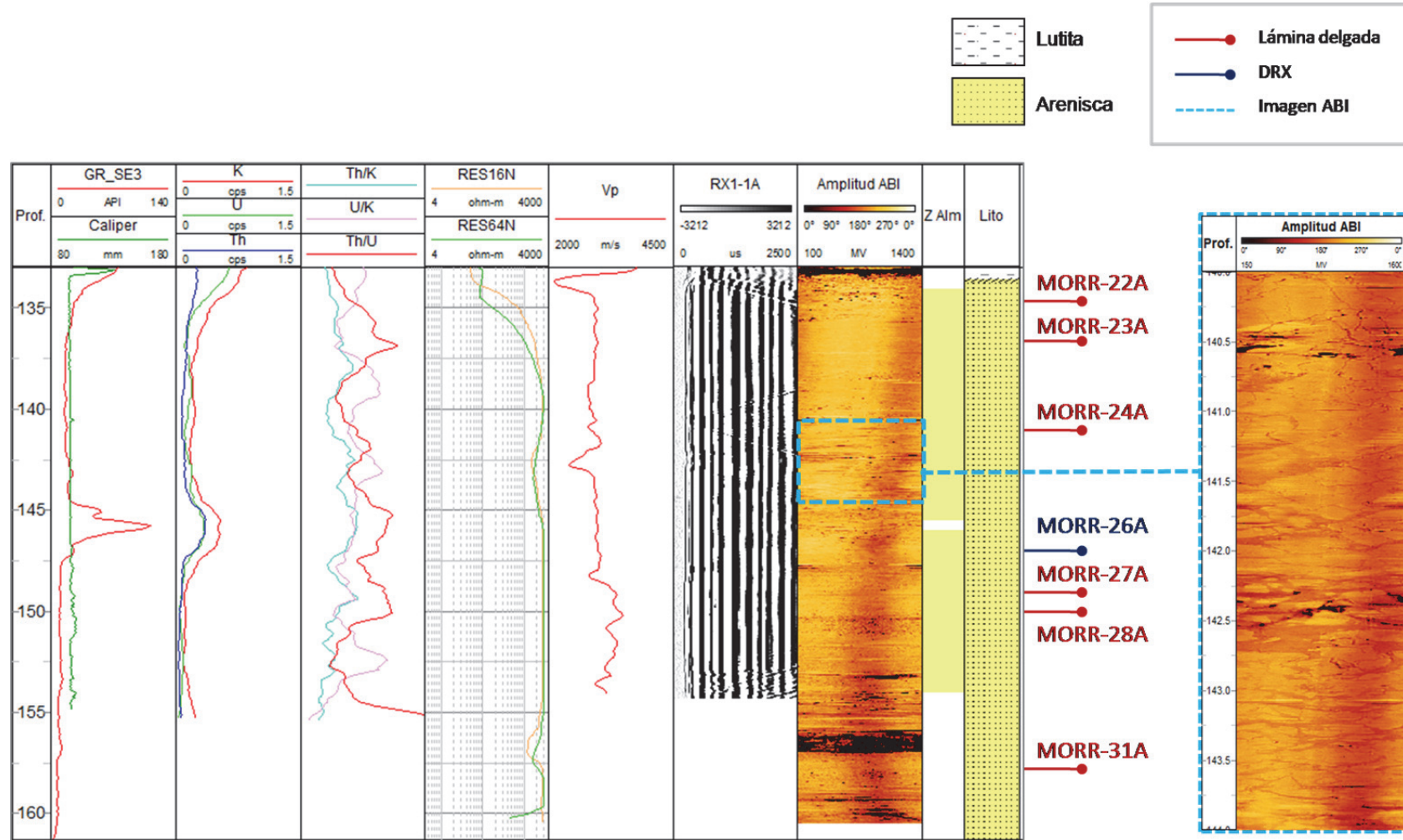


Figura 6. 6. Registros en la Fm. Areniscas de Arén del sondeo SE-3, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *calíper* acústico, espectrometría de K, U y Th, y relaciones Th/K, U/K, Th/U, resistividad Normal corta (RE16N) y Normal profunda (RES64N), velocidad de ondas P (Vp), llegada de la señal sónica al primer receptor (RX1-1A), imagen acústica (ABI), columna de zonación a partir del *cross-plot* y columna litológica interpretada. Se indican las profundidades de la toma de muestras para análisis de DRX y lámina delgada, y un ejemplo de imagen acústica correspondiente al tramo 140 – 144 m.

Se ha identificado algún nivel centimétrico brechoide (por ejemplo, a los 142 m de profundidad), en el que los valores de las resistividades y Vp son bajos, y es visible en el registro de imagen acústica.

Desde los 148 m hasta el final del sondeo se produce un nuevo descenso en la respuesta GR (10 API), acompañado de un incremento en la velocidad de ondas P. Estas características podrían deberse a un incremento en la cementación de la litología en profundidad, apreciable también en las observaciones a visu de los testigos.

Para poder establecer una clasificación más detallada de la Formación, así como observar la evolución granulométrica de la misma en profundidad, se tomaron 6 muestras a diferentes profundidades para analizar al microscopio mediante lámina delgada (Figura 6.7).

A la profundidad de 134 m, fue analizada una muestra en lámina delgada (Ref.: MORR-22A), y se concluyó que se trata de una arenisca constituida fundamentalmente por granos subangulosos a angulosos grandes de cuarzo, y otros más pequeños (0.1 - 0.2 mm) subredondeados, embebidos en una matriz carbonatada granosoportada que presenta oxidación ferruginosa intercrystalina (Figura 6.7). La muestra se ha interpretado como una litarenita, según la clasificación de Pettijohn (1975).

Se estudiaron otras dos muestras en lámina delgada, con referencias MORR-23A y MORR-24A, tomadas a las profundidades de 137 y 139 m respectivamente. Observando las muestras al microscopio se puede concluir que ambas están formadas por diferentes granos detríticos de tamaño arena fina, entre 100 y 200 micras, moderadamente clasificados (Pettijohn, 1975) con morfología subangulosa y textura granosoportada. La muestra MORR-23A presenta granos con una mayor angulosidad que la observada en los granos de la muestra MORR-24A. La composición de los granos es, en ambos casos, mayoritariamente carbonatada, en forma de bioclastos, fragmentos de rocas carbonatadas micríticas y peloides. Adicionalmente también hay una elevada presencia de cristales de cuarzo y fragmentos de *chert*. En la muestra MORR-24A se observan, además de estos componentes descritos, óxidos de hierro. Se han interpretado ambas muestras como litarenitas donde predominan los fragmentos carbonatados, observándose además abundancia de cuarzo.

Se analizó una muestra mediante DRX a los 145.5 m de profundidad (resultados en Anexo III). Los resultados indican la presencia de calcita como mineral principal, y como mineral secundario, cuarzo. El incremento notable en la respuesta de GR a la profundidad de 145.8 m podría explicarse por la existencia de algún mineral arcilloso, ya que ni el registro de imagen

acústica, ni el análisis de velocidad de las ondas sónicas o la observación del testigo, proporcionan ningún tipo de información al respecto.

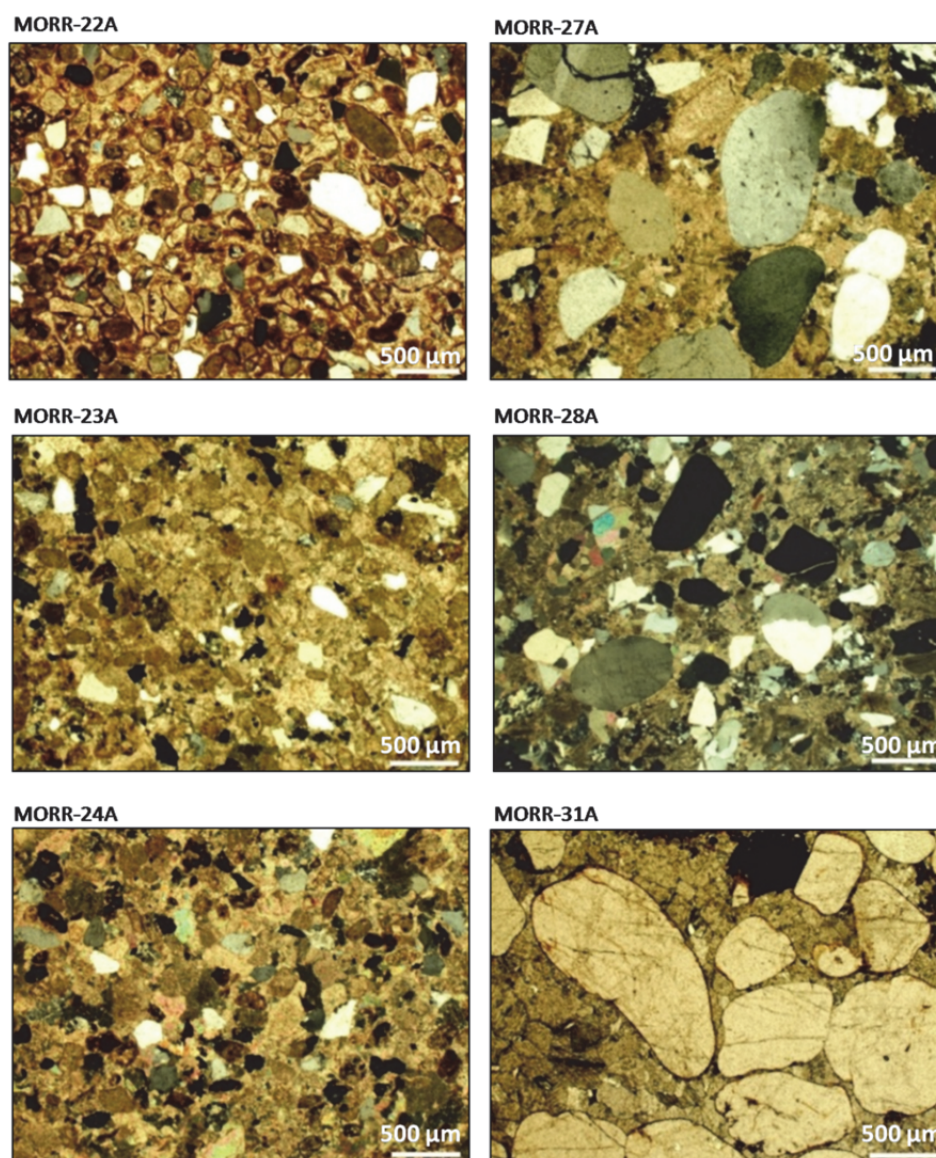


Figura 6. 7. Fotografías de las muestras estudiadas en lámina delgada en la Formación Areniscas de Aréndel sondeo SE-3. La muestra con referencia MORR-22A fue tomada a los 134 m de profundidad; MORR-23A, a los 137 m; MORR-24A a los 139 m; MORR-27A fue tomada a los 148.5 m; MORR-28A a los 150 m; y la muestra MORR-31A fue tomada a los 158 m de profundidad. Todas las fotos, exceptuando MORR-31A, se han tomado con nicóles cruzados.

A 148.5, 150 y 158 m de profundidad, se estudiaron las muestras en lámina delgada con referencia MORR-27A, MORR-28A y MORR-31A respectivamente (Figura 6.7).

Las muestras MORR-27A y MORR-28A muestran granos heterométricos cuyo tamaño oscila entre 0.2 y 1 mm. Los granos, en su mayoría de cuarzo, poseen morfología sub-redondeada, y

también se puede identificar presencia de bioclastos. La matriz está formada por cemento carbonatado. Se han clasificado estas dos muestras como litarenitas.

La muestra con referencia MORR-31A pertenece a una roca sedimentaria carbonatada de textura grano-soportada. Está formada por granos detríticos de tamaño arena gruesa a muy gruesa (1 - 2 mm), con una buena selección y morfología redondeada. Los distintos granos son principalmente de cuarzo policristalino, pero también se pueden encontrar fragmentos de caliza micrítica, bioclastos y peloides. El espacio intergranular es cemento carbonatado formado por cristales de esparita. Se ha clasificado esta muestra como una litarenita con matriz de cemento de calcita esparítica.

Por los valores de GR, resistividades y Vp registrados en las diagraffas del sondeo, análisis de muestras y observaciones del testigo, se ha interpretado el tramo estudiado, entre 134 y 161 m, como una arenisca, con predominio de cemento carbonatado.

6.1.2 Interpretación litológica en el sondeo Cajigar-1

El tramo en el que se ha llevado a cabo la interpretación litológica de este sondeo, de acuerdo con el informe geológico del mismo (referencia), ha comprendido el rango 1160 – 1320 m, un tramo mayor que el correlacionable con las formaciones del sondeo SE-3, para una mejor contextualización del sondeo.

Para la identificación de la zona confinante y la zona reservorio en el sondeo Cajigar-1, y su posterior interpretación litológica, se ha representado, mediante *cross-plot*, el registro GR frente al registro de la velocidad de ondas P (Vp) (Figura 6.8). Se han distinguido dos grupos de puntos: un grupo, resaltado en color gris, se caracteriza por presentar los valores más elevados de radioactividad Gamma Natural (GR) y los más bajos de velocidad de ondas P (Vp) de todo el tramo representado, y otro grupo, resaltado en color naranja, con valores elevados de Vp (> 5000 m/s) y los más bajos de GR (< de 35 API) de todo el gráfico. Se han asignado respectivamente a la formación sello y a la formación almacén, identificándolas como la facies Garum y la Fm. Areniscas de Arén respectivamente, y su límite se ha fijado en 1277 m. Este límite difiere del señalado en el informe geológico de la empresa perforadora (CGS, 1976), que lo situaba a los 1310 m de profundidad.

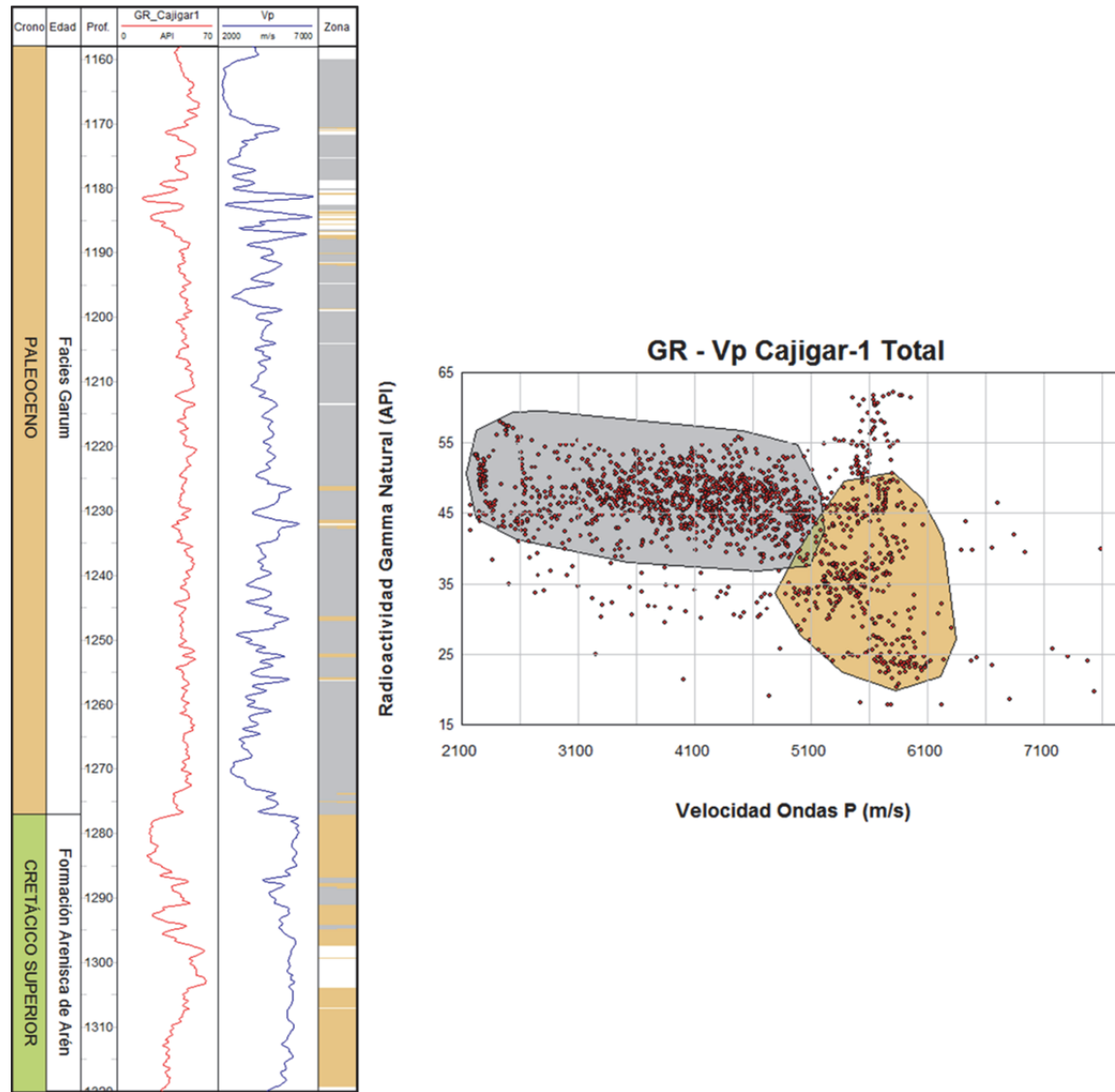


Figura 6. 8. Registros en el tramo 1160 - 1320 m del sondeo Cajigar-1, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), Velocidad de ondas P (Vp) y columna de zonación establecida a partir del *cross-plot* de GR frente a Vp en ese mismo tramo. Se han diferenciado dos grupos de puntos resaltados en color gris y naranja, identificados como la formación sello y formación almacén respectivamente.

➤ **Interpretación litológica de la formación confinante (facies Garum) en Cajigar-1**

Mediante el mismo procedimiento de representación gráfica de los únicos dos registros disponibles del sondeo Cajigar-1, se han distinguido dos grupos de lecturas dentro de la facies Garum, denominados con las letras A y B.

El grupo A, resaltado en color gris en el *cross-plot* de la Figura 6.8, lo constituyen valores de radioactividad natural entre 40 y 60 API, pero con las velocidades de ondas P más bajas de toda la gráfica (< 3000 m/s). El grupo de puntos englobados bajo la letra B, lo constituyen valores de GR ligeramente menores (40 - 55 API aproximadamente) y una velocidad Vp con rango de valores elevado, entre 3000 y 5300 m/s. Se puede ver la proyección en profundidad de la distribución de los grupos de puntos, junto con los demás registros en la Figura 6.9. Ambos grupos poseen una dispersión de puntos muy amplia, así que no se ha realizado la descripción de su distribución espacial por tramos.

En base a estos valores y a la tendencia que presentan los perfiles de los dos registros, y dentro de los límites de la información disponible, se ha interpretado el grupo A como una formación lutítico-arcillosa. El grupo B ha sido interpretado como una marga.

Entre 1180 y 1185 m de profundidad, se observan niveles de escaso espesor, con valores muy elevados de Vp (6800 m/s) y valores muy bajos de GR (17 API). Estas capas han sido interpretadas como carbonatos, posiblemente dolomías.

➤ **Interpretación litológica de la formación reservorio (Formación Areniscas de Arén?) en Cajigar-1**

El *cross-plot* resultante para el tramo 1277 – 1320 m de profundidad del sondeo Cajigar-1, correspondiente a una parte de la Formación Areniscas de Arén, muestra dos agrupaciones de lecturas, C y D (Figura 6.9).

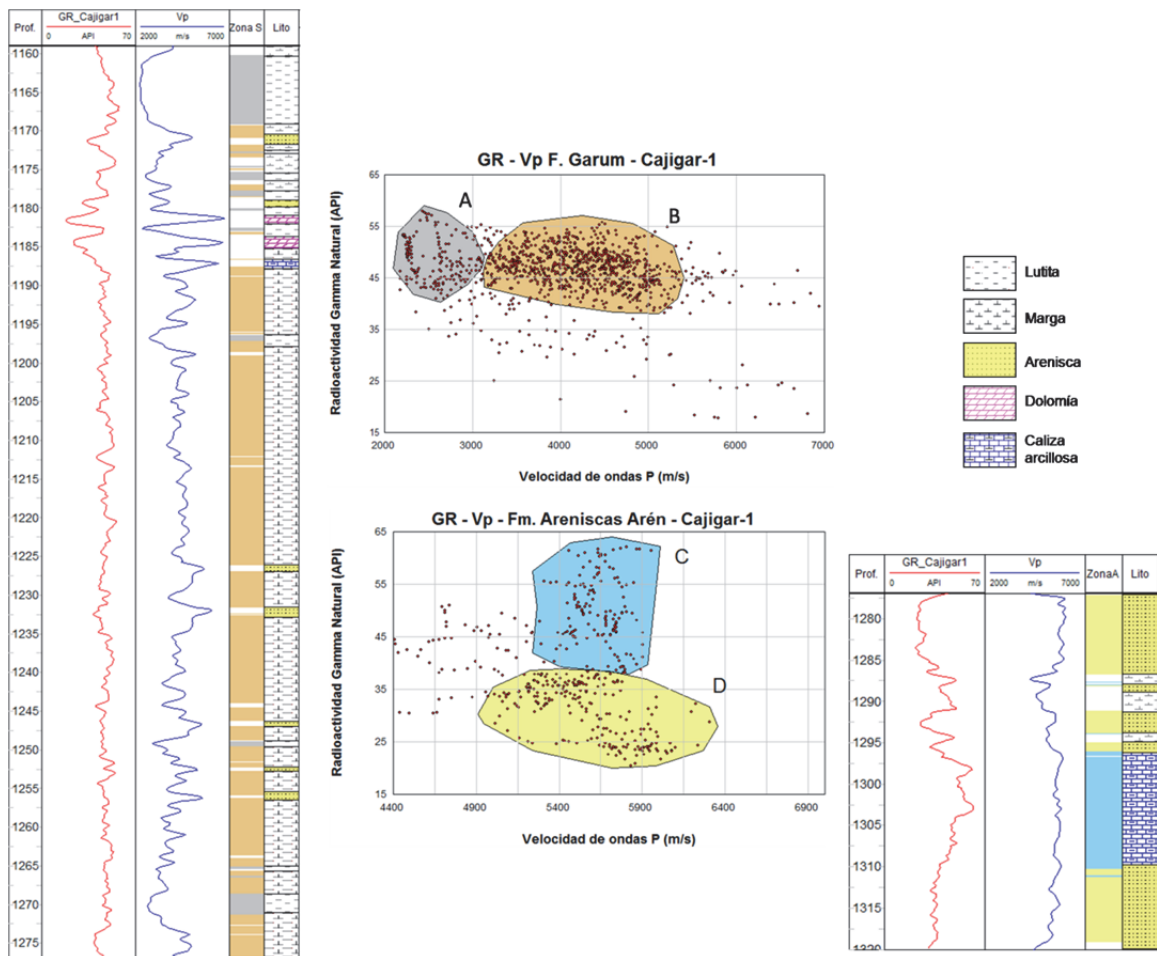


Figura 6. 9. Cross-plots de los registros de Radioactividad Gamma Natural (GR) y Velocidad de ondas P (Vp) para la facies Garum (cross-plot superior) y la Fm. Areniscas de Arén (cross-plot inferior) en Cajigar-1.

El grupo C engloba los valores más elevados de Radioactividad Gamma Natural de toda la gráfica (40 - 67 API), y registros de Vp comprendidos entre 5400 y 5900 m/s. Este grupo de puntos, resaltado en color azul, se localiza fundamentalmente en el tramo 1296 – 1310 m, y está formando un paquete de espesor centimétrico a métrico. Debido a los valores tan elevados de velocidad de ondas P estimados, y a la respuesta de Radioactividad Gamma natural ligeramente más elevada que los tramos anteriores, se ha interpretado este como una caliza margoso-arcillosa.

El grupo D presenta valores muy elevados de velocidad de ondas P (5100 - 6100 m/s), y de GR muy bajos, entre 17 y 40 unidades API. Ambas diagráfias muestran un perfil más suavizado que en la zona margosa, indicando que se trata de una zona más compacta. Ha sido interpretado como una arenisca carbonatada, pues los valores de GR no son todo lo bajos que se cabría esperar si se tratara de una caliza limpia. Podría tratarse de materiales muy semejantes a los descritos en el sondeo SE-3 (litarenitas). Los tramos donde se ha identificado

son 1277 – 1287 m, 1291 – 1296 m y de 1310 m hasta los 1320 m, es decir, alcanzan espesores entre 5 y 10 m, menores que los indicados en el sondeo de perforación. Se han interpretado algunas intercalaciones de margas con un espesor de 1 a 2 metros.

6.1.3 Interpretación litológica en el sondeo Monesma-1

Se ha realizado la interpretación litológica del tramo 982 - 1235 m de profundidad. En primer lugar se representó, mediante *cross-plot*, el registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente al de la resistividad Normal Corta Amplificada (ASN) (Figura 6.10). Se han distinguido dos agrupaciones, resaltadas en color beige y en color amarillo, e identificados como la formación sello y formación almacén respectivamente. El límite entre ambas formaciones se localizó a los 1181 m de profundidad, aproximadamente.

➤ Interpretación litológica de la formación confinante (facies Garum) en el sondeo Monesma-1

El grupo de puntos resaltado en color beige en el *cross-plot* y en la columna de zonación (Figura 6.10), se caracteriza por presentar los valores de Radioactividad Gamma Natural más elevados de toda la gráfica, comprendidos entre 40 y 60 API. Los valores de resistividad Normal Corta Amplificada son también bajos, mayoritariamente inferiores a 15 ohm·m.

El perfil del *cáliper* mecánico se muestra irregular en todo esta zona, indicando que se trata de una zona poco compacta.

Se han interpretado las lecturas pertenecientes a este grupo como una formación margosa, cuyo espesor en el tramo estudiado es de 180 m aproximadamente. Esporádicamente se han interpretado niveles de caliza arcillosa, caracterizada por valores más bajos de GR (25 - 30 unidades API), y de resistividad (8 - 13 ohm·m).

No obstante, los valores de Radioactividad Gamma Natural observados son bajos para tratarse de una zona margosa, lo cual se podría explicar por la presencia composicional de evaporitas (no se dispone de análisis de DRX).

➤ **Interpretación litológica en la formación reservorio (Fm. Areniscas de Arén?) del sondeo Monesma-1**

El grupo de puntos resaltados en azul en el *cross-plot* de la Figura 6.10 se caracteriza por presentar valores más elevados de resistividad que los de la zona sello explicada anteriormente, con valores superiores a los 35 ohm·m. El valor de la Radioactividad Gamma Natural en este grupo es bajo, oscilando entre 28 y 42 API.

El cáliper mecánico se muestra bastante homogéneo, pero a partir de los 1224 m de profundidad disminuye, lo cual podría estar indicando una mayor inestabilidad de la formación a partir de ese punto, o un cambio de entubación (no hay informe técnico para confirmarlo), junto con el valor de la resistividad, que también disminuye muy ligeramente. Estos valores tan bajos de resistividad (32 – 47 ohm·m) y de radioactividad gamma natural (< 50 API) podrían estar indicando la presencia de areniscas de matriz carbonatada en el tramo estudiado. Se trata de areniscas de edad Maastrichtiense según el informe geológico de perforación (DeGolyer & McNaughton, 1960), y que podrían pertenecer a la Fm. Areniscas de Arén.

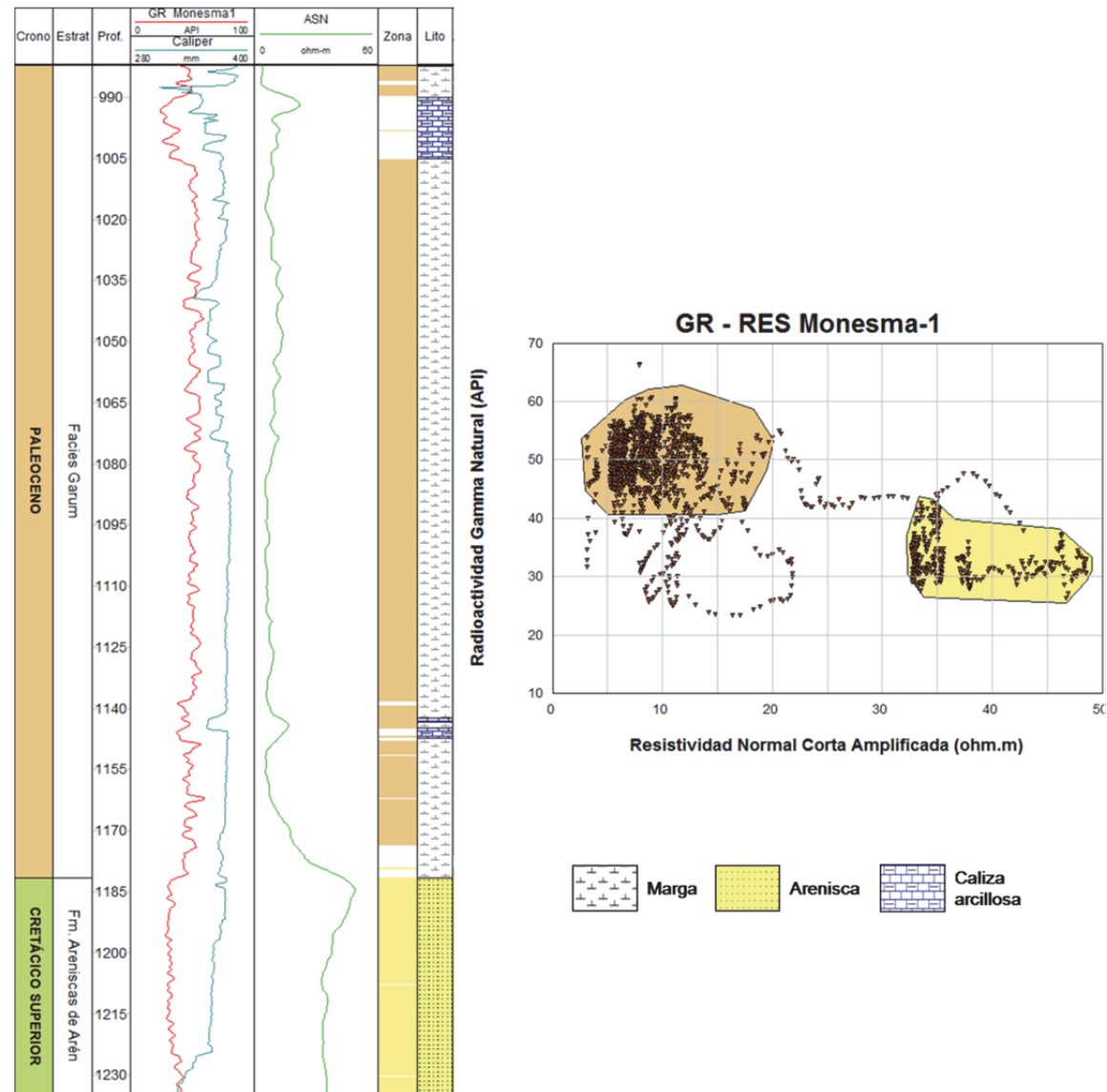


Figura 6. 10. Registros en el tramo 932 - 1235 m en el sondeo Monesma-1: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* mecánico, Resistividad Normal Corta Amplificada (ASN), columna de zonación a partir del *cross-plot* y columna litológica interpretada. *Cross-plot*: registro de GR frente a ASN, donde se han diferenciado dos grupos de puntos.

6.1.4 Conclusiones

La información de la columna litológica del sondeo SE-3, suministrada inicialmente por el IGME (IGME, 2009), ha sido modificada de acuerdo con las interpretaciones realizadas a partir de diagrfías y de los análisis de las muestras.

En base a las interpretaciones litológicas realizadas, se ha identificado la Formación Areniscas de Arén como la formación geológica reservorio en el sondeo SE-3, localizándose entre los 133 m y el final del sondeo, 161 m aproximadamente. La facies Garum (Formación Tresp) y la Formación Posa, se han identificado como la formación confinante, localizándose entre los 12 y los 133 m de profundidad.

Se han podido correlacionar estratigráficamente, mediante el uso de diagrfías, la facies Garum y la Fm. Areniscas de Arén identificadas en el sondeo SE-3, con las análogas en los sondeos petrolíferos antiguos y profundos Cajigar-1 y Monesma-1. Para establecer la correlación estratigráfica entre los tres sondeos se utilizó el registro de Radioactividad Gamma natural (GR) y el registro sónico, que mostraron similares tendencias de curvas en varios tramos.

El sondeo de petróleo Cajigar-1 se encuentran a 10.9 km de distancia del sondeo SE-3 en dirección NO, y el tramo correlacionado de las Fms. Garum-Arén ha sido 1181 - 1300 m de profundidad aproximadamente. A su vez, esta sección de las Fms. Garum-Arén del sondeo Cajigar-1 se ha podido correlacionar con el tramo de profundidad comprendido entre los 966 y los 1180 m del sondeo Monesma-1, que se encuentra a 14.7 km de distancia del sondeo SE-3, en dirección Oeste (Figura 6.11). El límite Garum-Arén en el sondeo Cajigar-1 ha sido modificado de acuerdo al estudio de las diagrfías disponibles, variando su localización aproximadamente 30 m con respecto al indicado en el informe de perforación (CGS, 1976).

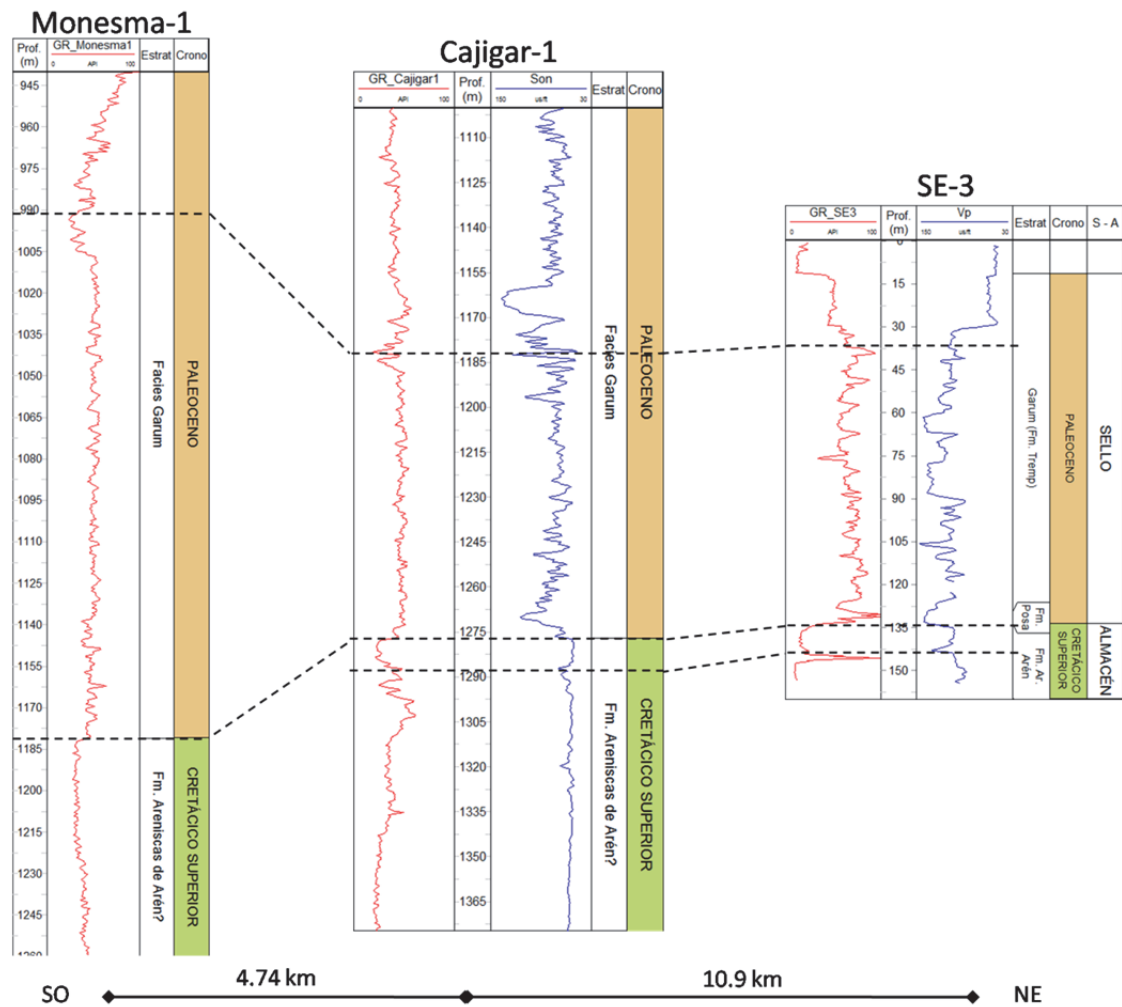


Figura 6. 11. Correlación mediante diagragías establecida entre el sondeo somero SE-3 y los sondeos profundos de petróleo Cajigar-1 y Monesma-1.

En los tres sondeos, se han identificado, a grandes rasgos, dos zonas litológicamente diferenciadas:

- Una zona superior, identificada como la facies Garum, caracterizada por presentar valores elevados de Radioactividad Gamma Natural, y valores bajos de resistividad y de velocidades de ondas P. El grado de compactación en el sondeo somero es pequeño tal como muestra la elevada irregularidad en todos los perfiles, sobre todo, en el perfil de *cáliper*. Esta zona se ha interpretado como una zona de naturaleza lutítico-margosa, con algún nivel limoso y contenido evaporítico (yesos). Muestra un espesor superior a los 50 m tanto en el sondeo somero como en los sondeos profundos.
- Una zona más profunda, competente, con una tendencia de perfiles de registros en general más regulares, indicando una mayor resistencia de los materiales. Se observan en esta

zona valores más bajos de GR y más elevados de resistividad eléctrica y de Vp que los registrados en la zona superior. En el sondeo SE-3, esta zona se ha interpretado como una arenisca, con predominio de cemento carbonatado; el estudio de muestras en lámina delgada ha permitido identificar la mayoría de las muestras como litarenitas. En el sondeo Cajigar-1, esta zona se ha interpretado como formada por paquetes métricos (2 – 9 m) de arenisca (carbonatada) y un paquete intermedio de calizas margoso-arcillosas, de 13 m de espesor neto aproximadamente. En el sondeo Monesma-1, toda la sección de menor radiación gamma y mayor resistividad eléctrica y velocidad sónica correlacionable con el sondeo Cajigar-1, se ha interpretado como un paquete de 53 m de espesor, bastante homogéneo de areniscas. Esta zona ha sido identificada como la formación almacén en los tres sondeos.

Las Figuras 6.12-a) y b) muestran, respectivamente, los dos *cross-plots* correspondientes a la representación del registro GR frente a Vp de todo el sondeo SE-3 y la sección de Cajigar-1 correlacionable con SE-3, para todo el tramo analizado (sello + almacén). Asimismo, en las Figuras 6.12-c) y d) se incluyen los registros de GR y de resistividad Normal Corta y resistividad Normal Corta Amplificada en SE-3 y en Monesma-1 respectivamente.

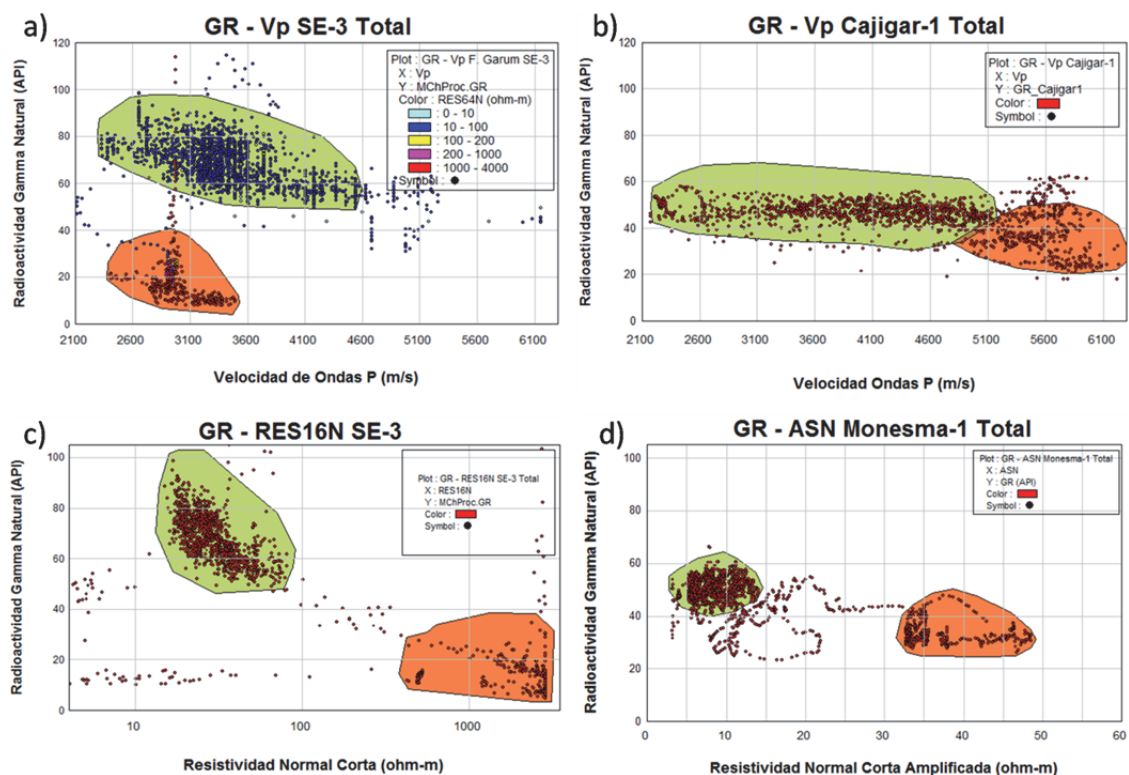


Figura 6. 12. *Cross-plots* del registro de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente a Velocidad de Ondas P (Vp) en los sondeos SE-3, Cajigar-1 y Monesma-1.

Si se comparan los gráficos correspondientes a los valores de GR-Vp en los sondeos SE-3 y Cajigar-1 (Figura 6.12 a-b), se observa que los valores de Vp son superiores en el sondeo profundo. Los valores de Vp superan los 5000 m/s en la zona almacén del sondeo profundo Cajigar-1. La razón puede ser debida al incremento de la compactación de los materiales con la profundidad (el almacén se ubica a más de 1100 m de profundidad), lo que causa elevados valores de velocidad de ondas P. Si se observan los valores de GR, sucede que en el sondeo somero se distinguen claramente dos agrupaciones, y los rangos de valores son más elevados en la zona confinante que los observados en Cajigar-1.

La comparación entre los valores de GR en los sondeos SE-3 y Monesma-1 (Figura 6.12c-d) permite ver la elevada diferencia entre los valores en ambos sondeos. La GR en SE-3 es mayor que en el sondeo profundo: la agrupación de puntos en la formación sello (facies Garum), resaltados en color verde, presenta lecturas más elevadas en el sondeo SE-3 (50 - 100 API), que en Monesma-1 (40 – 60 API). Estos bajos valores de radioactividad natural en las margas de la facies Garum en Monesma-1 pueden ser debidos a la posible presencia de material evaporítico (yeso, anhidrita), tal como indica la breve descripción de la columna litológica suministrada por el IGME para este sondeo (IGME, 2009).

En cuanto a los valores de resistividad normal corta comparados entre los sondeos SE-3 y Monesma-1 (Figura 6.12 c-d), existe una amplia diferencia, porque su registro se ha realizado con instrumentación diferente. La escala de la gráfica en el sondeo SE-3 es logarítmica frente a la de Monesma-1 que es lineal. Así pues, a nivel cualitativo se puede decir, que en ambas gráficas, la tendencia de los dos grupos de lecturas es coherente, de forma que tanto en el sondeo somero como en el profundo, se produce un incremento importante de la resistividad en las formaciones consideradas almacén (Areniscas de Arén) con respecto a las consideradas confinantes. Entre ambas agrupaciones en los dos sondeos existe una amplia separación, con una escasa dispersión de puntos, lo que implica que litológicamente hay una clara diferenciación entre ambas formaciones sello-almacén.

La interpretación detallada de la litología se ha desarrollado más extensamente en el sondeo somero, donde el conjunto de datos disponibles ha permitido contrastar distintas informaciones procedentes de diferentes fuentes (campo, laboratorio, diagrfías, etc.) con los parámetros disponibles en los sondeos antiguos de petróleo. La Tabla 6.3 muestra los diferentes rangos de parámetros medidos en las diagrfías, así como otros estimados a partir de las mediciones en el sondeo somero SE-3 y los sondeos profundos Cajigar-1 y Monesma-1.

Tabla 6. 3. Parámetros registrados y estimados en los sondeos SE-3, Cajigar-1 y Monesma-1. Los rangos de valores significan el mínimo y el máximo mostrado. Vsh = volumen de arcillosidad; Vp = velocidad de ondas P; Rt = resistividad normal profunda; SP = Potencial estándar.

	Formación	Litología	Vsh (%)	Vp (m/s)	Rt (ohm·m)	SP (mV)
SE-3	Confinante	Arcillas / Lutitas	-	2300 - 4900	27 - 64	-22 / 63
	Reservorio	Areniscas	2 - 20	2400 - 3500	80 - 2960	27 - 106
Cajigar-1	Confinante	Margas / Arcillas	-	2100 - 5000	-	-
	Reservorio	Areniscas	2 - 16	5200 - 6085	-	-
		Calizas arcillosas	45 - 85	5400 - 5890	-	-
Monesma-1	Confinante	Margas	-	-	3 - 16*	-56 / -46
	Reservorio	Areniscas	4 - 20	-	30 - 49*	-50 / -47

(*) Resistividad ASN

6.2 Sondeo SB-1 (Alcaraz – Albacete) y sondeos Salobral-1 y Carcelén-1 (Albacete)

En la Tabla 6.4, se pueden ver los registros adquiridos en el sondeo SB-1 (profundidades) para la realización de esta tesis, así como el número de muestras para el estudio en el sondeo SB-1. Además de ellos, se utilizaron los registros de resistividad (RES16N, RES64N) y la medida del potencial estándar SP realizados por de la empresa CGS.

Tabla 6. 4. Registros adquiridos en esta tesis (rangos de profundidad) en la facies Keuper arcilloso y facies Keuper arenoso del sondeo SB-1: Radioactividad Gamma Natural (GR), Imagen acústica de sondeo (ABI). Se indica el número de muestras tomadas para análisis de Difracción de Rayos X (DRX) y lámina delgada (LD).

SB-1	Diagrafías		Muestras	
	GR	ABI	DRX	LD
Keuper arcilloso	0 – 88 m	13 – 88 m	4	-
Keuper arenoso			6	4

Como apoyo a la interpretación de diagrafías en el sondeo SB-1, se analizó un total de 10 muestras mediante Difracción de RX (resultados detallados en el Anexo III), y se estudiaron además, 4 muestras mediante lámina delgada en microscopio.

De los dos sondeos profundos de petróleo, solo se dispone del informe técnico de perforación del sondeo Carcelén-1, además de las fichas técnicas de Lanaja, 1987. La Tabla 6.5 muestra todos los registros geofísicos de los que se ha tenido acceso para el estudio e interpretación litológica detallada de las series litoestratigráficas que cortaron.

Tabla 6. 5. Lista de registros disponibles en los sondeos profundos de petróleo Salobral-1 y Carcelén-1. Radioactividad Gamma Natural (GR), *Interval Transit Time* (DT), Potencial Espontáneo (SP), calíper, porosidad neutrón.

Sondeo	GR	DT	SP	Caliper (Mecánico)	Neutron
Salobral-1	X	X		X	
Carcelén-1	X	X	X	X	X

6.2.1 Interpretación litológica de la facies Keuper arcilloso y de la facies Keuper arenoso en el sondeo SB-1

En este sondeo no se dispone de registro sónico, por lo que los únicos parámetros disponibles para el análisis de clúster son los registros GR y de resistividad Normal corta y larga citados.

Se representó, mediante histograma, el registro GR para la facies Keuper estudiada (tramo 11 – 88 m de profundidad) para ver las frecuencias de valores, y se distinguieron 3 distribuciones (Figura 6.12). Los 11 primeros metros no se han incluido pues forman parte del Jurásico inferior (Lias), según datación del IGME (IGME, 2009), y carecen de interés en este estudio. El *cross-plot* del perfil de Radioactividad Gamma Natural (GR) frente el perfil de Resistividad Normal Larga (RES64N) realizado para el mismo tramo, confirma esta distribución, y pone en evidencia que la diferenciación litológica está determinada principalmente por el perfil GR (Figura 6.12).

A partir del *cross-plot*, se han diferenciado 3 grupos de puntos definidos bajo las letras A, B y C: los tres grupos presentan valores bajos de Resistividad Normal Corta y Larga (<100 ohm·m). El grupo A (color amarillo) engloba los puntos con valores más elevados de GR (> 100 API), el grupo C, resaltado en color gris, está formado por los valores más bajos de GR (< 50 API). Finalmente el grupo de puntos B comprende valores de GR y de RES64N intermedios entre los dos anteriores.

Los grupos C y B, menos radiactivos, se identificarían como la formación sello, es decir, las formaciones arcilloso-yesíferas del Keuper (posiblemente K5 +K4), mientras que el grupo A se identificaría como la facies Keuper arcillo-arenosa (posiblemente K3 +K2), que incluye secciones del tramo almacén. El límite entre ambas, establecido por el IGME a 75.8 m (IGME, 2009), ha sido modificado a partir de la interpretación del *cross-plot* en esta tesis, localizándolo ahora a 67 m de profundidad aproximadamente (Figura 6.13). La interpretación litológica en detalle se ha llevado a cabo a partir de esta nueva zonación.

➤ **Interpretación litológica de la facies Keuper arcilloso en el sondeo SB-1**

A partir del *cross-plot* de la Figura 6.13, se detalla la interpretación litológica según la zonación establecida.

Grupo C: Tramo 11 – 43 m

Este grupo de puntos presentan valores de resistividad bajos, comprendidos aproximadamente entre 10 y 100 ohm·m, que suelen ser típicos de formaciones arcillosas. Sin embargo, las lecturas de GR son las más bajas de todo el registro (<50 API). Estos valores observados, tan anormalmente bajos para tratarse de una formación arcillosa, se explican por la presencia de la gran abundancia de yeso a lo largo de todo el tramo, así como a la presencia esporádica de clastos carbonatados. Los perfiles de los isótopos U^{238} , Th^{232} y K^{40} muestran una tendencia paralela entre las tres curvas, con mayor contenido en potasio, como indicador de la presencia de micas y feldespatos. No se aprecia en este tramo, cualitativamente, un incremento especialmente notable de alguno de los elementos con respecto a los otros, a excepción de algún intervalo (p.e. a 39 m de profundidad), donde se aprecia un incremento del U y del K y un descenso del Th, así como un descenso en la relación Th/K y Th/U, lo que puede indicar un mayor contenido limoso en la formación.

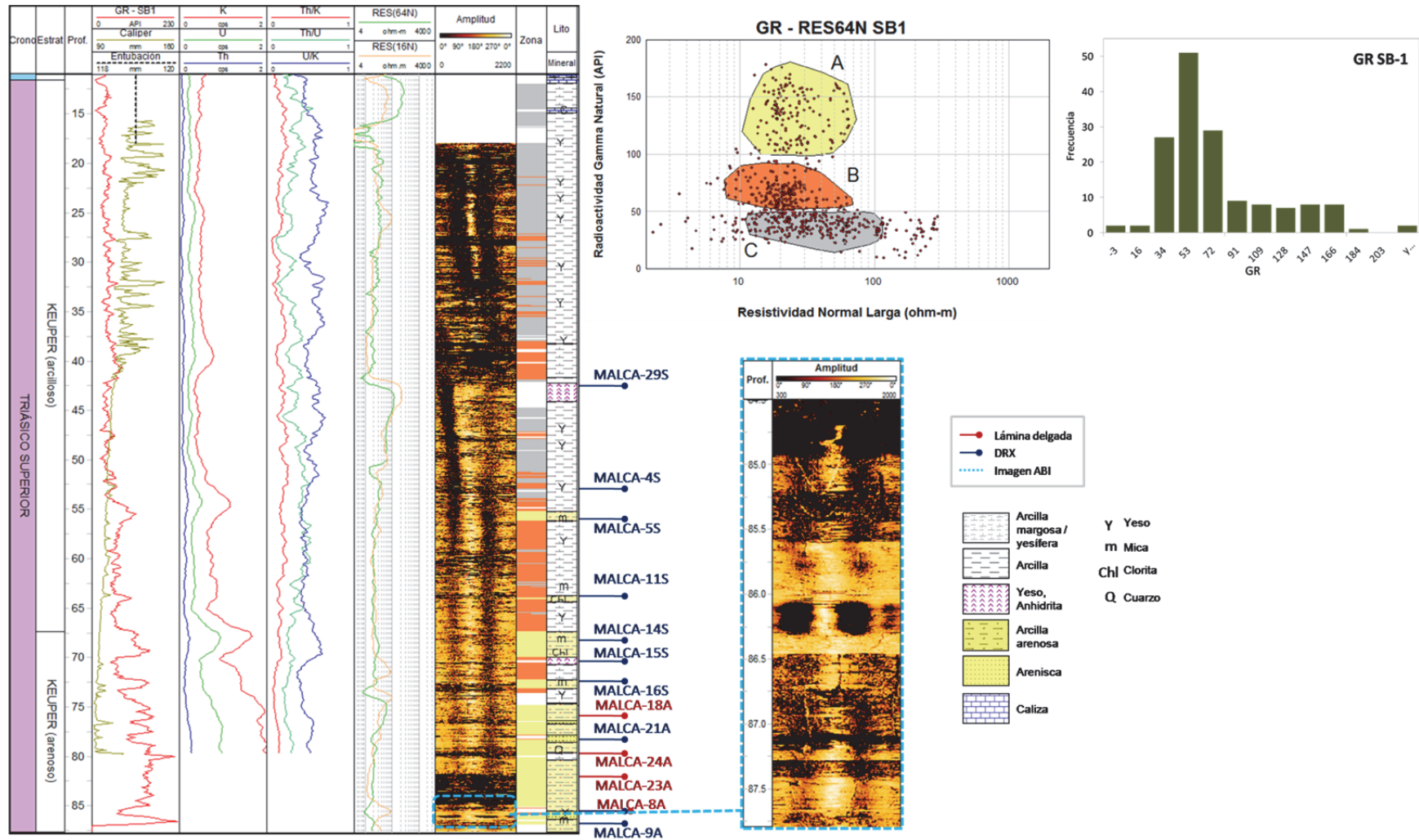


Figura 6. 13. Registros en la facies Keuper arcillosa y facies Keuper arenosa del sondeo SB-1 (tramo 11 – 87.7 m), de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* acústico, entubación, perfiles de espectrometría y las relaciones Th/K, Th/U y U/K, Resistividad Normal Larga (RES64N) y Corta (RES16N), imagen acústica del sondeo (amplitud), columna de zonación a partir del *cross-plot* (GR frente a RES64N) y columna litológica interpretada junto con la mineralogía predominante (C = calcita, Y = yeso, m = mica, Chl = clorita, Q = cuarzo). Esquina superior derecha: histograma de valores GR. Se indican sobre la columna litológica, las profundidades a las que se han realizado ensayos de DRX, y estudios en lámina delgada. Se muestra una imagen acústica entre los 80 y 87.6 m.

El perfil del *cáliper* acústico es marcadamente irregular, indicando que se trata de un intervalo constituido por materiales poco consistentes. Esta cualidad se confirma observando el registro de imagen acústica (ABI), que presenta colores más oscuros en la imagen (menor amplitud en la señal).

Se ha interpretado este grupo C como una arcilla yesífera (posiblemente K5). Los valores de GR bajos se deben a la abundante presencia de yesos.

Grupo B: Tramo 43 – 67 m

Las lecturas de Radioactividad Gamma Natural para este tramo son ligeramente superiores al tramo anterior, situándose entre 50 y 100 API (Figura 6.13).

Entre los 42 y 45 m de profundidad aproximadamente, el valor de GR es bajo (45 API de máxima), y el valor de RES16N observado es superior al resto de puntos (>120 ohm·m). Se aprecia en el registro de imagen acústica la presencia de evaporitas. El estudio de una muestra tomada a esa profundidad (MALCA-29S) ha dado magnesita como componente principal, y yeso y calcita como secundarios. Dentro de este intervalo, a partir de los 43 m de profundidad, la reflectividad observada en la imagen acústica es mayor, reflejando un cambio en la naturaleza textural de la formación geológica. El perfil del *cáliper* acústico refleja claramente una mayor homogeneidad en la formación geológica, es decir, mayor compacidad de los materiales.

El análisis de una muestra tomada a los 53.4 m de profundidad (Ref.: MALCA-4S) dio como componente principal, yeso, y como único componente secundario, Magnesita. Estos resultados apoyarían la interpretación de este tramo como una arcilla margosa. La elevada presencia de yeso en todo el tramo, bien en forma de venas, disperso o en forma laminar, parece ser la causante de los bajos valores de Radioactividad Gamma Natural presentes.

A partir de los 54 m de profundidad, destacan varios niveles con incrementos de GR, que podrían ser debidos a la presencia de mica y clorita (minerales de la arcilla), tal como lo indican los análisis de DRX. Este hecho se confirma con los incrementos en la respuesta del isótopo de potasio.

Una muestra tomada a los 55.5 m de profundidad (Ref.: MALCA-5S) indica que sigue existiendo yeso como componente mineral principal, y como secundario, un carbonato (magnesita). Otra muestra tomada a los 64 m (Ref.: MALCA-11S) mostró la presencia de

minerales de la arcilla (mica y clorita) como componentes principales (que hacen incrementar la respuesta de GR), y cuarzo y magnesita como componente secundario. Estos datos indican la naturaleza margosa que aún existe, y a la vez, la presencia de componentes arenosos, que anuncian un cambio gradual hacia la formación inferior (Keuper arenoso).

Se ha interpretado este tramo como una arcilla yesífera a yesífera margosa (posiblemente K4), con presencia esporádica de algún nivel de arcillas arenosas. El elevado contenido yesífero identificado, sería el causante de los bajos valores de GR, al igual que en el tramo anterior.

➤ Interpretación litológica de la facies Keuper arenosa en el sondeo SB-1

A partir del *cross-plot* de la Figura 6.13, se ha identificado el grupo de lecturas A como la facies Keuper limoso-arcillosa (K3). Este grupo presenta lecturas bajas de resistividad eléctrica, al igual que en los grupos anteriores (10 –50 ohm·m), y los valores más elevados de Radioactividad Gamma Natural del gráfico (90 – 180 API). Este grupo de puntos, proyectados en la vertical junto con el resto de registros, comprende el tramo 67 – 88 m de profundidad.

Se producen en este tramo variaciones importantes de GR, con valores máximos de hasta 180 unidades API (desviación estándar de 21 API). Los valores son muy dispersos como se puede observar en el *cross-plot* de la Figura 6.13. El valor del isótopo K^{40} es más elevado que los otros dos isótopos, sobre todo a partir de los 74 m de profundidad, como indicador de un mayor enriquecimiento en micas y feldespatos.

El perfil irregular del *cáliper* acústico, sobre todo a partir de los 70 m de profundidad, indica los numerosos planos de estratificación presentes, confirmado también en el perfil de GR. Estas variaciones estratigráficas se confirman con la imagen acústica disponible, donde se han identificado estratificación y laminación paralela en su mayoría (en el detalle de la Figura 6.13 se puede observar un ejemplo).

Se analizaron 4 muestras mediante DRX a las profundidades de 69 m (Ref.: MALCA-14S), 79.3 m (Ref. MALCA-21A), 85.5 m (Ref.: MALCA-8A) y 86.7 m (Ref.: MALCA-9A). Los resultados muestran la existencia de contenido en cuarzo, yeso y minerales de la arcilla (mica, clorita) como componentes principales (resultados detallados en Anexo III). Los resultados también confirman el incremento de feldespato potásico y cálcico en profundidad.

En este tramo se han estudiado al microscopio 4 muestras en lámina delgada, cuyas profundidades se indican en la Figura 6.13 y se muestran en detalle en la Figura 6.14.

La muestra con referencia MALCA-18A fue tomada a los 76.5 m. Pertenece a una roca sedimentaria detrítica, de textura granosoportada y aspecto claramente bandeado, alternando franjas de coloraciones transparentes con bandas más oscuras y rojizas (Figura 6.14). Las bandas oscuras se componen de cristales de cuarzo o feldespato de tamaño limo grueso a arena muy fina (entre 40 y 100 μm), con una selección buena a moderada y una geometría angulosa. De manera frecuente, pero no siempre, se ha observado que esta fracción se encuentra cementada por calcita (la tinción de la lámina es deficiente). Las bandas más rojizas están compuestas principalmente por cristales de biotita y moscovita, con ligera presencia de cuarzo y una matriz de minerales arcillosos de tamaño muy fino. Se ha clasificado esta muestra como una arenisca-limolita.

La muestra MALCA-24A, tomada a los 80 m de profundidad aproximadamente, presenta textura grano-soportada, y en general buena selección, con granulometría angulosa a subangulosa, y un tamaño de grano fino a muy fino (62.5 - 125 μm). Está constituida principalmente por cristales de cuarzo y feldespatos, y algunos cristales de mica. Se observa la presencia, en ocasiones, de cemento carbonatado, y de la existencia de una ligera laminación en algunas zonas, aunque apenas perceptible. Se ha interpretado como una cuarzoarenita o limolita.

A los 81 m de profundidad se estudió otra muestra (Ref.: MALCA-23A). Pertenece a una roca sedimentaria detrítica, con tamaño de grano grueso, pero menor a 0.0625 mm (62.5 μm), y con abundantes granos de cuarzo. A mayor aumento se observa la presencia de alguna mica en forma de laminillas. También se han observado resquicios de granos con síntomas de alteración. Se ha clasificado la muestra como una limolita.

Finalmente, a los 85.5 m de profundidad se tomó otra muestra para ser estudiada al microscopio (Ref.: MALCA-8A). Presenta textura grano-soportada, y se compone de cristales de cuarzo de tamaño limo grueso — arena muy fina (40 - 80 μm), con una buena selección y una geometría angulosa. En general esta fracción detrítica no está cementada, aunque se distinguen pequeños nódulos o concentraciones aisladas con cemento de calcita, de 0.5 a 0.7 mm de diámetro. Se ha identificado también como una limolita.

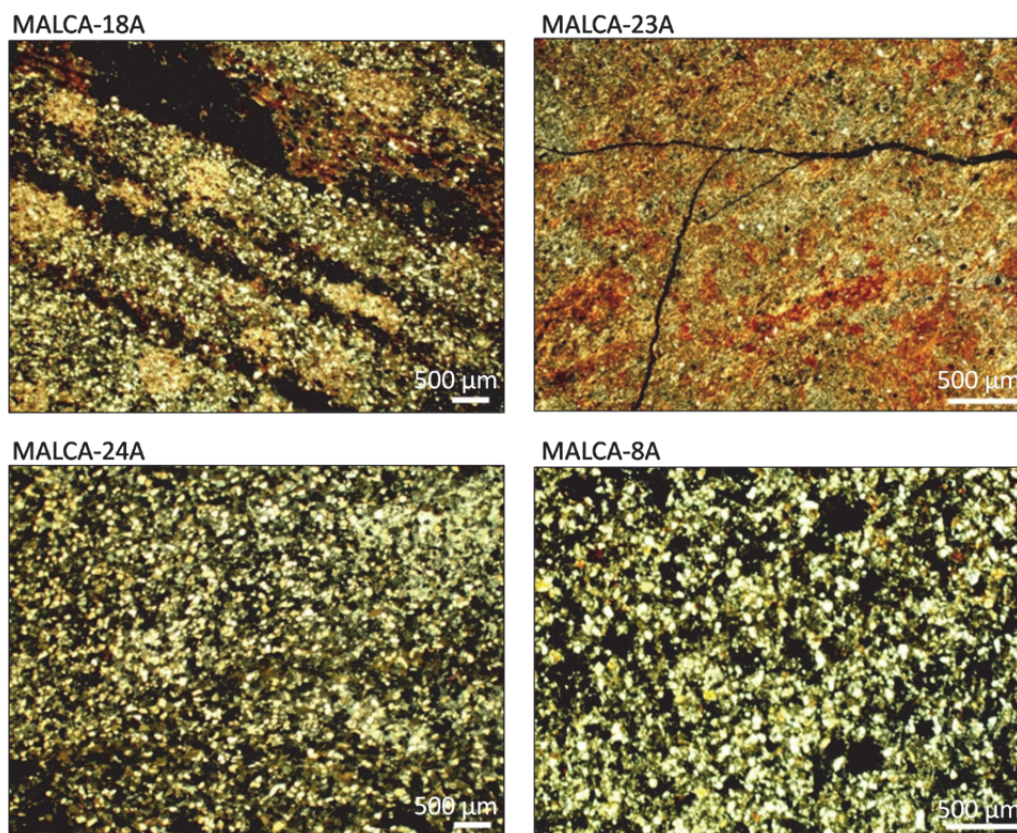


Figura 6. 14. Fotografías de muestras en lámina delgada tomadas a diferentes profundidades de la facies Keuper arenosa en el sondeo SB-1. Todas con nicóles cruzados y escala 0.5 mm.

Se ha interpretado en general este grupo A como arcillas arenosas, con alguna pasada muy esporádica de areniscas (posiblemente K3 y K2), distinguibles principalmente por los cambios continuados de GR y las observaciones de los testigos. Las arcillas arenosas presentan espesores entre 3 y 5 m, y en ocasiones presentan niveles con mayor arcillosidad, identificados en el registro de imagen acústica. Las areniscas constituyen niveles de espesor menor, entre 30 cm y 1 m, y podrían pertenecer a la Formación Areniscas de Manuel.

6.2.2 Interpretación litológica en el sondeo Salobral-1

El tramo que se ha interpretado es el correspondiente al comprendido entre 1075 – 1157 m de profundidad, perteneciente a la facies Keuper. Para su interpretación litológica, se han representado, mediante *cross-plot*, los registros de Radioactividad Gamma Natural (GR), y el registro de Velocidad de Ondas P (Vp) correspondientes a ese tramo (Figura 6.15), diferenciándose dos grupos de puntos (A, B).

En los dos grupos, el valor de la Velocidad de Ondas P es similar, oscilando entre 2490 y 4150 m/s. El grupo de puntos A, resaltados en color amarillo, se engloban los valores más elevados de GR (>75 API) y valores Vp superiores a 3800 m/s, y el grupo B, en color naranja en la gráfica, se caracteriza por presentar los valores de GR menores de 75 API y velocidades entre 2600 y 4200 m/s aproximadamente. Este último grupo presenta una dispersión de puntos importante como se puede ver en el *cross-plot*.

La zonación establecida en profundidad junto con los registros interpretados en el tramo del sondeo Salobral-1 correlacionado con el sondeo SB-1, se pueden observar en la columna litológica correspondiente en la Figura 6.15.

A continuación se explica en detalle la interpretación litológica:

Grupo B: tramo 1080 – 1113 m

Este grupo de puntos, resaltados en color naranja en la columna de zonación de la Figura 6.14, se caracteriza por presentar lecturas de GR en general entre 50 y 75 unidades API, y velocidades de Ondas P muy dispersos, entre 2500 y 4200 m/s.

El perfil del *cáliper* mecánico muestra una elevada irregularidad en todo este tramo, lo que podría estar indicando la inestabilidad del material, y los numerosos cambios litológicos.

Se ha interpretado este tramo como arcillas margosas, probablemente yesíferas, presentadas en paquetes de espesor entre 3 y 7 metros. Los valores bajos de GR pese a tratarse de una formación arcillosa, podrían ser debidos a la presencia esporádica de halita (Lanaja, 1987), que además, suele presentar un valor de Vp típicamente más bajo que el observado para la anhidrita o el yeso (Rider, 2006). La presencia de yeso también causaría ese descenso en la respuesta de GR.

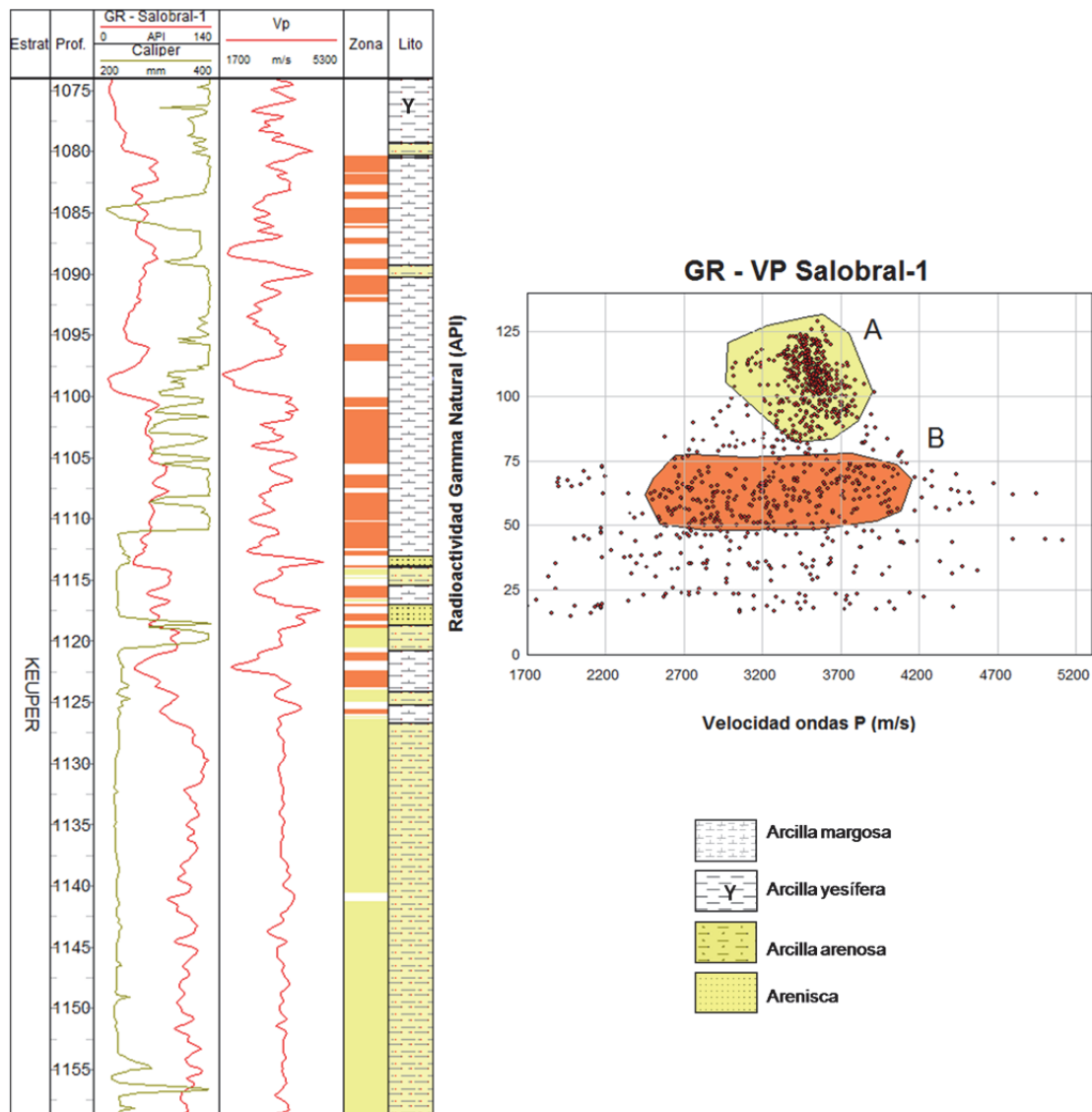


Figura 6. 15. Diagramas para el tramo 1073 - 1157 m de profundidad del sondeo Salobral-1, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* mecánico, velocidad de ondas P (Vp), columna litológica, columna de zonación establecida a partir del *cross-plot* y columna litológica interpretada. *Cross-plot* de Radioactividad Gamma Natural (GR) y Velocidad de Ondas P (Vp) para dicho tramo. Se han diferenciado 2 grupos de puntos (A, B).

Grupo A: tramo 1113 – 1174 m

Este último tramo se caracteriza por un incremento general en la respuesta de Radioactividad Gamma Natural (lecturas superiores a 75 unidades API), y las lecturas de Vp apenas sufren variaciones, con valores superiores a los 3200 m/s.

Los perfiles de *cáliper* y de Vp apenas muestran irregularidades en su trazo, lo que indica la elevada compacidad del material.

Se ha interpretado este grupo de lecturas A como arcillas arenosas, que constituye un potente paquete de más de 40 m de espesor. El incremento de las lecturas GR en este tramo podría estar causado por la presencia de micas.

6.2.3 Interpretación litológica en el sondeo Carcelén-1

A partir de la representación gráfica de los registros de Radioactividad Gamma Natural (GR) y Velocidad de Ondas P (Vp) para el tramo 2098 y los 2159 m de profundidad en el sondeo Carcelén-1, perteneciente a la facies Keuper (Figura 6.16), se ha establecido una zonación en dos grupos de puntos (A y B). El grupo de puntos A (resaltado en color amarillo) se caracteriza por presentar los valores más elevados de Radioactividad Gamma Natural (GR), así como los valores más bajos de Velocidad de Ondas P (Vp). El grupo de puntos B, remarcado en color naranja en la columna de zonación, engloba aquellos puntos con valores de GR inferiores a los 75API, pero con los valores más elevados de Vp de toda la gráfica, entre 3600 y 4500 m/s.

A continuación se describe la interpretación litológica en detalle de los diferentes tramos:

Grupo A: tramos 2102 – 2112, 2124 – 2127 y 2132 - 2159 m

Este grupo de puntos, resaltado en color amarillo en el *cross-plot*, se caracteriza por presentar los valores más elevados de Radioactividad Gamma Natural del tramo estudiado, superiores a 75 unidades API (Figura 6.16) y valores en la Velocidad de Ondas P inferiores en general a los 3800 m/s.

El perfil del *cáliper* mecánico se caracteriza aquí por una cierta irregularidad, indicando moderada consistencia de los materiales, y es posible la existencia de fracturación. De acuerdo con esto, el informe técnico de la perforación del sondeo confirma la presencia de fisuración.

Estos tramos se han interpretado como una formación de arcilla arenosa, en forma de paquetes de espesor de 2 a 5 metros y paquetes superiores a los 25 m netos. El elevado valor de las lecturas de GR, al igual que en el sondeo Salobral-1, podría ser debido a la presencia de elementos micáceos.

Grupo B: tramos 2098 – 2102 y 2112 – 2132 m

Este grupo presenta en el *cross-plot* valores muy dispersos. Las lecturas de radioactividad GR en estos tramos son las más bajas de toda la gráfica, con valores entre 45 y 75 API principalmente, y velocidades de ondas P entre 3600 y 4500 m/s. Ambos perfiles muestran elevada irregularidad en las curvas, indicativo de la presencia de materiales menos compactos.

Se han interpretado estos tramos como arcilla margosa con posible contenido yesífero, debido a las bajas lecturas de GR obtenidas. Entre los 2126 y 2128 m de profundidad, se ha interpretado un nivel de arenisca.

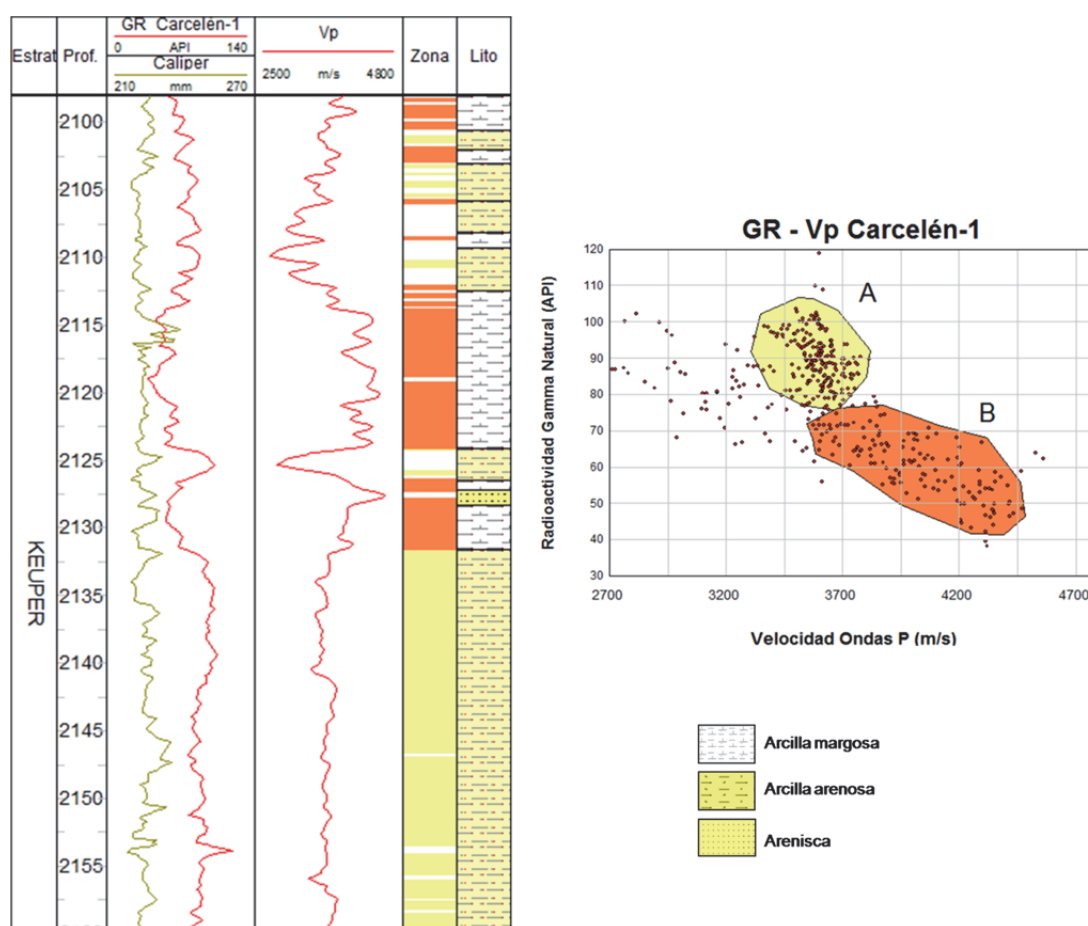


Figura 6. 16. Registros en el tramo 2098 - 2170 m de profundidad en el sondeo Carcelén-1. De izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* mecánico, velocidad de Ondas P (Vp), columna de zonación a partir del *cross-plot* GR-Vp de la derecha, y columna litológica interpretada. En el *cross-plot* se han distinguido dos grupos de puntos (A, B).

6.2.4 Conclusiones

La columna litológica perteneciente al sondeo SB-1 suministrada inicialmente por el IGME (IGME, 2009) se ha modificado de acuerdo con las interpretaciones realizadas a partir de diagrfias y los análisis de muestras. Igualmente, el límite entre la facies Keuper arcillosa (yesífera y margosa) y Keuper arenosa, que inicialmente se situó a los 75.8 m, ha sido modificado y situado a los 67 m de profundidad.

En base a las interpretaciones litológicas realizadas, se ha identificado la facies Keuper arcillosa (yesífera y margosa) como la formación confinante, localizándose entre los 11 y los 67 m de profundidad. El tramo arenoso del Keuper (y las Areniscas de Manuel) se ha identificado como la formación reservorio en el sondeo SB-1, localizándose a partir de los 67 m y hasta el final posible de la adquisición geofísica de datos, a los 88 m de profundidad.

En el sondeo SB-1 se han identificado las siguientes unidades litoestratigráficas:

- Una zona superior caracterizada por presentar valores muy variados de Radioactividad Gamma Natural (13 – 106 API), y valores de Resistividad Normal Corta y Larga bajos (10 - 110 ohm·m). El perfil del *cáliper* en esta zona es irregular, sobre todo hasta los 40 m de profundidad, indicando menor compactación de materiales. Los resultados obtenidos de los análisis de DRX muestran una presencia elevada en componentes evaporíticos, razón por la que los valores de GR serían tan bajos, además de mica y componentes carbonatados (magnesita). Se ha interpretado como una formación constituida por arcillas yesíferas fundamentalmente, con contenido margoso en la parte inferior. Ha sido identificado este tramo como la facies Keuper yesífero-arcillosa. Presenta un espesor neto de aproximadamente 57 m.
- Una zona inferior caracterizada por un valor más elevado en la respuesta de la Radioactividad Gamma Natural que el tramo anterior (50 - 178 API), y valores bajos de resistividad similares al tramo anterior. El perfil del *cáliper* acústico muestra una tendencia más suavizada, por lo que se trata de un material más compacto. Los análisis mediante DRX muestran la existencia de abundante mica en todo el tramo. El reconocimiento de testigos a visu y las imágenes acústicas de sondeo, han hecho posible la identificación de venas y laminaciones de yeso y anhidrita. El estudio de muestras en lámina delgada, indican la presencia de componentes como cuarzo, feldespatos potásicos y cálcicos y/o fragmentos de roca, y han permitido clasificar las muestras como areniscas y limolitas. Se ha interpretado esta zona como una arcilla arenosa en paquetes de 2 a 13 m, con escasos niveles intercalados de areniscas cuyo espesor es de apenas 1 metro. Ha sido identificado por el IGME (IGME, 2009)

como el tramo arenoso del Keuper (arcilla arenosa), y posiblemente la Fm. Areniscas de Manuel (K3 + K2?).

Mediante los registros geofísicos de Radioactividad Gamma Natural (GR), y entre los sondeos de petróleo, también mediante los registros sínicos, es posible realizar un intento de correlación estratigráfica entre las facies Keuper del sondeo SB-1 y de los sondeos profundos Salobral-1 y Carcelén-1. El sondeo Salobral-1 se encuentra a 74 km de distancia en dirección NE de SB-1. El sondeo Carcelén-1 se localiza también en dirección NE a 114 km de distancia de SB-1. La distancia entre ambos sondeos de petróleo es de 42.1 km.

Los tramos de los sondeos Salobral-1 y Carcelén-1 correlacionables con el sondeo SB-1 (Figura 6.16), corresponden a la parte baja de la zona sello del sondeo SB-1, y como tal, está constituida esencialmente por arcillas margosas y arenas arcillosas. Se han identificado dos zonas litoestratigráficamente diferentes:

En el sondeo Salobral-1, el tramo correlacionable con SB-1 se ha interpretado como constituido por paquetes de arcillas margosas y yesíferas de 5 a 10 m de espesor aproximadamente (K5 + K4), con algún nivel de arcillas arenosas de unos 3 m de espesor alternando. Por debajo de las arcillas margosas y yesíferas, se han interpretado arcillas arenosas en capas de 2 a 3 m de espesor (K3).

En el sondeo Carcelén, el tramo correlacionable con Salobral-1, ha sido interpretado como capas de arcillas margosas de hasta 20 m de espesor neto (K4), además de paquetes de arcillas arenosas en forma de capas con un espesor comprendido entre 1 y 6 m.

Por encima del tramo correlacionable, encontramos las unidades K5+K4 en SB1 y Salobral-1, aunque en Carcelén-1 no existen yesos de esas unidades, considerándose el tramo correlacionable una zona de transición de K4 a K3.

Observando la Figura 6.16, donde se disponen los tramos interpretados de los tres sondeos, existe una elevada heterogeneidad litológica tanto en el sondeo SB-1, como en los sondeos profundos de petróleo Salobral-1 y Carcelén-1. Los sondeos de petróleo presentan un mayor espesor de las arcillas arenosas en los tramos correlacionables. Desconocemos datos de composición mineralógica en ambos sondeos profundos, información que hubiera sido importante para poder establecer un paralelismo litológico y composicional con las formaciones del sondeo somero.

Si asumimos, de acuerdo con los informes geológicos disponibles de los sondeos de petróleo que se trata de la misma unidad litoestratigráfica (Keuper), comparando los valores de Radioactividad Gamma Natural en los tres sondeos, se observan valores menores en Carcelén-1. Los valores de Radioactividad Gamma Natural en el sondeo SB-1 se encuentran en cierta forma alterados por la elevada presencia de evaporitas. Este hecho hace que no sea adecuada la estimación de parámetros tales como el volumen de arcillosidad (Vsh), ya que podría conducir a error en los resultados finales.

Desde un punto de vista litológico, la facies Keuper yesífero-arcillosa en el sondeo SB-1, y por extensión en los sondeos profundos de petróleo estudiados, se presenta a priori como una buena formación estanca o sello, debido a la naturaleza arcillosa de la formación, y a su elevado contenido evaporítico (yeso, anhidrita, halita?) que confiere una mayor ductilidad de la formación rocosa, y por tanto, menor probabilidad de fracturación.

La facies Keuper arenosa en el sondeo SB-1, no resulta interesante litológicamente como formación almacén por la elevada cantidad de arcillas que contiene. El espesor de los niveles de areniscas es demasiado pequeño para que actúen como almacén (niveles centimétricos a métricos).

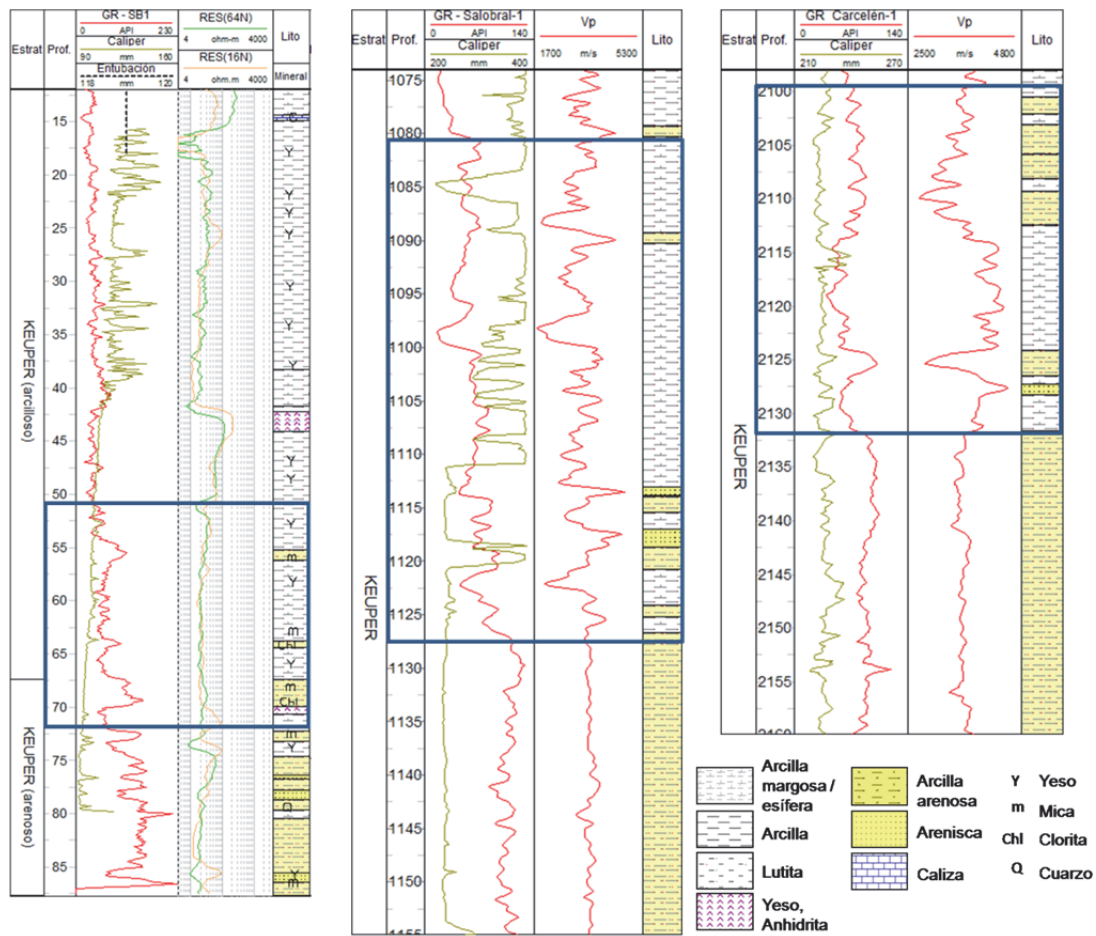


Figura 6. 17. Registros en los sondeos, de izquierda a derecha, SB-1, Salobral-1y Carcelén-1, con los tramos correlacionados e interpretados litológicamente (recuadro azul). Radioactividad Gamma Natural (GR), cáliper, entubación, Resistividad Normal Corta (RES16N) y Normal Larga (RES64N) y Velocidad de Ondas P (Vp).

En la Tabla 6.6 se puede ver un resumen de los parámetros estimados y registrados en los sondeos SB-1, Salobral-1 y Carcelén-1. Como se puede observar, los materiales de la zona confinante del sondeo Salobral-1, presentan valores más variados y elevados de Vp que los observados en el sondeo Carcelén-1. Esta diferencia puede deberse a una mayor heterogeneidad litológica en el sondeo Salobral-1, que incluye composición mineralógica de naturaleza carbonatada, como dolomías o calizas (Lanaja, 1987).

Tabla 6. 6. Parámetros en los sondeos SB-1, Salobral-1 y Carcelén-1. Vsh = radioactividad Gamma Natural; Vp = velocidad de Ondas P; Rt = resistividad normal profunda; SP = potencial espontáneo.

	Formación	Litología	Vsh (%)	Vp (m/s)	Rt (ohm·m)	SP (mV)
SB-1	Confinante	Arcilla margosa y yesífera (K5 + K4)	-	-	-	-
	Reservorio	Arcilla arenosa y arenisca (K3 + K2?)	17 - 29	-	0 - 296	330 - 360
Salobral-1	Confinante	Arcilla margosa y yesífera (K5 + K4)	-	1700 - 5100	-	-
Carcelén-1	Confinante	Arcilla margosa (K4)	-	2700 - 4300	-	-

7. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN PETROFÍSICA DE LAS FACIES DETRÍTICAS RESERVORIO

La caracterización y evaluación petrofísica en esta tesis de las formaciones consideradas detríticas, la Formación Areniscas de Arén y la facies Keuper arenosa, cuya interpretación litológica ha sido desarrollada en el Capítulo 6, se ha basado en el trinomio diagráffas-laboratorio-campo.

7.1 Caracterización y evaluación petrofísica de la Formación Areniscas de Arén en SE-3 y en Cajigar-1 y Monesma-1

La estimación de la porosidad en las formaciones que atraviesa el sondeo SE-3, se ha realizado a partir del uso del registro sínico y del estudio mediante microscopio, de 6 muestras en lámina delgada. A partir del ensayo sobre una muestra en laboratorio, se extrajo el valor de porosidad total (\varnothing_t) y de la porosidad efectiva (\varnothing_e).

Para el estudio cualitativo de permeabilidad, se contó con el registro sínico y el registro de imagen acústica. A partir del estudio de las imágenes acústicas (ABI) de la pared del sondeo se pudieron identificar y caracterizar las fracturas de las formaciones atravesadas, realizando un conteo de las mismas para una valoración inicial de la estabilidad estructural de la formación geológica.

Las medidas cuantitativas de permeabilidad realizadas en el sondeo SE-3 fueron de dos tipos: en campo, mediante 3 ensayos de permeabilidad Lugeon, y en el laboratorio, sobre una muestra, estimando el valor de la conductividad hidráulica.

Mediante el estudio de la atenuación de la energía acústica en el registro sínico, se han definido tramos con mayor permeabilidad dentro de la formación geológica estudiada, estimando el parámetro Ik -Seis.

En los sondeos profundos Cajigar-1 y Monesma-1, la estimación de la porosidad se llevó a cabo mediante el registro sínico y el registro neutrón respectivamente.

7.1.1 Porosidad y permeabilidad en el sondeo SE-3

➤ Porosidad

En la Figura 7.1 se pueden observar los registros utilizados para la caracterización petrofísica en la Formación Areniscas de Arén del sondeo SE-3, con la estimación de la porosidad sónica y los diferentes ensayos de laboratorio y de campo realizados.

En el perfil de la porosidad sónica se aprecia que no existe una notable variación de porosidad, manteniéndose en general elevada en todo el tramo de areniscas, con un valor que oscila entre 23 y 37 %.

A la profundidad de 134 m, se ha estudiado la porosidad de una muestra de litarenita en lámina delgada (Ref.: MORR-22A). Al microscopio, el valor estimado es muy variable dependiendo de la escala y de la zona de la lámina analizada, estimándose un rango entre un 5 y 22 %, principalmente debida a microfracturación (Figura 7.2).

Se estudió la porosidad en otras tres láminas delgadas correspondientes a muestras de litarenitas tomadas a 137 m (MORR-23A), 139 m (MORR-24A) y 148.5 m de profundidad (MORR-27A). En la Figura 7.2, se pueden observar dos de ellas; los resultados indican en general porosidades bajas, de menos del 5 % en todas ellas, predominando la porosidad intergranular. El espacio intergranular está ocupado por cemento carbonatado, constituido por cristales de esparita o microesparita tal como se ha podido apreciar observar al microscopio.

Otra muestra de litarenita tomada también a los 145.8 m de profundidad, fue sometida a ensayos de laboratorio, dando como resultado una porosidad muy baja, de 4.2 % de porosidad total, y del 3% como porosidad efectiva. En este caso, coincide esa baja porosidad con el resultado obtenido en lámina delgada.

Las muestras en lámina delgada con referencia MORR-28A y MORR-31A (Figura 7.2), correspondientes a 150 y 158 m respectivamente, mostraron porosidades bajas (2 - 10 %). La mayor parte de la porosidad es de tipo intergranular, y en ocasiones se ha observado porosidad por microfracturación (MORR-22A, MORR-31A). El espacio intergranular está ocupado por cemento carbonatado, constituyendo un mosaico bien formado de cristales de esparita (visibles a mayor aumento). Aun así se distinguen pequeñas fracturas de 0.1 mm de espesor, que llegan a constituir del orden del 6% de la muestra.

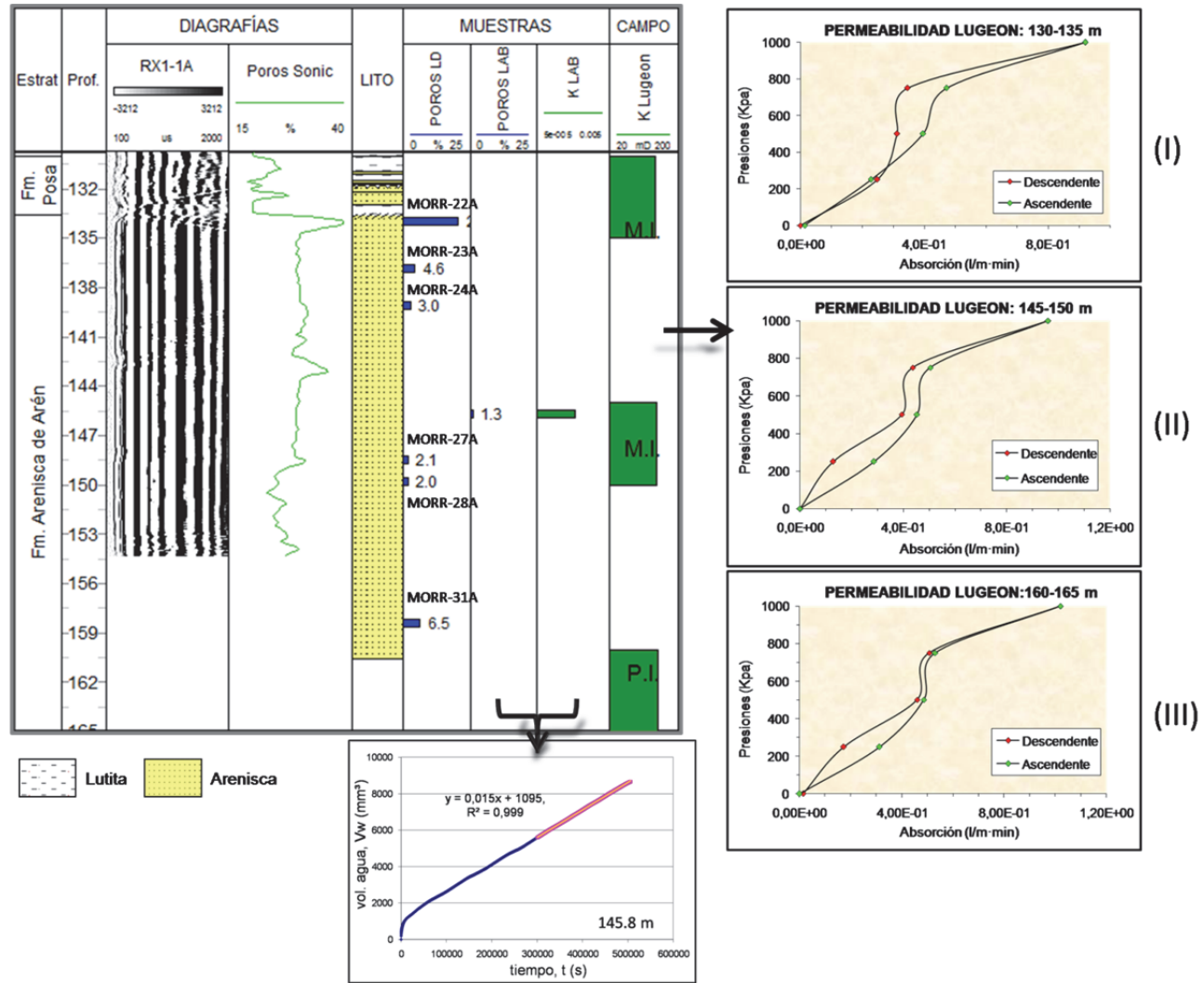


Figura 7. 1. Registros para el tramo 129 – 165 m en el sondeo SE-3, de izquierda a derecha: llegada de la señal sónica al primer receptor (RX1-1A), valor estimado de porosidad sónica, columna litológica interpretada, profundidades a las que se tomaron muestras para análisis en lámina delgada (poros LD) y sus referencias, porosidad y permeabilidad en laboratorio (poros LAB, K LAB), y los ensayos Lugeon en campo (K Lugeon).

A la derecha gráficas resultantes de los ensayos de permeabilidad Lugeon, correspondientes a los tramos 130-135 m, 145-150 m y 160-165 m. En la parte inferior la curva de estabilización del ensayo de permeabilidad en laboratorio correspondiente a una muestra tomada a la profundidad de 145.8 m.

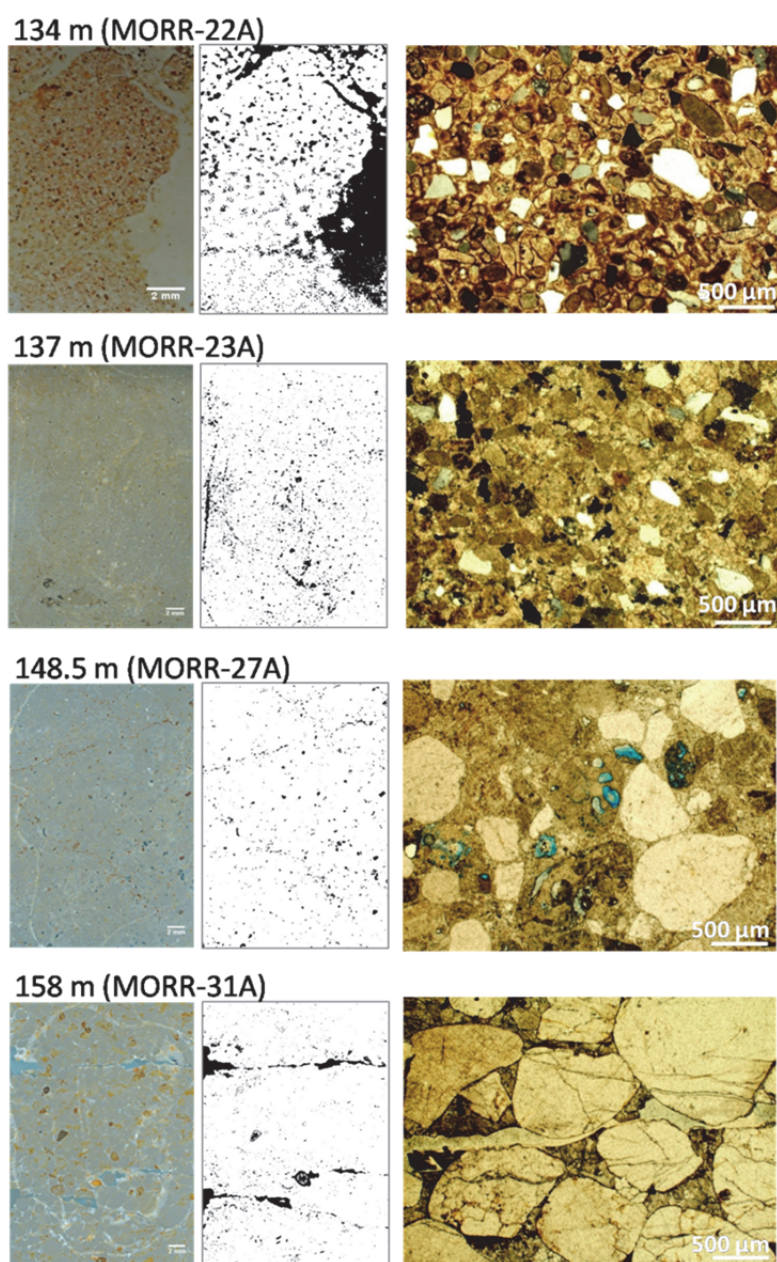


Figura 7. 2. Estudio de la porosidad al microscopio mediante láminas delgadas tomadas a las profundidades de 134 m, 136.9 m, 148.5 m y 158.4 m (MORR-22A, MORR-23A, MORR-27A y MORR-31A respectivamente). A la izquierda foto de lámina original y a la derecha la porosidad estimada (en color negro).

En la Figura 7.2 se puede apreciar que las láminas MORR24A y MORR28A no aparecen reflejadas con la estimación de la porosidad a partir de la metodología del tamaño real de la lámina. Esto es debido a que no se pudo llevar a cabo por una mala visualización de la porosidad al no presentar una buena tinción de la resina. La estimación de la porosidad en estas dos láminas se realizó a partir de la observación al microscopio.

➤ Permeabilidad

- A partir de diagraffías

Si se observa el perfil sónico, no existe ninguna atenuación significativa de la señal sónica en toda la formación reservorio, solo una pequeña desviación a los 142 m de profundidad, que corresponde a una fractura (identificada en la imagen acústica). Esto indica la elevada resistencia mecánica de la formación.

A partir del registro de imagen acústica, en todo el tramo reservorio se han identificado pocas fracturas, de carácter poco penetrativo. En la Figura 7.3, se puede observar la representación estereográfica equiareal de todas las fracturas identificadas en la Formación Areniscas de Arén del sondeo SE-3, así como la distribución de los buzamientos.

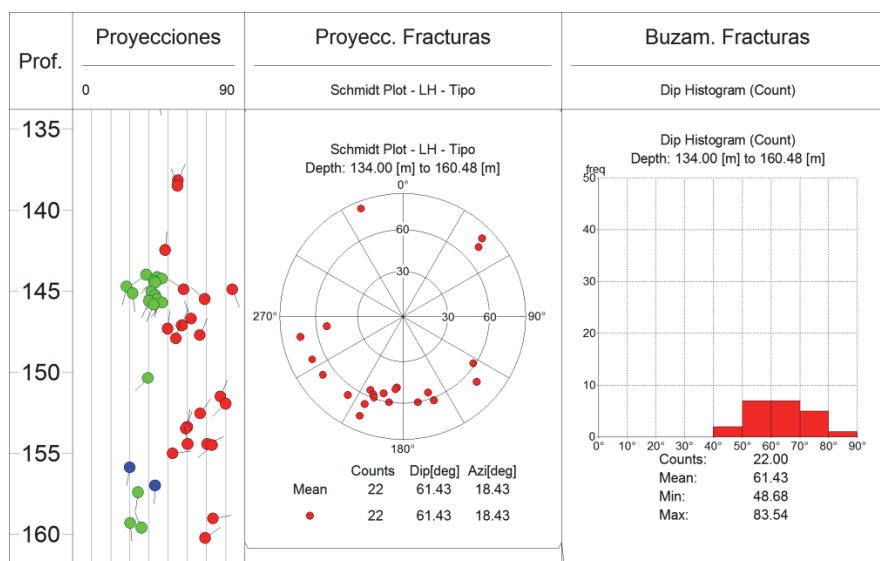


Figura 7. 3. Fm. Areniscas de Arén en el sondeo SE-3, de izquierda a derecha: proyección polar de las estructuras sedimentarias (fracturas = rojo, laminación / estratificación = verde), proyección equiareal de las fracturas, y representación, mediante histograma, de la frecuencia de los buzamientos de las fracturas identificadas.

La mayoría de las fracturas identificadas presentan poca abertura, menor de 3 mm, aunque a partir de los 151 m de profundidad aproximadamente, muestran una abertura mayor, de 3 mm a 1 cm. De 150 a 151 m, es posible apreciar un cambio textural, causado por el incremento en el tamaño de grano de la arenisca (Figura 7.4), que también se observa en las muestras de testigos.

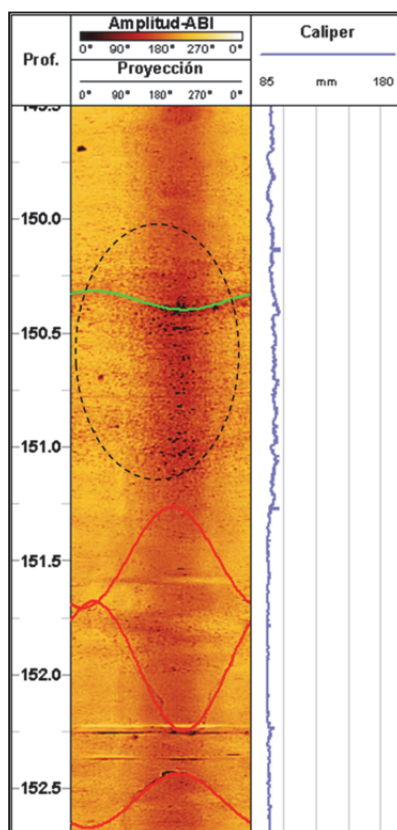


Figura 7. 4. Imagen acústica en el tramo 149.5 – 152 m de la Fm. Areniscas de Arén del sondeo SE-3. Se han identificado muy pocas estructuras, solo dos fracturas de alto ángulo (línea roja) y muy pocas laminaciones (línea verde). Entre 150 y 151 m de profundidad se puede apreciar un cambio textural que indica un incremento de la granulometría (señalado con círculo discontinuo), y está reflejado por un incremento de la irregularidad en el perfil del *cáliper*.

Se deduce por tanto, una elevada estabilidad estructural en toda la formación Areniscas de Arén del sondeo SE-3, y en general poca permeabilidad superficial por fracturación.

- A partir de ensayos Lugeon

El valor de permeabilidad Lugeon obtenido para el tramo comprendido entre los 130 y 135 m de profundidad que es de transición entre la formación confinante y la formación reservorio, fue de 0.92 U.L (9.3 mD). Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), correspondería a una formación muy impermeable (M.I). La gráfica de la Figura 7.1-I permite observar la relación presión – absorción, que proporciona ayuda en la interpretación del comportamiento de la roca durante el tiempo de inyección (fuente de datos: IGME, 2009). En la gráfica existen dos tendencias: una tendencia inicial ascendente de flujo laminar, en el que los valores siguen una respuesta rectilínea proporcional entre la presión ejercida y la absorción. De ahí en adelante se incrementa bruscamente la presión ejercida, con poca absorción por parte del material, es

decir, existe una tendencia de atoramiento (Houlsby, 1976), existiendo una diferencia importante entre el valor de caudal a la presión máxima y el valor a la presión mínima. En el tramo descendente la línea muestra curvatura hacia el eje de caudales, lo que indica que se está produciendo un fenómeno de circulación de fluidos con deformación permanente de la roca.

En el tramo 145 – 150 m de profundidad, el valor Lugeon obtenido ha sido muy similar al del tramo anterior, de 0.96 U.L (Figura 7.1-II). Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), correspondería también a una formación muy impermeable. En relación con este resultado, entre los 143 y 150 m todas las fracturas identificadas mediante imagen acústica, presentan abertura no visible, y de carácter poco penetrativo. Algunas de ellas se presentan rellenas de cemento calcáreo (tal como se ha confirmado en el estudio al microscopio en lámina delgada). Se trata por tanto de un tramo compacto y homogéneo en el que tampoco existe permeabilidad importante por fracturación.

Finalmente, el ensayo Lugeon llevado a cabo en el tramo 160 – 165 m de profundidad, se obtuvo un resultado de 1.02 U.L. Según la clasificación de Olalla & Sopeña (1991), correspondería a una formación prácticamente impermeable (Figura 7.1-III).

En la Tabla 7.1, se puede ver un resumen de todos los ensayos de permeabilidad Lugeon realizados en diferentes tramos la Formación Arenisca de Arén. Los resultados se muestran en Unidades Lugeon (U.L.) y cm/s.

Tabla 7. 1. Resultados de permeabilidad Lugeon, en Unidades Lugeon (U.L.) y cm/s, para los tramos ensayados en la Fm. Areniscas de Arén del sondeo SE-3. Clasificación según Olaya & Sopeña (1991) (M.I.: Muy Impermeable, P.I.: Prácticamente Impermeable).

Formación	Tramo ensayado (m)	U.L.	cm/s	Clasificación*
Areniscas de Arén	130 - 135	0.92	9.2E-06	M.I.
	145 – 150	0.96	9.6E-06	M.I.
	160 - 165	1.02	1.02E-05	P.I.

*Olaya & Sopeña, 1991

- A partir de ensayos en laboratorio

La curva de consolidación obtenida del ensayo se representa en la Figura 7.1; en ella se observa el cambio de volumen durante el ensayo durante un tiempo determinado. Cuando ese valor se estabiliza (traza rosa) se toman los valores para el cálculo de la permeabilidad K_w (estimando el caudal y la velocidad de agua).

A partir de una muestra de arenisca, tomada a los 145.8 m de profundidad, se realizó un ensayo controlado en laboratorio de de gradiente hidráulico. Los resultados dieron un valor de permeabilidad muy bajo, de 6×10^{-10} cm/s (6×10^{-04} mD), que según la clasificación de Mejías & López-Geta (2003), corresponde a una formación de baja permeabilidad (B.P.).

- A partir del estudio de atenuación de la energía acústica

Con el objetivo de de obtener una aproximación de la permeabilidad en la Formación Areniscas de Arén del sondeo SE-3, se estimó el parámetro Ik-Seis siguiendo la metodología de Mari & Guillemot (2012).

La atenuación y la permeabilidad están relacionadas mediante el contenido de arcilla (Klimentos & McCann, 1990), de forma que cuanto más arcilla exista, mayor atenuación de la señal sónica se producirá. Se puede observar en la Figura 7.5 el parámetro Ik-Seis resultante, junto con el parámetro acústico I_c (*Shape Index*) y la atenuación, junto con el registro sónico. Lo más notable es que se aprecia un incremento del parámetro Ik-Seis a partir de los 144 m de profundidad y hasta los 148.5 m. Este incremento de Ik-Seis se corresponde con un ligero cambio en la atenuación, sobre todo a los 143 m. A excepción de este nivel, todo el perfil sónico no muestra ninguna anomalía de atenuación significativa, lo que podría indicar que la arenisca se encuentra bien cementada, y es poco significativa la existencia de arcillas. La existencia de un nivel permeable a esa profundidad parece coherente con los resultados obtenidos y, como ya se observó en las formaciones carbonatadas, la presencia de superficies estilolíticas podría causar esta permeabilidad.

El parámetro I_c muestra una buena coherencia con el factor Ik-Seis en general en todo el tramo almacén, lo que indica una buena correlación entre la permeabilidad de la formación y el Ik-Seis.

A su vez, el perfil de la atenuación parece correlacionarse bien con el registro de imagen acústica en la mayoría de los puntos donde se han identificado planos de fracturación.

A partir de los 149 m, se observa un incremento de la velocidad Vp relacionado con un incremento en el tamaño de grano como se ha podido constatar a través de la imagen acústica y de las muestras de los testigos. El descenso de porosidad en este tramo está relacionado con este tamaño de grano, y sugiere que la arenisca está bien cementada, sin posibilidades apenas de porosidad.

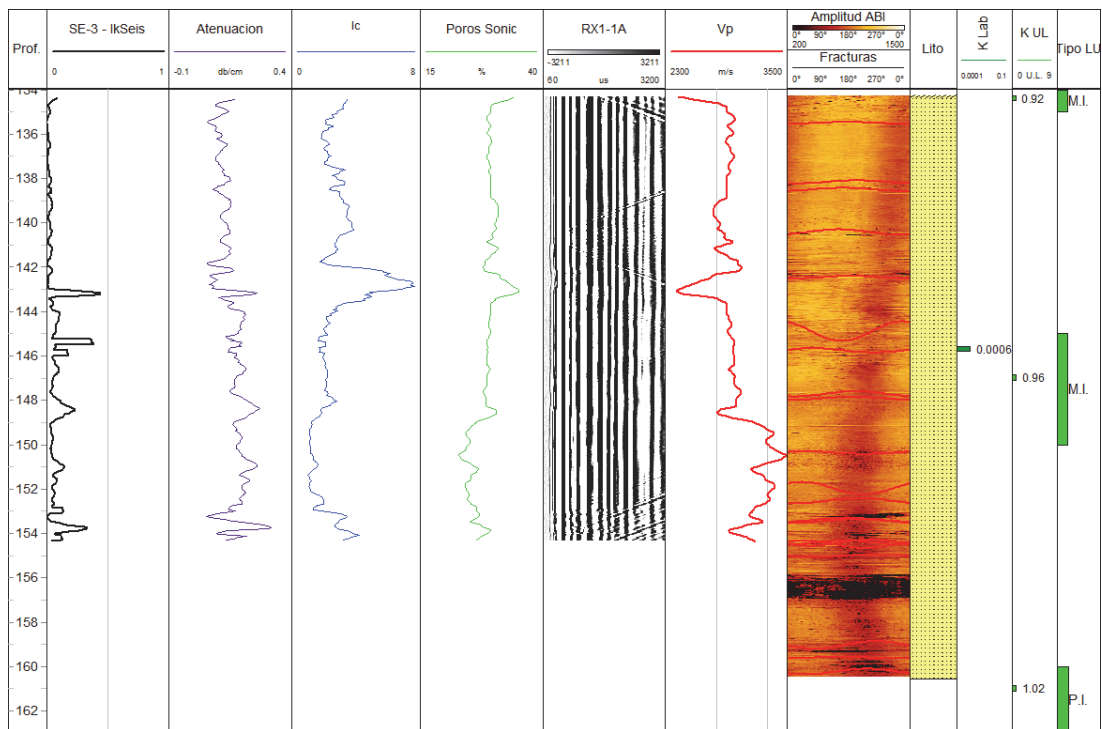


Figura 7. 5. Tramo 134 – 160 m en la formación reservorio del sondeo SE-3, de izquierda de derecha: parámetro Ik-Seis (normalizado), atenuación, Índice de Forma o *Shape Index* (Ic), porosidad sónica, señal sónica registrada en el primer receptor (RX1-1A), velocidad de ondas P estimada (Vp), imagen acústica (Amplitud ABI) con las fracturas identificadas a partir de él, y columna litológica interpretada. Se indican los valores de permeabilidad estimada en laboratorio (KLab), permeabilidad Lugeon (K UL) y, además la clasificación Lugeon según Olalla & Sopena (1991) (M.I. = Muy Impermeable; P.I. = Prácticamente Impermeable).

Los niveles de permeabilidad estimados a través del parámetro Ik-Seis corresponden principalmente con los niveles de fracturas identificados a través de la imagen acústica y del registro sónico, y se correlacionan con el perfil de atenuación y el *Shape Index* (Figura 7.5).

7.1.2 Valoraciones petrofísicas en el sondeo Cajigar-1

En la Figura 7.6, se observa la curva de la estimación de porosidad sónica, junto con el perfil de Radioactividad Gamma Natural para las areniscas del Maastrichtiense del sondeo profundo de petróleo Cajigar-1.

Tanto los tramos interpretados como arenisca (carbonatada) en la interpretación realizada en el apartado 6.1.3 de esta tesis, es decir, desde los 1277 m a los 1287 m, 1291 a los 1296 m, y desde los 1310 m de profundidad, como el tramo interpretado como caliza margosa (1296 – 1310 m), la porosidad sónica estimada es baja, no superando en ninguno de los casos, el 12 %. No obstante, de todas estas secciones, las que mayor porosidad sónica presentan son las areniscas (exceptuando los niveles interpretados como margosos) (Figura 7.6).

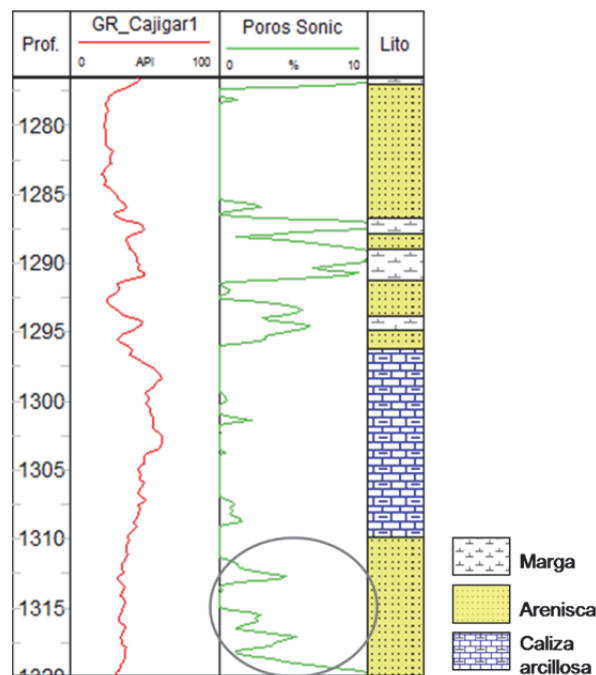


Figura 7. 6. Registros en la zona perteneciente a la Fm. Areniscas de Arén del sondeo Cajigar-1, correlacionada con la homóloga del sondeo SE-3, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), perfil de porosidad sónica estimada y columna litológica interpretada. Se resalta la zona de areniscas con mayor porosidad sónica.

7.1.3 Valoraciones petrofísicas en el sondeo Monesma-1

En el tramo estudiado, interpretado en esta tesis como areniscas (Capítulo 6), la porosidad neutrón presenta valores muy bajos, comprendidos entre 3% y 4%. En la Figura 7.7, se puede ver la evolución de la porosidad neutrón en profundidad para dicho tramo.

Las lecturas del registro neutrón proporcionan un valor de porosidad muy aproximado al real (porosidad total), siempre y cuando se trate de formaciones geológicas “limpias”, puesto que no diferencia entre el hidrógeno del fluido de los poros, del hidrógeno del agua cristalizada y adherida a los granos. Por esta razón se ha combinado con otro registro de porosidad (preferiblemente densidad), para obtener un valor fiable.

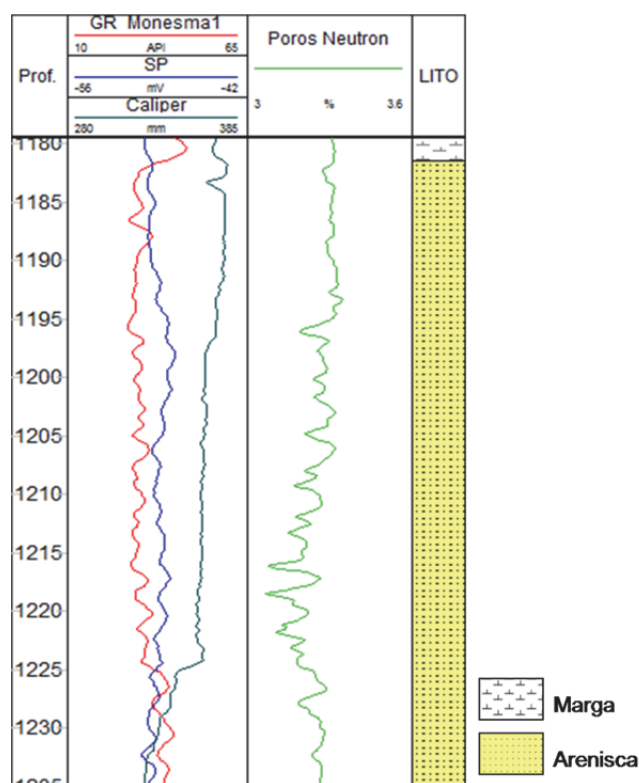


Figura 7. 7. Registros pertenecientes al sondeo Monesma-1 para el tramo 1180 – 1235 m, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), Potencial natural (SP), *cáliper* mecánico, porosidad neutrón y columna litológica interpretada.

7.1.4 Conclusiones

En la Tabla 7.2, se pueden observar los rangos de valores petrofísicos obtenidos para los pares sello-formación en el sondeo somero SE-3, y los sondeos profundos Cajigar-1 y Monesma-1: Porosidad sónica (\emptyset_s), porosidad neutrón (\emptyset_n), porosidad a partir de lámina delgada (\emptyset_{LD}), porosidad total estimada en laboratorio (\emptyset_{tLab}), permeabilidad estimada en laboratorio (K_{wLab}) y permeabilidad obtenida mediante ensayos Lugeon (K_{Lugeon}).

Tabla 7. 2. Rangos de valores de algunos de los parámetros petrofísicos estimados para los pares formación confinante (facies Garum) y formación reservorio (Fm. Areniscas de Arén) en los sondeos SE-3 y los tramos estudiados de los sondeos de petróleo Cajigar-1 y Monesma-1 (\emptyset_s = porosidad sónica; \emptyset_n = porosidad neutrón; \emptyset_{tLab} = porosidad total en laboratorio; K_w = conductividad hidráulica; K_{Lugeon} = permeabilidad por Lugeon).

	Formación	Litología	\emptyset_s (%)	\emptyset_n (%)	\emptyset_{LD} (%)	\emptyset_{tLab} (%)	K_w Lab (cm/s)	K_{Lugeon} (cm/s)
SE-3	Areniscas de Arén	Areniscas	23 - 37	-	2 - 22	4.2	6×10^{-10}	$9.2 \times 10^{-6} - 1.02 \times 10^{-5}$
Cajigar-1		Areniscas	< 12	-	-	-	-	-
		Calizas arcillosas		-	-	-	-	-
Monesma-1		Areniscas	-	3 - 6	-	-	-	-

➤ Porosidad

Los valores específicos de porosidad sónica (\emptyset_s) en las areniscas de la formación reservorio del sondeo SE-3 son elevados (Tabla 7.2), y presentan poca heterogeneidad a lo largo del tramo estudiado. En los tramos estudiados del sondeo Cajigar-1, muestran valores bajos (la mitad de los observados en SE-3) tanto en las calizas arcillosas como en las areniscas. La diferencia entre ambos sondeos podría ser debida fundamentalmente a la presión ejercida sobre las areniscas por la diferencia de profundidad existente entre el sondeo somero y el profundo, que se encuentra a más de 1150 m de profundidad (Schmidt & McDonald, 1979; Sherer, 1987). Experimentos llevados a cabo en areniscas (Serra, 2004), demostraron que la velocidad sónica crece a medida que se incrementa la presión (Figura 7.8).

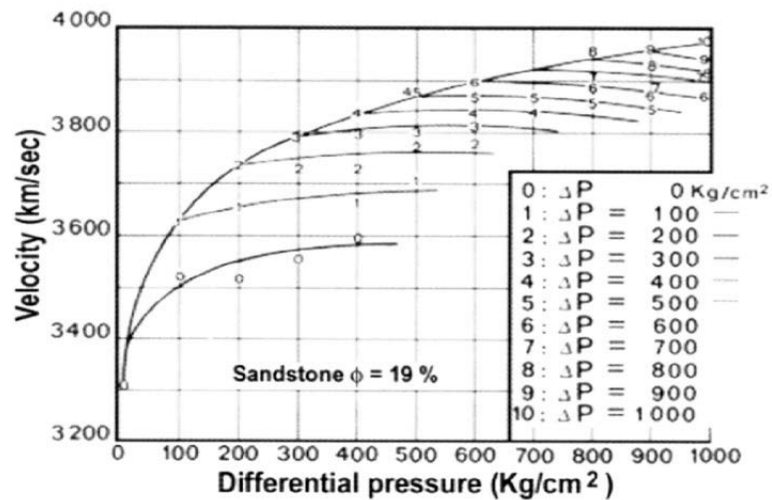


Figura 7. 8. Variación de la velocidad sónica con respecto a la variación de presión, en experimentos sobre areniscas (Instituto Francés del Petróleo, Serra, 2004).

En el sondeo Monesma-1, el tramo interpretado como areniscas, presenta valores de porosidad neutrón muy bajos.

A partir de las muestras en lámina delgada analizadas al microscopio, y pertenecientes a la Formación Areniscas de Arén del sondeo somero, se obtuvieron valores de porosidad con un valor medio del 12 %. Las observaciones revelan que la porosidad es principalmente de tipo intergranular, con un muy pequeño porcentaje de porosidad secundaria debida a fracturación. En profundidad, las muestras tomadas a partir de los 148 m, presentan un mayor tamaño de grano, con un redondeamiento importante de los granos, y un menor valor de porosidad con respecto a otras muestras localizadas a menor profundidad. Se produce una reducción de la porosidad en lámina delgada en profundidad, y muy probablemente, de la permeabilidad, debido principalmente a la compactación. Cabe esperar por tanto, un comportamiento similar en las areniscas interpretadas en los sondeos profundos de petróleo Cajigar-1 y Monesma-1, y que se localizan a más de 1200 m y 1180 m de profundidad respectivamente, y que presentarían porosidades menores que las registradas en el sondeo somero.

La porosidad total calculada de la única muestra de arenisca sometida a ensayo de gradiente hidráulico controlado en laboratorio, fue baja (4.2%).

➤ Permeabilidad

En la formación sello y formación almacén del sondeo SE-3 se han identificado, mediante imagen acústica, muy pocas fracturas, diferenciando muy escasos tramos competentes de tramos con mayor debilitamiento estructural (por fracturación o erosión) observados solamente en la facies Garum. La fracturación identificada a lo largo de la Formación Areniscas de Arén en SE-3 es fracturación natural, en general no significativa, y de carácter poco penetrativo. Las fracturas están en su mayoría cementadas, y las que no, suelen presentar una apertura no visible.

Confirmando las observaciones realizadas a partir de la imagen acústica de sondeo, si se estudia el perfil del registro de la señal sísmica, se puede ver la gran continuidad de la señal registrada, sin apenas atenuaciones. No se identifica, por tanto, fracturación significativa.

Los ensayos de permeabilidad Lugeon, realizados en la Formación Areniscas de Arén del sondeo SE-3, dieron valores propios de una formación prácticamente impermeable a muy impermeable (Olalla & Sopeña, 1991). Los tres ensayos Lugeon realizados dieron resultados similares, es decir una elevada impermeabilidad de la formación. Apoyando por tanto el carácter no penetrativo de las fracturas identificadas mediante imagen acústica, los ensayos de permeabilidad Lugeon sugieren de nuevo, la no existencia de permeabilidad por fracturas.

El valor de conductividad hidráulica (K_w) estimada en laboratorio, corresponde a una formación de baja permeabilidad (B.P.) según Mejías & López-Geta (2003).

Si se compara este resultado de permeabilidad obtenido en laboratorio, con el obtenido para la misma profundidad mediante el ensayo Lugeon, se aprecia que aquel es menor (6×10^{-10} cm/s y 9.7×10^{-6} cm/s respectivamente). Como se puede ver en los datos obtenidos, a escala de laboratorio la permeabilidad estimada es menor que la estimada mediante los ensayos a escala de campo. Esto se puede explicar por la naturaleza propia del ensayo Lugeon, ya que mide la permeabilidad debida a fracturas y planos de debilidad como fallas, fisuras y toda clase de discontinuidades existentes en el tramo ensayado. Las diferencias en las características estructurales existentes en el material rocoso, pueden producir diferencias en los resultados estimados de porosidad y de permeabilidad (Rostami *et al.*, 2014).

El perfil del factor I_k -Seis, estimado a partir de la atenuación de la señal acústica, sugiere la existencia de una mayor permeabilidad a partir de los 143 m de profundidad en la Formación Areniscas de Arén de SE-3. Las escasas fracturas, identificadas a partir de la imagen acústica,

se encuentran en su mayoría cementadas, lo que reduce la posibilidad de permeabilidad. Este incremento en el parámetro Ik-Seis podría deberse a las escasas fracturas que están abiertas, y a la presencia de superficies estilolíticas en la formación a partir de esa profundidad, que le conferirían la posibilidad de cierta invasión de fluidos.

De acuerdo con los valores de permeabilidad obtenidos, con la caracterización de las fracturas, con el conjunto de diagráfias analizadas y con el estudio de la porosidad mediante lámina delgada en la zona reservorio del sondeo SE-3, se puede concluir que en general se trata de una formación muy poco permeable y con muy bajos valores de porosidad. La Facies Garumen el sondeo SE-3 presenta elevada homogeneidad estructural, poca heterogeneidad litológica y escasas fracturas identificadas en general.

➤ Valoración final del par sello – almacén

En la Tabla 7.3, se presentan algunos de los parámetros a tener en cuenta en la valoración de la calidad de las formaciones sello y formaciones almacén estudiadas en los tres sondeos SE-3, Cajigar-1 y Monesma-1. Se señalan los valores indicativos positivos y cuestionables.

Tabla 7. 3. Resultados obtenidos y valoraciones en las formaciones confinantes y reservorios de SE-3, Cajigar-1 y Monesma-1 estudiadas (\emptyset_t = Porosidad total; \emptyset_s = porosidad sónica; \emptyset_n = porosidad neutrón).

		Litología	Prof. (m)	Continuidad lateral	Espesor* (m)	Poros. (%)	Permeab. (mD)
SE-3	Sello	Arcillas / Lutitas	12 - 134	Buena	67	-	-
	Almacén	Areniscas	134 - 161	Cuestionable	39	$\emptyset_t = 3 - 26$	< 25
Cajigar-1	Sello	Arcillas / Margas	> 1160	Buena	117	-	-
	Almacén	Areniscas	> 1277	Cambios laterales	10	$\emptyset_s < 15$	-
		Calizas arcillosas	> 1296		13		
Monesma-1	Sello	Margas	> 960	Buena	176		
	Almacén	Areniscas	> 1180	Cuestionable	45	$\emptyset_n = 3 - 6$	

(*) Espesor neto para el almacén

Todos los tramos sello presentan una buena continuidad lateral. En el caso del espesor, hay disparidad de resultados; en el sondeo SE-3 la calidad del sello es baja debido a que no supera los 70 m de espesor, pero en cambio en los sondeos profundos, la serie Garum muestra un espesor mayor de los 100 m.

En cambio, la continuidad lateral de las formaciones reservorio es cuestionable en los tres casos, pues no se ha podido correlacionar un tramo competente entre ellos. Los posibles cambios laterales de facies existentes entre los tres sondeos implican espesores netos limitados de los reservorios. En los tres casos, las formaciones areniscosas estudiadas no alcanzan los 50 m de espesor neto (Arén en Cajigar-1 tiene unos 150 m de espesor, según el informe del sondeo), condición cuestionable según Chadwick *et al.*, (2008).

En lo referente a los valores de porosidad, los valores obtenidos en las areniscas carbonatadas de SE-3 se consideran bajos para ser considerados óptimos en una formación reservorio.

En los sondeos de petróleo Cajigar-1 y Monesma-1, los valores de porosidad estimados de sónica y porosidad neutrón son muy bajos, menores del 15 % y del 6% respectivamente. Los valores de porosidad neutrón, que se pueden considerar más próximos a la porosidad total que los sónicos, pueden sugerir a priori, valores de porosidad total bajos para el tramo estudiado del sondeo Monesma-1. Por su parte, la porosidad sónica tan baja estimada en el tramo estudiado del sondeo Cajigar-1, muestra la poca porosidad secundaria existente.

Los valores de permeabilidad obtenidos en la Formación Areniscas de Arén de SE-3 son de baja calidad para una formación reservorio según los criterios de Chadwick *et al.*, (2008). Complementariamente a este dato, las valoraciones cualitativas a partir del factor Ik-Seis no son, a priori, significativas, lo que confirma el carácter impermeable general de la formación.

7.2 Caracterización y evaluación petrofísica de la facies Keuper arenoso en SB-1 y de la facies Keuper arcilloso en Salobral-1 y Carcelén-1

Las estimaciones de porosidad obtenidas en la facies Keuper arenoso del sondeo SB-1 se han limitado exclusivamente al estudio mediante microscopio, de 4 muestras en lámina delgada, ya que no se pudo realizar la adquisición de datos sínicos.

En cuanto al estudio cualitativo de la permeabilidad, se ha seguido la metodología ya descrita para los otros sondeos.

Las medidas cuantitativas de permeabilidad realizadas se llevaron a cabo mediante un ensayo de permeabilidad Lugeon en la facies Keuper arenosa, en el tramo 87 - 92 m de profundidad.

En los sondeos profundos Salobral-1 y Carcelén-1, en la facies Keuper arcillosa la estimación de la porosidad se ha realizado a partir del registro sínico y neutrón.

7.2.1 Porosidad y permeabilidad en el sondeo SB-1

➤ Porosidad

Como se carece de registro sínico a partir del cual estimar el valor de V_p , los únicos valores con los que se ha contado para la valoración de porosidad, han sido las porosidades a partir de las muestras analizadas mediante lámina delgada. Todos ellos se pueden observar en la Figura 7.9.

A la profundidad de 76.5 m se estimó la porosidad de una muestra de arenisca-limolita (Referencia MALCA-18A). La presencia de cemento hace que la porosidad de esta lámina no sea muy importante, representando un valor aproximado del orden del 8%, es decir, de baja a media (Archie, 1952; Sander, 1967). La porosidad más común se muestra generalmente como cavidades alargadas de 0.1 mm de ancho y un largo de 0,2 a 1 mm.

Continuando en profundidad, a los 80 m, el estudio de porosidad en una muestra de cuarzoarenita (lámina MALCA-24A) reveló una porosidad un poco más elevada que la anterior, entre un 11 y un 15 %. El tipo de porosidad observado aquí es fundamentalmente intergranular, y se encuentra distribuida de forma irregular por toda la lámina.

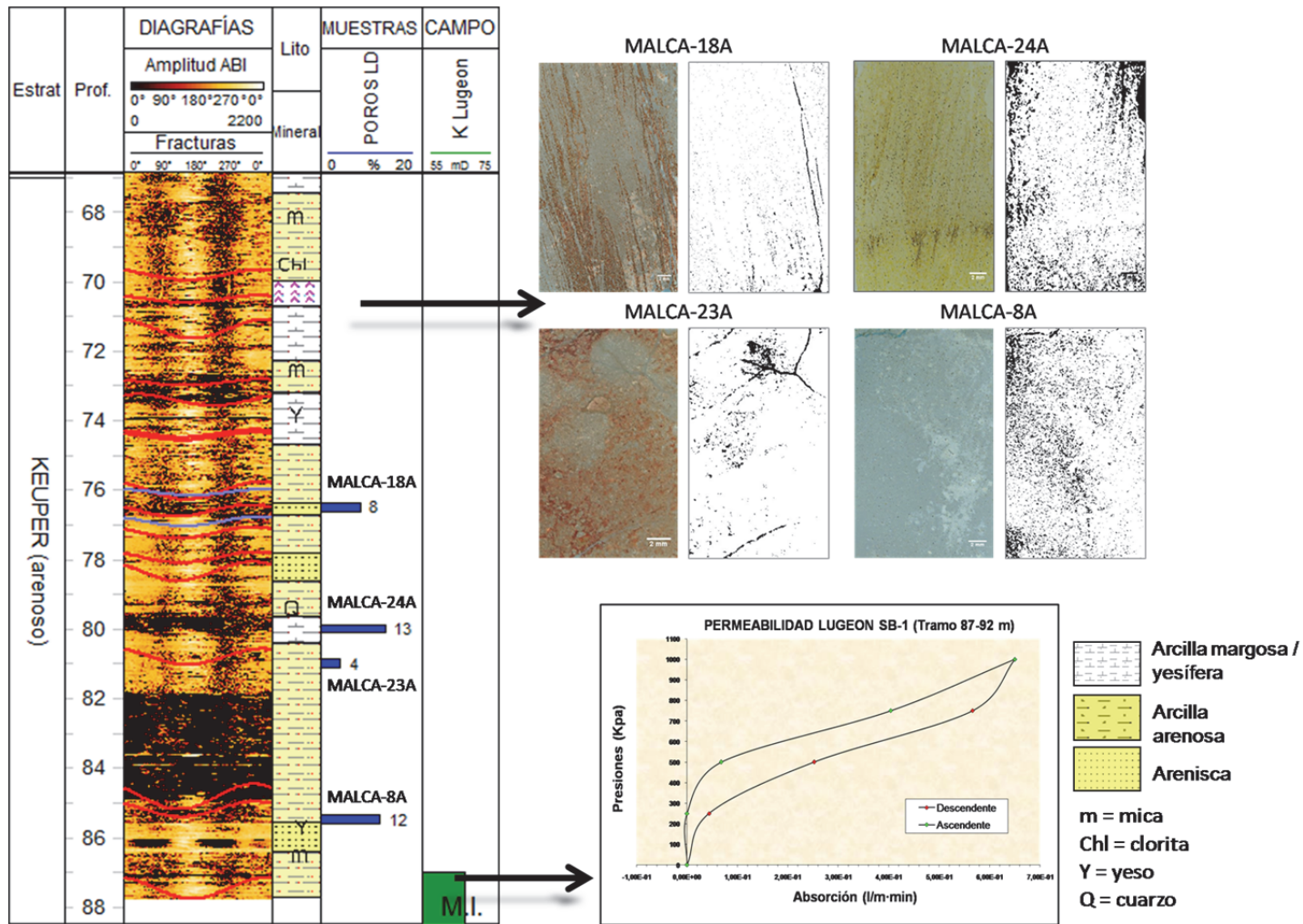


Figura 7. 9. Registros en el tramo 66 – 88.6 m de profundidad en el sondeo SB-1, de izquierda a derecha: imagen acústica y fracturas identificadas, columna litológica interpretada y mineralogía identificada, porosidad a partir de muestras en lámina delgada (poros LD), con las fotos de las láminas y su porosidad en negro a la derecha, y ensayo de permeabilidad Lugeon en campo (K Lugeon), con el gráfico obtenido a la derecha.

El estudio de la porosidad a partir de otra muestra de limolita (MALCA-23A), localizada a los 81 m de profundidad, indica una porosidad baja, en torno al 4 %, y la mayoría en forma de fracturas.

A los 85.5 m de profundidad se estimó la porosidad de otra limolita (Referencia MALCA-8A). La ausencia de cemento en la mayor parte de esta lámina se traduce en una porosidad que puede llegar a ser muy significativa, con cavidades generalmente circulares o alargadas, de 0.1 a 0.2 mm de diámetro, aunque pueden alcanzar dimensiones de hasta 1 mm. En conjunto, la porosidad representa aproximadamente un 12%, es decir, es una porosidad media. La tinción de la lámina es deficiente, y la porosidad no queda completamente teñida de azul, aunque se puede diferenciar debido a la extinción que sufre con polarizadores cruzados.

➤ Permeabilidad

- A partir de diagragfías

Las fracturas identificadas mediante el registro de imagen acústica son muy escasas tal como se puede ver en la Figura 7.10 (puntos rojos), y en general se observa poco penetrativa. Se encuentran en su mayoría cementadas por calcita y evaporitas. Aun así, el carácter penetrativo de las mismas es más acusado que en la zona confinante. En la Figura 7.10 se observa la representación equiareal de las mismas para la facies Keuper arenoso, a modo de visualización de su frecuencia.

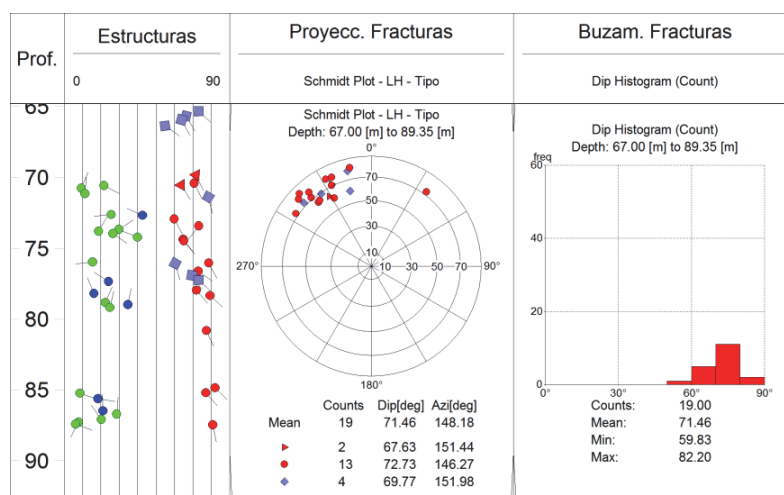


Figura 7. 10. Facies arenosa del Keuper del sondeo SB-1, de izquierda a derecha: proyección polar de las estructuras sedimentarias (estratificación / laminación = verde; fracturas = rojo); proyección estereográfica equiareal de los planos de fracturación identificados a partir del registro de imagen acústica. Se representa, mediante histograma, la frecuencia de los buzamientos de las fracturas identificadas.

- A partir de ensayos Lugeon

El ensayo de permeabilidad Lugeon realizado entre los 87 y 92 m de profundidad dio una gráfica resultante que se puede ver en la Figura 7.9. En la gráfica se observa una tendencia inicial de aumento brusco de la presión y de la absorción hasta los 250 Kpa de presión suministrada. A partir de ese punto se produce el destaponado, seguido de una morfología ascendente de flujo laminar con un incremento paulatino de la absorción hasta alcanzar la presión máxima de 1000 KPa.

El valor de permeabilidad (inyectabilidad) obtenido para este tramo fue de 0.65 U.L., que según la clasificación de Olaya & Sopeña (1991), correspondería a una formación muy impermeable (MI), con un valor de 6.5×10^{-05} cm/s (Tabla 7.4). En este tramo ensayado, apenas se han identificado fracturas a partir de la imagen acústica.

Tabla 7. 4. Tabla con resultados de permeabilidad Lugeon, en Unidades Lugeon (U.L.) y cm/s, del tramo ensayado en la facies Keuper arenoso del sondeo SB-1 (M.I. = Muy Impermeable).

Formación	Tramo ensayado (m)	U.L.	cm/s	Clasificación*
Keuper arenoso	87 - 92	0.65	6.5E-05	M.I.

*Olaya & Sopeña, 1991

7.2.2 Valoraciones petrofísicas en los sondeos Salobral-1 y Carcelén-1

En la Figura 7.11, se puede ver la estimación que se ha llevado a cabo de la porosidad sónica en el tramo comprendido entre los 1074 y 1140 m de profundidad del sondeo Salobral-1. También se muestra el valor estimado después de la corrección por arcillosidad de las areniscas (Poros W_{crr}). Los dos intervalos identificados como areniscas muestran un valor bajo de porosidad sónica, entre 4 y 14 %.

En los niveles interpretados como arcillas arenosas se han estimado valores de porosidad sónica elevados, entre 12 y 24 %.

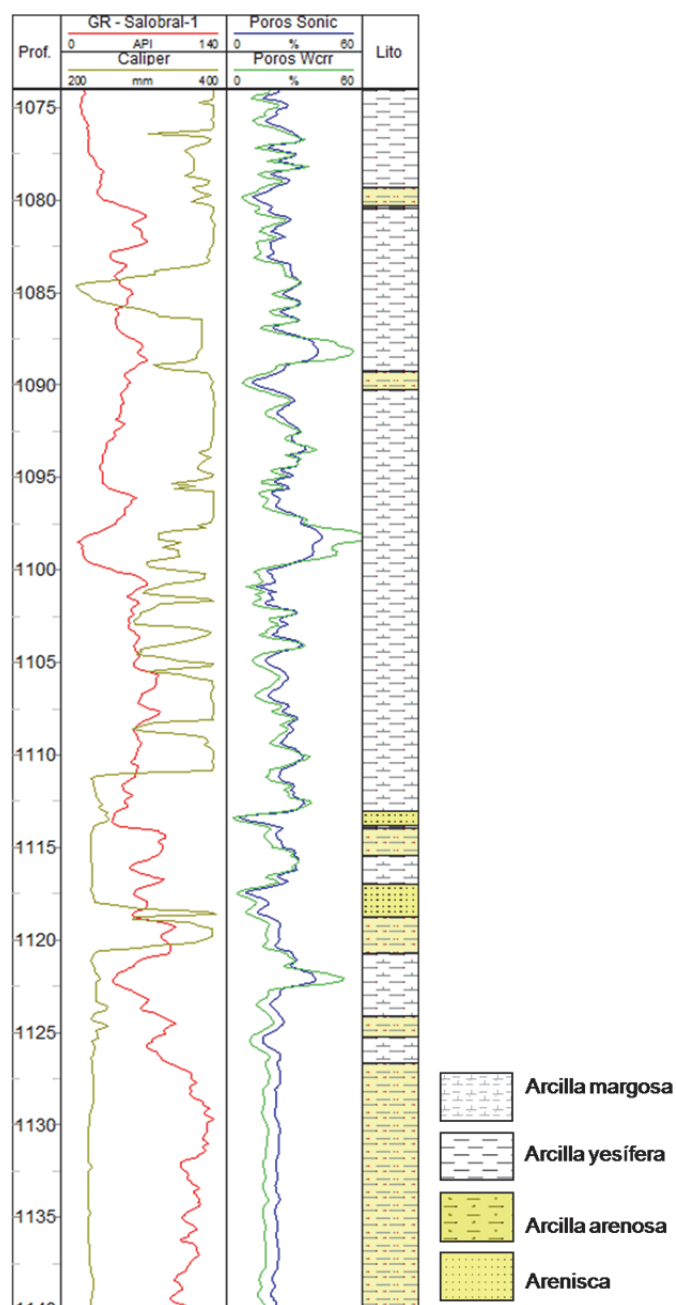


Figura 7. 11. Registros en el tramo 1074 – 1140 m de profundidad en la facies Keuper del sondeo Salobral-1, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* mecánico, valor estimado de porosidad sónica, porosidad sónica corregida por arcillosidad (Poros Wcrr) y columna litológica interpretada.

En la Figura 7.12, se pueden ver los valores de porosidad neutrón en el tramo 2095 – 2163 m del sondeo Carcelén-1: se mantienen aproximadamente constantes, situándose entre el 3 y 5 % en las areniscas. La porosidad sónica corregida estimada para estos mismos niveles oscila entre 7 y 10%.

Las arcillas arenosas presentan una porosidad neutrón muy baja, entre 3 y 4 % aproximadamente, mientras que la porosidad sónica se sitúa entre un 17 y un 25 %.

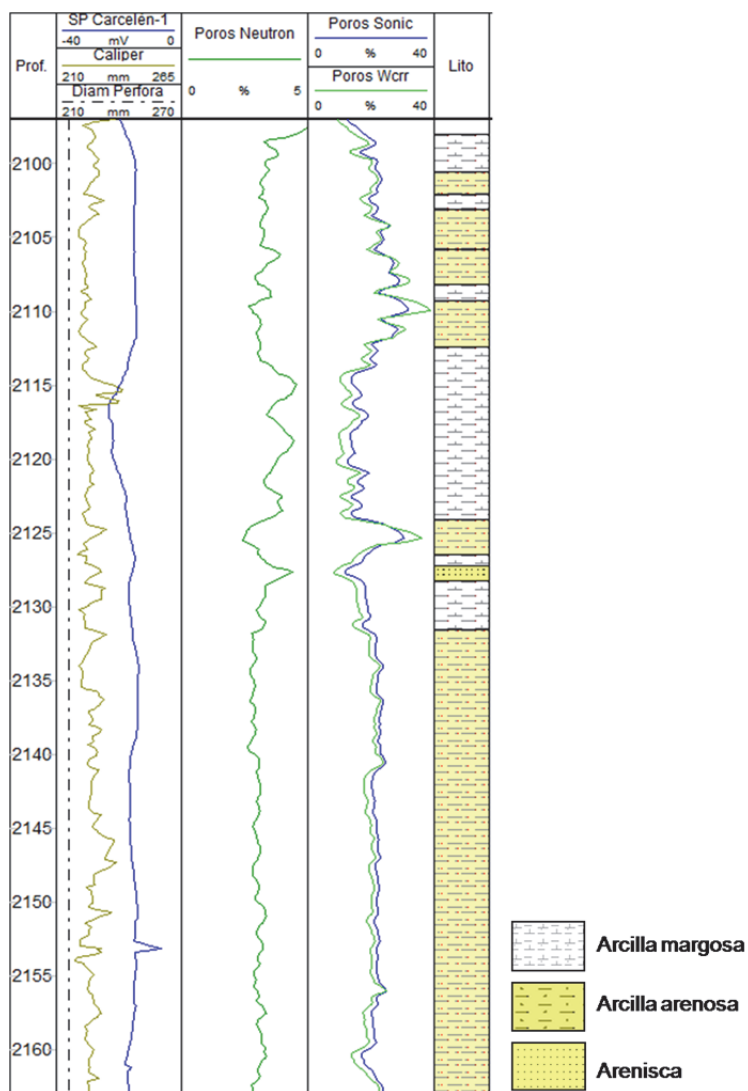


Figura 7. 12. Registros en la facies Keuper para el tramo 2095 – 2163 m en el sondeo Carcelén-1, de izquierda a derecha: potencial natural (SP), *cáliper* mecánico, diámetro de la perforación, porosidad neutrón, porosidad sónica y columna litológica interpretada.

7.2.3 Conclusiones

➤ Porosidad

En las facies Keuper arenosa del sondeo SB-1, la porosidad se ha determinado exclusivamente a partir del análisis al microscopio de muestras en lámina delgada. En los sondeos profundos y antiguos de petróleo Salobral-1 y Carcelén-1 se han estimado valores específicos de porosidad sónica y porosidad neutrón para la facies Keuper. Los distintos valores se muestran en la Tabla 7.5.

Tabla 7. 5. Rangos estimados de porosidad neutrón (\emptyset_n), sónica (\emptyset_s) y porosidad a partir de lámina delgada (\emptyset_{LD}) en las facies Keuper del sondeo SB-1 y los tramos correlacionados de los sondeos profundos Salobral-1 y Carcelén-1. Se muestra el resultado del ensayo Lugeon realizado en la facies Keuper arenosa del sondeo somero SB-1. Los valores de porosidad en SB-1 están dados para las areniscas.

	Formación	Litología	\emptyset_n (%)	\emptyset_s (%)	\emptyset_{LD} (%)	K Lugeon (cm/s)
SB-1	Keuper arenoso	Arenisca, arcilla arenosa	-	-	4 - 22	6.5×10^{-05}
Salobral-1	Keuper (arcilloso-yesífero)	Arenisca	-	4 - 14	-	-
		Arcilla arenosa	-	12 - 24	-	-
Carcelén-1	Keuper (arcilloso)	Arenisca	3 - 5	7 - 10	-	-
		Arcilla arenosa	3 - 4	17 - 25	-	-

El valor de la porosidad estimado a partir del análisis en microscopio sobre muestras de areniscas de la facies Keuper del sondeo SB-1 reveló una porosidad principalmente de tipo intergranular, y en segundo término, por fracturación. El rango de valores obtenido es muy amplio (Tabla 7.5).

Los dos sondeos profundos de petróleo muestran valores muy variables de porosidad sónica. Las arcillas margosas y arenosas interpretadas en el sondeo Carcelén-1 presentan porosidades sónicas ligeramente menores que las estimadas para Salobral-1. Los valores tan bajos de porosidad neutrón en las areniscas del sondeo Carcelén-1 podrían deberse a la elevada presencia de arcillas.

➤ Permeabilidad

La valoración cualitativa de permeabilidad a partir de los registros de resistividad, muestra la existencia de invasión de fluidos en toda la facies Keuper arenosa del sondeo somero. A nivel cuantitativo, el único ensayo de permeabilidad Lugeon llevado a cabo, mostró resultados de inyectabilidad bajos (10 mD), correspondientes a una formación muy impermeable.

En el sondeo SB-1, se identificó una familia de fracturas naturales en la facies arenosa. La fracturación es escasa y poco penetrativa, y menos abundante que en la zona de sello. Las fracturas identificadas son en su mayoría cerradas o con una apertura cementada por carbonato o por material evaporítico. Se ha identificado un elevado número de vetas de yeso, pero son más escasas que en la zona confinante.

En el sondeo Carcelén-1, el informe de perforación detalla la existencia de varias zonas fracturadas observadas en los testigos, aunque no hay presencia de accidentes tectónicos relevantes. Falta, no obstante, confirmar la existencia de zonas falladas en los tramos de estudio pertenecientes al sondeo Salobral-1. En este aspecto, en la facies Keuper arenosa del sondeo somero, la imagen acústica ha demostrado la existencia de un número de fracturas poco significativo, no habiéndose identificado ninguna zona fallada.

➤ Valoración final del par sello – almacén

En la Tabla 7.6, se observan algunos de los condicionantes a tener en cuenta para la valoración de una formación como sello y almacén de CO₂.

La continuidad lateral de las facies estudiadas en los tres sondeos, el sondeo somero y los dos sondeos de petróleo ha quedado reflejada a partir de la correlación mediante diagrfias establecida en el capítulo correspondiente. Según ésta, solo se ha podido correlacionar un tramo de la facies yesífero-arcillosa de la zona de sello. Por tanto, esta facies del sello sí mostrará una probada continuidad lateral entre los tres sondeos. No sucede lo mismo con la parte identificada como reservorio, donde no ha podido establecerse correlación estratigráfica alguna.

Asimismo, el espesor de las formaciones consideradas sello (habitualmente en secciones superiores a 20 m de espesor), presentan condiciones óptimas para actuar como tal en el caso de los sondeos profundos, no así en el sello del sondeo SB-1, que es inferior a los 100 m de

espesor. Las capas de areniscas interpretadas, cuyo espesor neto no supera los 5 m en ambos sondeos, no es un valor bueno para una formación almacén (Chadwick *et al.*, 2008).

Las porosidades estimadas en los niveles de areniscas en el sondeo somero SB-1 se sitúan en el límite de lo cuestionable como condición idónea (Tabla 7.6).

Los valores de porosidad sónica y neutrón disponibles para los tramos de las formaciones reservorio estudiados en los sondeos de Salobral-1 y Carcelén-1 son valores muy bajos (inferiores al 5 %). La porosidad neutrón disponible para el sondeo Carcelén-1, es a priori, la que más se aproxima a la porosidad total del reservorio, y por tanto, parece indicar que en dicha formación existirá un rango de porosidades bajas.

Finalmente, el único valor obtenido de permeabilidad en el sondeo somero, muestra un valor inferior a los 70 mD, que según Chadwick *et al.*, (2008), entra en el rango de valor cuestionable de permeabilidad (Tabla 7.6).

Tabla 7. 6. Valoraciones en las formaciones sello y almacén de los tramos estudiados en los sondeos SB-1, Salobral-1 y Carcelén-1 (\emptyset_{LD} = Porosidad a partir de lámina delgada).

		Litología	Prof. (m)	Continuidad lateral	Espesor* (m)	Poros. (%)	Permeab. (mD)
SB-1	Sello	Arcilla margosa-yesífera	12 - 67	Buena	< 100	-	-
	Almacén	Arenisca	> 67	Cuestionable	1 - 2	$\emptyset_{LD} = 4 - 22$	66
Salobral-1	Sello	Arcilla margosa-yesífera	> 1080	Buena	> 100	-	-
	Almacén	Arenisca		Cuestionable	1 - 5	$\emptyset_s = 6 - 22$	-
Carcelén-1	Sello	Arcilla margosa	> 2100	Buena	> 100	-	-
	Almacén	Arenisca		Cuestionable	1 - 3	$\emptyset_s = 9 - 12$ $\emptyset_n = 4 - 5$	-

(*) Espesor neto para el almacén

8. DISCUSIÓN

La secuencia metodológica se ha aplicado a las formaciones sello y a reservorios carbonatados y clásticos cortados por los sondeos estudiados, sondeos someros del Plan ALGECO2 (IGME, 2009) y sondeos de petróleo próximos, mediante el análisis íntegro de sus diagrfias y la correlación de parámetros de laboratorio e hidráulicos.

Además, en esta tesis se han incluido el estudio de parámetros sísmicos a partir del análisis de la atenuación de ondas sísmicas. Ello constituye una herramienta útil para la obtención de resultados satisfactorios en cuanto a almacenamiento y sellado de CO₂.

Aunque la determinación y el análisis de todos estos parámetros se realizan sobre volúmenes de roca a escala muy diversa, las condiciones sedimentológicas de los reservorios y los límites de los rangos de los parámetros que se han estimado, sostienen la aplicabilidad de esta metodología.

8.1 Valoración general de los parámetros petrofísicos estimados

Tanto los carbonatos como las areniscas interpretados en todos los sondeos se formaron en cuencas, medios sedimentarios y edades diferentes, y muestran por tanto, características diversas y propias de su específico contexto geológico histórico.

El medio sedimentario de un material determina muchos de los aspectos a tener en cuenta en la caracterización de una formación reservorio, como por ejemplo la formación de porosidad o de fracturación, los procesos de diagénesis o la relación entre la permeabilidad y la porosidad (Dunham, 1962; Longman, 1980; Stonecipher *et al.*, 1984).

Las rocas clásticas y las rocas carbonatadas presentan diferencias en las propiedades de sus respectivos reservorios, y la manera de afrontar su estudio, dependerá de factores intrínsecos a dichas formaciones (génesis, petrología, sedimentación, calibración, arcillosidad, etc.) y extrínsecos (petrofísica, problemas asociados a la perforación, medios técnicos, etc.).

A nivel petrográfico, en la Tabla 8.1 se pueden ver algunas de las diferencias existentes entre los carbonatos y las areniscas cuando actúan como formaciones reservorio.

Tabla 8. 1. Comparación de variables que van a influir en la calidad de un reservorio de carbonatos y de areniscas (modificado de Choquette & Pray, 1970).

	CARBONATOS	ARENISCAS
Composición del sedimento	Baja variabilidad	Alta variabilidad
Mineralogía del cemento	Aragonito, calcita, dolomita	Q, calcita, dolomita, arcilla, anhidrita, etc.
Geometría de poro original	Intergranular, intragranular	Intergranular
Geometría de poro final	Intergranular = Intercristalina = móldica > microporosidad	Intergranular = Intercristalina > móldica
Uniformidad de tamaño de poro, forma y distribución	Muy uniforme a muy heterogéneo incluso dentro de una facies	Muy uniforme dentro de una facies
Influencia de diagénesis	Importante	Variable

El uso de diagrfias es esencial para la determinación de los parámetros petrofísicos de las rocas, sobre todo cuando las formaciones estudiadas se encuentran a cientos de metros de profundidad. Resulta además interesante poder complementar esta información con las observaciones de los testigos continuos extraídos de la perforación, y con los ensayos in situ realizados, que en los sondeos someros se llevan a cabo más fácilmente por la mayor simplicidad en comparación con los de petróleo.

➤ **Porosidad**

La porosidad es uno de los parámetros fundamentales a la hora de hacer una valoración económica, geomecánica y geofísica de una formación reservorio (Asodeh & Bagheripour, 2013).

Desde un punto de vista físico y genético, las calizas y dolomías presentan un sistema poroso complejo, consecuencia principalmente de una génesis también compleja, que es debida a su vez, a la movilidad química de los minerales. Estas rocas poseen una textura deposicional muy variable, y debido a estos frecuentes cambios, presentarán una porosidad inicial elevada y muy variada dependiendo de la tipología: las rocas con texturas granulares, presentan porosidad intergranular principalmente; las rocas bioconstruidas muestran una porosidad que depende de los organismos que las constituyen; y los lodos carbonatados son los que presentan una mayor

porosidad, alcanzándose a veces valores superiores al 70% en el momento del depósito (Alonso, 2006).

Las estimaciones de porosidad realizadas en esta tesis han pasado por diferentes escalas y resoluciones: escala macroscópica, a nivel de sondeo (porosidad sónica, por densidad y neutrón), escala mesoscópica en laboratorio, y escala microscópica mediante muestras en lámina delgada.

Habitualmente, los valores de porosidad calculados a partir del registro de densidad son más próximos a los resultados obtenidos a partir de muestras de testigos, que las porosidades obtenidas a partir del registro sónico o neutrón (Freeman & Osoba, 1979).

La porosidad sónica es una medida de la porosidad primaria o intergranular (matricial), pero en reservorios donde existe además porosidad secundaria (oquedades, fracturas, fisuras, etc.), dicha porosidad puede influir notablemente en la distribución de los poros (Kazatchenko *et al.*, 2003). Aunque las porosidades determinadas a partir del registro sónico tienden a ser más elevadas que las porosidades estimadas a partir del registro de densidad, por la presencia de arcillas en la formación (Freeman & Osoba, 1979), el registro sónico presenta varias ventajas (Etnyre, 1989). Una de ellas es que no están afectados por distorsiones importantes del sondeo, y en este sentido, en tales circunstancias, la estimación de la porosidad a partir del registro sónico será la única posible mediante diagrfías. Además de esto, otra ventaja es que el material circundante a los receptores no afecta significativamente a la respuesta de la sonda, de forma que la estimación de la porosidad en los niveles de interés es más precisa.

Para un mayor rigor en los resultados, el estudio de porosidad a partir de diagrfías realizado en esta tesis se complementó con otras medidas de porosidad a diferentes escalas, tales como en laboratorio o el estudio al microscopio. Esto permite relacionar volúmenes de investigación de roca distintos, y poder establecer diferencias entre ellos.

La porosidad es una propiedad tridimensional, y como tal, su estimación al microscopio mediante lámina delgada (medida bidimensional) puede generar algunas incertidumbres en las valoraciones finales. No obstante, es un método cuantitativo eficaz a la hora de hacer una valoración directa de la porosidad total, así como de dimensionar su influencia (proporcionalmente a la lámina) y de establecer las relaciones con los demás componentes petrográficos. Su estimación depende de numerosos factores: tamaño de grano, forma, cantidad de cemento o matriz, etc. (Pettijohn, 1975). En general, la porosidad decrece a medida que aumenta la esfericidad del grano, debido a un mayor empaquetamiento (Fraser, 1935; Beard & Weyl, 1973). La porosidad estimada al microscopio va a estar influenciada, además de

por la existencia de microporosidad, que puede llegar a ser elevada y repercutir en la porosidad final, por los efectos tridimensionales producidos en las láminas por la existencia de laminaciones, la orientación de granos, etc. (Weber *et al.*, 1986).

Factores como la presencia de fracturas y brechas incrementan la porosidad, contrariamente a las arcillas que se encuentran rellenando esas fracturas, que harán disminuir dicho parámetro (Pitman, 1979), aunque su aportación sea típicamente baja (Nelson, 1985). La dolomitización, mediante la formación de inclusiones fluidas en los cristales también aumentará la porosidad (Martínez, 2009).

➤ Permeabilidad

Los métodos directos para estimar la permeabilidad en una formación geológica suelen ser costosos, de forma que se suelen utilizar técnicas geofísicas de sondeo, menos costosas, que miden determinadas propiedades geofísicas para relacionarlas posteriormente con parámetros de interés en la caracterización y evaluación petrofísica. De esta forma, para estimar la permeabilidad, algunas de las propiedades geofísicas más comúnmente estudiadas son la resistividad (Purvance & Andricevic, 2000; Jiang *et al.*, 2013) o la velocidad y atenuación sísmica (Rubin *et al.*, 1992; Fabricius *et al.*, 2007; Mari & Guillemot, 2012).

Mediante la comparación de las diferentes curvas de resistividad y su separación, se puede obtener una valoración cualitativa de la permeabilidad (Serra, O. & L. 2004). Las rocas compactas e impermeables (p.e. formaciones calcáreas densas, anhidrita, sal) son altamente resistivas debido al bajo contenido de agua intersticial, mientras que las rocas porosas permeables (p.e. arenas) presentan una amplia variación de resistividades dependiendo del fluido que contengan; si el fluido es salino, las rocas pueden ser muy conductoras, y las formaciones permeables se podrán identificar por la invasión de los fluidos de perforación (Serra, 2008). No obstante, la separación de diagráfos eléctricos en secciones permeables del sondeo puede estar limitada por numerosos factores, como el tamaño del sondeo, la resistividad del lodo, la heterogeneidad de la formación geológica, la presencia de fracturas, etc., que harán que la respuesta de los registros pueda ser interpretada de muchas maneras (Archie, 1942), y no necesariamente como permeabilidad.

Las fracturas (que esta tesis han sido identificadas mediante las imágenes acústicas y las observaciones a visu) son planos de debilidad asociados con diferencias importantes de esfuerzos que a menudo son causados por la deformación de la roca (Schultz & Fossen, 2008). Estos planos son zonas hidráulicamente activas que, dependiendo de la abertura y de la conectividad, suelen mostrar potencial de transmisión de flujo (Bauer *et al.*, 2015). Si las

fracturas están cementadas por arcilla, la permeabilidad por fracturas puede verse reducida. El efecto de la presión de poro y el estrés son otros factores que también influirán en la permeabilidad por fracturación, reduciéndola (Walsh, 1981; Palmer & Mansoori, 1996).

En esta tesis se han identificado fracturas con diferente abertura, tomándose como las más significativas para una potencial conducción de flujo, las que superan 1 mm de abertura. Desde una amplia perspectiva, las estimaciones de la frecuencia de discontinuidades, proporcionan una representación intuitiva del potencial de transmisividad de fluido de una roca (Chuo *et al.*, 2014).

Al combinar estas observaciones de registros con los datos de conductividad hidráulica o permeabilidad obtenidos a una escala similar, es decir a partir de los test de bombeo (permeabilidad Lugeon), se ha conseguido información más precisa de la transmisividad en la formación geológica estudiada como almacén potencial de CO₂. La permeabilidad es un parámetro más sensible a la profundidad que la porosidad (Wang *et al.*, 2009), de forma que es importante poder establecer valores de permeabilidad in situ, y por ello, la importancia de este tipo de test.

Por otra parte, el análisis de la atenuación de energía acústica tanto en las formaciones carbonatadas como en las areniscas se ha utilizado como un indicador de zonas permeables, a través de la estimación de un índice sísmico denominado factor Ik-Seis (Mari & Guillemot, 2012). En la Figura 8.1, se observa un ejemplo de la detección de la primera y segunda llegada a los receptores segundo (RX2A-1A) y tercero (RX3A-1A) de la sonda sónica, y la posterior obtención de los parámetros acústicos de atenuación (*Att*), *Shape Index* (*Ic*) y amplitud (*A*). Las distorsiones en el parámetro *Ic* (estimado entre dos ondículas a cada profundidad) pueden indicar la propagación de las ondas a través de una zona porosa y permeable.

El parámetro acústico *Ic* o Índice de Forma (*Shape Index*) se ha comparado con el factor Ik-Seis, y se ha obtenido una elevada coherencia en general en todas las formaciones donde se pudo aplicar la metodología, sobre todo en las areniscas del sondeo SE-3, y los carbonatos del sondeo SB-4. Los parámetros sísmicos (*Vp* y *Vs*) observados en SE-3 son los que presentan una mayor homogeneidad si se comparan con los mostrados en SE-4 y SB-4 (en SE-4 sólo *Vp*). En todos los casos, las zonas arcillosas y menos permeables, muestran un *Ic* próximo a cero, que corresponde a su vez con un valor muy bajo de Ik-Seis, es decir, coherente.

Si se comparan los resultados de permeabilidad Lugeon con el perfil de Ik-Seis, ambos resultados son muy coherentes en la Fm. Las Ventanas del sondeo SB-4. En los otros dos sondeos donde se dispone de ambos datos (SE-3 y SE-4) la coherencia es menos evidente.

Por otra parte, si se comparan los resultados de Ik-Seis con la fracturación identificada en los sondeos, en general existe coherencia entre ambos, salvo en aquellas zonas donde debido a que se trata de fracturas cementadas, y por tanto sin conectividad que se traduzca en permeabilidad, el parámetro Ik-Seis no muestra correspondencia con las discontinuidades (p.e. tramo 72 – 76 m en SE-4), hecho que demuestra la elevada coherencia en su aplicabilidad como indicativo de permeabilidad.

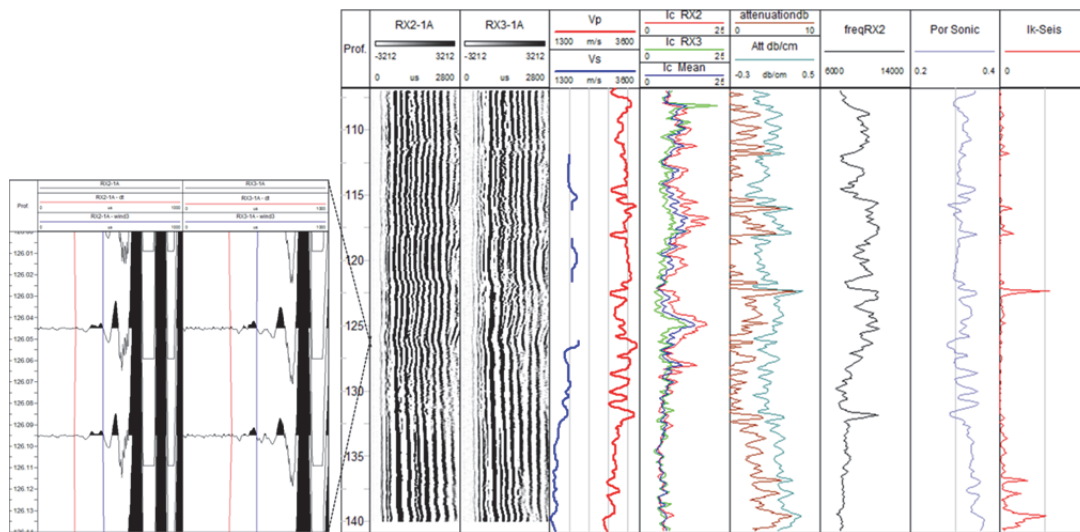


Figura 8. 1. Identificación de la llegada de la primera y segunda señal en los receptores 2 y 3 (RX2-1A y RX3-1A respectivamente), y registros, de izquierda a derecha: señal sísmica en el receptor 2 (RX2-1A) y receptor 3 (RX3-1A), velocidad de ondas P (Vp) y ondas S (Vs), Índice de Forma (Ic) en cada uno de los receptores (Ic RX2, Ic RX3), Atenuación en decibelios y en decibelios/cm, frecuencia sobre el receptor 2 (freqRX2), porosidad sísmica y finalmente, factor Ik-Seis.

Los resultados de conductividad hidráulica obtenidos a una escala menor a partir del equipo de célula triaxial en laboratorio, arrojan resultados en general más pequeños que los obtenidos mediante Lugeon. Esta diferencia puede deberse a la distinta naturaleza de ambos ensayos: mientras Lugeon tiene en cuenta la permeabilidad por fracturas, el ensayo triaxial, estima la permeabilidad por conductividad a través de la formación bajo unas condiciones de presión controlada creadas en el laboratorio. Conviene por tanto, tener en cuenta los diferentes contextos de ambos resultados, y comparar los registros y ensayos que sean apropiados en cada caso.

8.2 Depósitos carbonatados (SE-4 y SB-4)

El modelo global para la formación reservorio del sondeo SE-4, la facies Muschelkalk inferior (Triásico), es el de una rampa de carbonatos tipo *rampa homoclinal* (Read, 1985). Las calizas y dolomías microcristalinas interpretadas presentan una frecuente dolomitización, de carácter irregular, de forma que el contenido faunístico es escaso. Estos materiales marcan la transgresión del Muschelkalk, y un ambiente de aguas someras de poca profundidad y poca energía relacionadas posiblemente con amplias plataformas de escasa pendiente. Su formación confinante, la facies M2, de carácter detrítico-evaporítico (con gran cantidad de yesos), estaría marcando un cambio brusco de facies por medio de una regresión, habiéndose depositado en un medio de régimen lagunar (MAGNA nº 445, IGME). Este conjunto de materiales, a priori, podría corresponder a facies de plataforma restringida a plataforma evaporítica (Wilson, 1975), donde el tipo de porosidad presente predominante (microporosidad intercrystalina), suele conferirle flujo y cierta capacidad como almacén (Ling *et al.*, 2014).

Por otro lado, las calizas bioclásticas miocenas pertenecientes a la Formación Las Ventanas, interpretadas en el sondeo SB-4, por la elevada cantidad y tipos de especies fósiles que presentan (oolitos, braquiópodos, algas, etc.), se habrían depositado en un medio de plataforma. Su formación confinante estaría constituida por un paquete de margas típico de un medio fluvial. Este conjunto correspondería a facies de plataforma abierta (Wilson, 1975). A causa de las numerosas diferencias en el tipo y tamaño de grano observadas en este tipo de materiales depositados en este medio, las formaciones almacén pueden variar mucho en su capacidad de almacenaje y permeabilidad (Ding *et al.*, 2012).

La litología interpretada en las formaciones par sello-almacén de los sondeos someros SE-4 y SB-4 difiere poco de la litología interpretada en los sondeos profundos Reus-1 y Benejúzar-1 respectivamente. En cambio, la litología interpretada de una zona con respecto a la otra, difiere significativamente en cuanto a composición; mientras que en el caso de los sondeos catalanes SB-4 y Reus-1 se han interpretado calizas y dolomías cristalinas, en los carbonatos de los sondeos de la Cuenca del Bajo Segura SB-4 y Benejúzar-1, se han interpretado carbonatos arenosos y margosos bioclásticos, lo que implicará numerosas diferencias, entre ellas las texturales y por extensión, las petrofísicas.

En el primer caso, si se comparan las litologías de la zona confinante en ambos sondeos, lutitas y arcillas, lo único a resaltar es el mayor valor de Vp en el caso del sondeo Reus-1 (3000 – 3500 m/s) con respecto a SE-4 (1900 – 2900 m/s). En el caso de SE-4 y Reus-1, al tratarse de materiales arcillosos y con un elevado contenido en yeso en el sondeo somero, al producirse un incremento de la profundidad y el consiguiente incremento de presión (sondeo

Reus-1), se produciría la pérdida de agua por parte del material yesífero, lo que provocaría un material más compacto, y por tanto, con una transmisión de ondas sónicas más elevada. Este incremento y diferencia de velocidad de ondas P no se da entre los sondeos SB-4 y Benejúzar-1; la naturaleza margosa de la formación confinante en ambos casos, no generará una pérdida de volumen en el material con el aumento de profundidad.

En cuanto a las formaciones geológicas reservorio, lo más destacado es el enorme incremento de V_p que se produce en la facies M1 interpretada en el sondeo Reus-1 (4800 -6000 m/s) con respecto a las lecturas en el sondeo SE-4 (2000 – 3500 m/s). Este incremento viene marcado por diferencias texturales muy posiblemente; al incrementarse la profundidad, la presión ha ejercido influencia en la textura, compactándola, además de la dolomitización que ya podría ser total (lo que genera un mayor empaquetamiento estructural).

En cuanto a la porosidad de las formaciones reservorio, la velocidad sónica está relacionada con la resistencia mecánica a la compresión (Guerrero *et al.*, 1989), y ésta a su vez, es inversamente proporcional a la porosidad. Consecuentemente, la porosidad será mayor en estas zonas de baja resistencia mecánica. Las velocidades sónicas estimadas para las Calizas de Algas en SB-4, y para la facies M1 en SE-4 son bajas en general (2700 – 3600 m/s y 2350 – 2950 m/s respectivamente), y por tanto presentarán valores elevados de porosidad sónica.

En el sondeo SE-4, en el tramo dolomítico, se produce un incremento de la V_p con respecto al tramo superior de las calizas dolomíticas y calizas micríticas (con el consiguiente descenso de la porosidad sónica). Esto es debido a que la estructura cristalina de la dolomía posee un mayor empaquetamiento que la de la caliza, pero también podría deberse a una menor presencia de oquedades a partir de los 96 m de profundidad aproximadamente, lo que produce ese incremento en la velocidad de ondas P. De lo dicho anteriormente, se deduce que no existe una resistencia mecánica muy elevada en ambas formaciones carbonatadas, siendo esto más patente en los materiales del SE-4, consecuencia muy posiblemente, de la existencia de numerosas superficies estilolíticas y de la presencia de abundantes oquedades. Si se compara el valor de la porosidad en M1 estimada en laboratorio en el sondeo SE-4 (7.7 %) con respecto a los valores de porosidad por densidad (por ser los más parecidos a los totales en ambos casos) en M1 del sondeo Reus-1 (6 – 15 %), se ha podido comprobar que son similares, aunque un poco superiores en este último sondeo. No se ha producido por tanto, un cambio de porosidad notable entre ambos sondeos.

En cuanto a la relación de la porosidad y las características texturales, cabe destacar que las calizas micríticas, calizas dolomíticas y dolomicritas interpretadas en la facies M1 del sondeo SE-4, presentan un sistema poroso dual: un medio con porosidad primaria o matricial, y sobre todo, un medio poroso con porosidad secundaria (fisuras, fracturas, oquedades, etc.). Las

calizas han sufrido procesos de dolomitización y la porosidad primaria se ha visto reducida, generándose porosidad secundaria significativa, distribuida de forma irregular, y constituida por fisuras y oquedades (*vugs*) principalmente, donde predomina la textura de tipo microcristalina a cristalina (micrítica). Esta dolomitización está producida por procesos diagenéticos tempranos o iniciales, como así lo demuestra petrográficamente la micritización, y en ocasiones suele mejorar la calidad del reservorio, mediante el incremento del tamaño de poro y partícula, y por tanto de la porosidad. La generación de porosidad durante la dolomitización se explica desde el punto de vista de la disolución de constituyentes de composición subsaturada respecto a la dolomita, prevalecientes con anterioridad al proceso de dolomitización (Martínez, 2009).

Las oquedades, por su parte, pueden suponer una elevada porosidad de tipo secundario, y si existe conectividad entre ellas, al igual que en el caso de las fracturas, pueden generar permeabilidad, pero poco significativa. En los reservorios de dolomías suele ser habitual que ambas, fracturas y oquedades, estén bien desarrolladas, y su contribución a la permeabilidad es muy significativa (Ling *et al.*, 2014). En el caso de SE-4, aparentemente, las oquedades no están conectadas entre sí, por lo que a priori, no generarán permeabilidad significativa.

Con respecto a la porosidad observada al microscopio en las calizas bioclásticas arenosas y margosas de la Formación Las Ventanas del sondeo SB-4, se encuentra distribuida de forma irregular, y es de tipo intergranular principalmente. La presencia de bioclastos también ha producido porosidad móldica, como se ha visto en las muestras estudiadas y en los testigos. La porosidad móldica se genera por disolución selectiva de los granos en distintas etapas de la diagénesis, y normalmente produce poros de tamaño grande (hasta 10 mm), que puede, aunque no siempre, generar rocas de elevada porosidad (Alonso, 2006). Los valores de porosidad en laboratorio observados en los carbonatos del sondeo SB-4 son en general elevados (superiores al 20 % predominantemente) frente a los observados en los del sondeo SE-4, y la diferencia es debida fundamentalmente a la diferencia textural mencionada previamente: los carbonatos del SB-4 son de textura granuda principalmente, en un medio constituido por poros y no por fisuras, consecuencia de una génesis diferente. Los medios porosos suelen presentar rangos mayores de porosidad que los medios fisurados, tal como se ha confirmado entre estos dos modelos de la tesis.

Si se comparan los valores de porosidad neutrón y densidad estimados en las calizas arenosas de la Fm. Pujálvarez del sondeo Benejúzar-1 (7 – 24%) con los estimados en lámina delgada y laboratorio en las calizas margosas y arenosas del sondeo SB-4, se podrá observar que son elevados en ambos casos y que muestran cierta similitud de valores. En este sentido, con respecto a la composición mineralógica y su influencia en la porosidad, las rocas que presentan material arcilloso en su composición, suelen presentar poca compactación, y en consecuencia

presentan un valor mayor de porosidad (Beard & Weyl, 1973). La Formación Las Ventanas en SB-4, que está constituida por una roca de composición intermedia entre una roca detrítica y una roca de precipitación química (caliza arenosa) y caliza margosa, encaja en esta tipología, y se justifican de este modo, los valores de porosidad más elevados con respecto a las formaciones geológicas de los demás sondeos.

Es evidente pues, que la calidad de los reservorios en las formaciones almacén de ambos sondeos, está condicionada fundamentalmente por las características texturales y por el medio poroso que los constituye. En el caso de la facies M1 en SE-4, la porosidad está condicionada por factores diagenéticos como la dolomitización, y la presencia notable de fisuras, fracturas y oquedades. La presencia de estilolitos, causados por fisuras con circulación de fluidos y disolución por presión, es otra causa de la baja calidad del reservorio, ya que su contribución a la porosidad no suele ser significativa, aunque incrementa la conectividad. Esta influencia sobre la permeabilidad depende de si los estilolitos están enriquecidos con minerales insolubles con capacidad de reducir el potencial de permeabilidad (Heap *et al.*, 2013), en cuyo caso serán un obstáculo para la migración de flujo.

En el caso de los carbonatos de la Formación Las Ventanas en SB-4, la calidad del reservorio está controlada por la composición arenosa de las rocas, marcada por una gran abundancia de bioclastos, y el tipo de porosidad intergranular y móldica predominantes. Este tipo de porosidad suele generar rocas de elevada porosidad habitualmente, como así se ha observado.

Si comparamos los valores de permeabilidad Lugeon (conductividad hidráulica) y de porosidad (mediante lámina delgada y laboratorio) estimados para los dos sondeos carbonatados estudiados, SE-4 y SB-4 (Figura 8.2), se puede observar que los valores de permeabilidad son más elevados en el sondeo SB-4 que en el sondeo SE-4, sucediendo lo mismo con la porosidad de forma general.

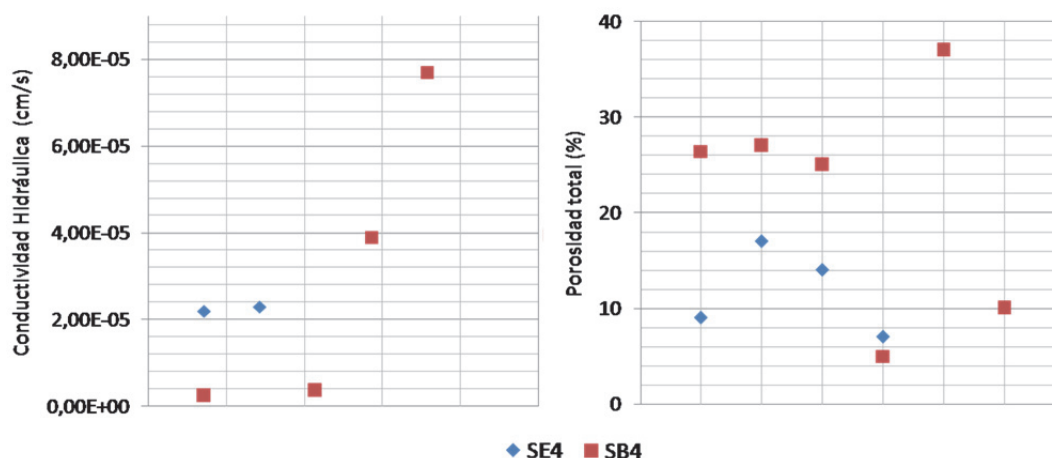


Figura 8. 2. Resultados de permeabilidad Lugeon (Conductividad hidráulica) y de porosidad total (lámina delgada y laboratorio) para las formaciones reservorio de los sondeos SE-4 y SB-4.

Las variaciones de los resultados obtenidos en ambos sondeos confirman lo difícil que resulta unificar relaciones de velocidad y porosidad en los carbonatos, debido a los numerosos factores que pueden influir en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas: características texturales de la roca, composición mineralógica, densidad de fracturación o porosidad (Mamillan, 1972). Debido a la inherente heterogeneidad de las formaciones carbonatadas, la estimación de la distribución de la porosidad resulta complicada, pudiendo producirse grandes cambios en una área pequeña (Helle *et al.*, 2001).

En los sondeos profundos de petróleo, se ha observado que la porosidad desciende considerablemente. Es de suponer que los demás parámetros petrofísicos experimentarán también un descenso, con motivo del incremento de profundidad y por tanto de presión.

La estimación de zonas permeables en las formaciones geológicas de interés, tanto a partir de ensayos de laboratorio, como ensayos Lugeon en campo o a partir del parámetro I_k -Seis, supone un aporte novedoso a los datos disponibles de estas formaciones carbonatadas (IGME, 2014), yendo más allá de las estimaciones de porosidad iniciales.

8.3 Depósitos clásticos (SE-3 y SB-1)

El medio deposicional influye en la diagénesis de las areniscas en muchos aspectos, como la composición o la textura, de forma que el nivel de energía afectará al tamaño de grano y producirán diferentes depósitos minerales (Stonecipher *et al.*, 1984). Las areniscas se suelen depositar en medios sedimentarios muy variados, desde continentales, aluviales, deltaicos a

litorales marginales, y por tanto, estarán afectadas por diversos agentes meteorizantes, determinando así las propiedades primarias de la arenisca (Morse, 1994).

Para poder entender la relación existente entre las propiedades de un reservorio de areniscas y la características deposicionales, se deben conocer sus características petrofísicas y sedimentológicas (Westphal *et al.*, 2004). Las areniscas reservorio pertenecientes a la Formación Arén en el sondeo SE-3 (Triásico superior) se han interpretado como areniscas de “foreshore” (playa) y parte alta del “shoreface” (plataforma litoral) (MAGNA nº 213, IGME). En la composición de estas areniscas, suele abundar principalmente el cuarzo y los fragmentos carbonatados (Capítulo 6), típicamente disgregados por una cierta energía en estos medios sedimentarios. Su formación confinante, las lutitas de la facies Garum, se corresponden a materiales de llanura deltaica superior (Eichenseer, 1988). En el sondeo SB-1, el tramo estudiado de facies Keuper arenosa (Triásico superior) es muy reducido, tratándose de una alternancia laminar de areniscas y arcillas arenosas y margosas. El ambiente sedimentario se interpreta como fluvial con corrientes de tipo “braided” (MAGNA nº 839, IGME). Su formación confinante, constituida por arcillas yesíferas y margosas del Keuper arcilloso, pertenece a un medio sedimentario correspondiente a una llanura de inundación que pasa distalmente a una llanura lutítica costera. Hacia techo, habría un cambio gradual hacia un ambiente de tipo “sabkha” donde se depositarían los yesos (MAGNA nº 839, IGME).

Desde un punto de vista litológico, la interpretación llevada a cabo en ambos sondeos someros y sus respectivos sondeos correlacionables en profundidad (Cajigar-1 y Monesma-1 para SE-3, y Salobral-1 y Carcelén-1 para SB-1), es coherente en todos los casos. Se ha interpretado una zona superior de arcilla, lutitas y margas en las formaciones confinantes de los sondeos de la zona prepirenaica, y en la zona confinante de los sondeos próximos a Albacete, arcillas yesíferas y arcillas margosas principalmente. A nivel de reservorio se han podido correlacionar las mismas formaciones en las dos zonas. Las Areniscas de Arén en SE-3 han podido ser bien correlacionadas en los sondeos profundos Cajigar-1 y Monesma-1.

Los sedimentos depositados en medios de alta energía (oleaje o corrientes fuertes) suelen estar peor clasificados o seleccionados que los sedimentos que han sido re TRABAJADOS (Tucker, 1981). Numerosos autores (Rogers & Head, 1961; Pryor, 1973; Beard & Weyl, 1973) estudiaron la relación de clasificación con la porosidad, y demostraron que la porosidad aumenta con el incremento del grado de selección. Las muestras en lámina delgada pertenecientes al sondeo SE-3 (litoral) se caracterizan por presentar, en general, una peor clasificación que la muestras del sondeo SB-1 (ambiente fluvial) (Figura 8.3), y relacionándolo con la porosidad estimada en estas dos formaciones, efectivamente los valores de porosidad son más elevados en las muestras del sondeo SB-1.

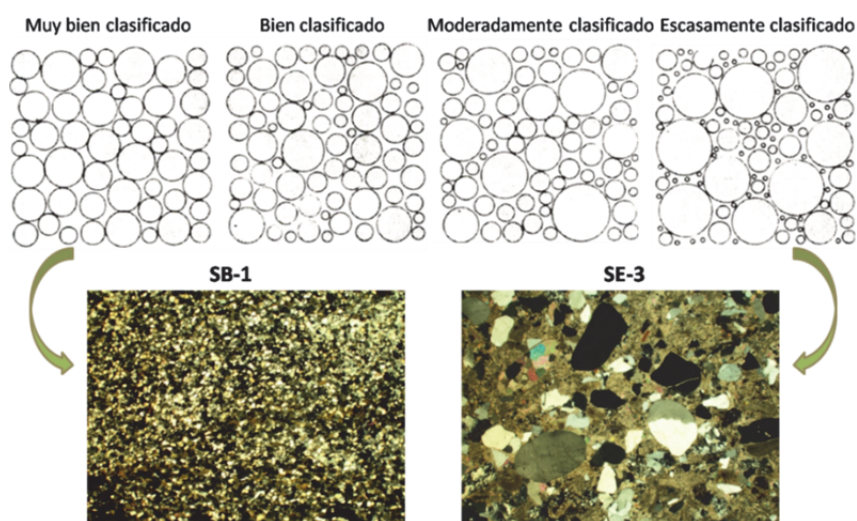


Figura 8. 3. Grado de selección de los sedimentos en lámina delgada en dos muestras pertenecientes a las areniscas de la facies Keuper arenoso del sondeo SB-1 y a las areniscas de la Fm. Arén del sondeo SE-3 (modificado de Pettijohn, 1975).

De igual modo, el incremento de la selección de grano también se correlaciona con un incremento de la permeabilidad (Beard & Weyl, 1973), y si comparamos los valores de permeabilidad Lugeon estimados en los tramos de areniscas de ambos sondeos, también se han obtenido valores ligeramente mayores en las areniscas pertenecientes a SB-1.

Las muestras analizadas en la facies Keuper arenoso del sondeo SB-1 son en su mayoría areniscas cuarzosas y limolitas, pero las analizadas en la Formación Areniscas de Arén del sondeo SE-3 son litarenitas, es decir, presentan un elevado porcentaje de fragmentos de roca. Los fragmentos de roca se comportan como materiales dúctiles, y por tanto presentarán una mayor predisposición a la deformación plástica con respecto a los elementos circundantes que suelen ser más rígidos. Este comportamiento puede conllevar por tanto, a una pérdida mayor de porosidad y permeabilidad.

Otro factor que puede influir en las propiedades petrofísicas de las areniscas es la profundidad. Durante el enterramiento de muchas areniscas, la distribución y evolución de las porosidades, tanto primaria como secundaria, varía con la profundidad, normalmente disminuyéndolas (Hayes, 1979; Blatt, 1979) (Figura 8.4). En este proceso de enterramiento suele haber una redistribución en el grado de empaquetamiento, aumentando la compacidad y el contacto intergranular, se produce la destrucción de la porosidad primaria y la creación de porosidad secundaria, y a una mayor profundidad, la porosidad secundaria también es destruida. La reordenación de los granos reduce el tamaño de los espacios de poro, expulsando gran parte del agua intersticial, es decir, se compacta. La porosidad de unas areniscas bien consolidadas

puede ser del 10 al 15%, y la de las lutitas o arcillas pueden tener una porosidad con contenido de agua de más del 40% (Schlumberger, 1987). Una vez que los granos han sido compactados mediante presión, los espacios que quedan entre las partículas no permiten la circulación fácil de las soluciones que contienen el material cementante, dificultando a menudo la permeabilidad.

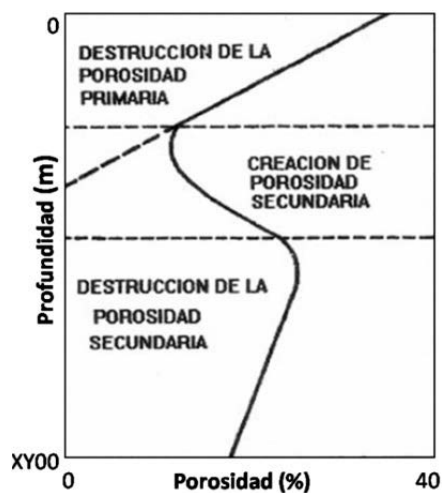


Figura 8. 4. Evolución de la porosidad con la profundidad (modificado de Hayes, 1979).

La porosidad descrita en las areniscas de ambos sondeos (SE-3 y SB-1), que ha sido principalmente de tipo intergranular, presenta valores muy variables, pero menores en el caso de las areniscas con cemento carbonatado esporádico del sondeo SE-3.

Se han comparado algunos de los datos obtenidos en esta tesis para la Fm. Areniscas de Arén y la serie lutítica del Garum con los estimados por el IGME (IGME, 2014) en las mismas formaciones identificadas en la Cuenca de Tremp-Graus a partir del sondeo Centenera-1, y la estructura de Olson, a partir del sondeo Surpirenaica-1 y algunos perfiles sísmicos (Figura 8.5).

La estructura de Olson forma parte del conjunto de estructuras del Eoceno medio-superior desarrolladas en el bloque superior del cabalgamiento de Gavarnie-Sierras Exteriores del dominio Surpirenaico Occidental. El espesor bruto de la Fm. Areniscas de Arén en ambos casos es el mismo, 38 – 39 m, y para el Garum, de 67 y 55 m respectivamente, lo que indica la baja calidad como formación sello en ambos casos. No así con el Garum identificado en los sondeos Monesma-1 y Cajigar-1, cuyos espesores superan los 100 m.

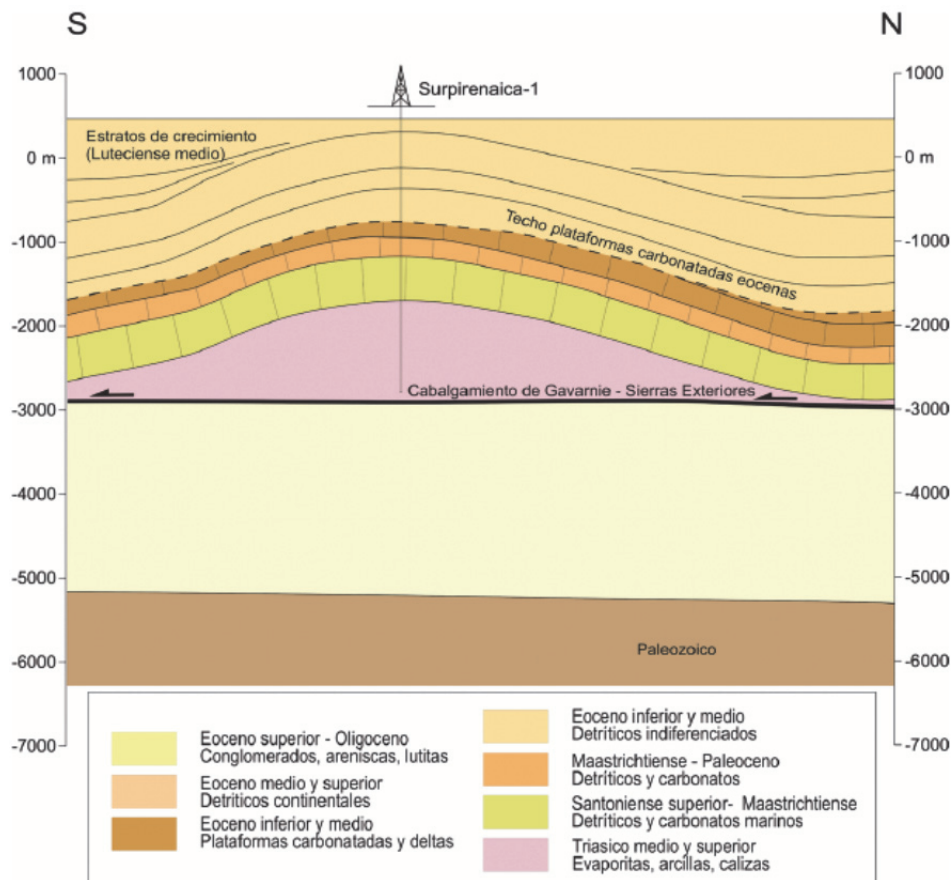


Figura 8. 5. Estructura anticlinal de Olson. Se indica la posición del sondeo Surpirenaica-1 (IGME, 2014).

En cuanto a la porosidad promedio (efectiva) estimada para la Fm. Areniscas de Arén en Olson, fue del 8,14 %, con variaciones según el informe, debido a la influencia de la presencia de carbonatos. La porosidad efectiva estimada en laboratorio para una muestra de la misma formación en el sondeo SE-3 de esta tesis, ha dado valores inferiores, en torno al 4 %; los valores estimados en lámina delgada, sí se aproximan más, con un valor promedio del 12 %.

A partir del sondeo Centenera-1, la porosidad estimada para las Areniscas de Arén fue muy baja, del 4,8 %, igual por tanto al estimado en SE-3 en laboratorio.

Las estimaciones de permeabilidad realizadas en la Fm. Areniscas de Arén, bien a partir de los ensayos Lugeon en el sondeo SE-3, los ensayos de laboratorio o los estimados a partir del parámetro Ik -Seis, constituyen una aportación novedosa a los datos petrofísicos ya existentes de dicho reservorio.

En el sondeo SB-1 existe presencia elevada de arcillas, bien de forma dispersa o laminar. La presencia de arcilla puede aumentar el tiempo de tránsito de la señal sónica significativamente, disminuyendo la velocidad de llegada de la onda, y finalmente aumentando la porosidad.

Muchas areniscas contienen arcilla o lutita en su composición, lo que reduce la porosidad efectiva, contribuyendo a no tener la suficiente permeabilidad como para constituir un reservorio (a menos que estén fracturadas). Los valores estimados de porosidad a partir de lámina delgada para las muestras de arenisca del Keuper arenoso son muy variables (4 – 22 %), con un valor promedio de aproximadamente el 13 %. Los valores se han comparado con los estimados por el IGME en el informe incluido en el Atlas de Estructuras del Subsuelo Susceptibles de Almacenamiento Geológico de CO₂ en España (IGME, 2014) para la Fm. Areniscas de Manuel, localizada en el área de la Plataforma Tabular de La Mancha, y que muestran valores de porosidad (efectiva) promedio del 15 %. Este valor es muy similar al estimado en esta tesis.

La presencia de arcillas en las areniscas influye también en la permeabilidad, de forma que a partir de ciertas condiciones de presión y frecuencia, cuanto mayor es el contenido de arcillas, mayor será la atenuación de la señal sónica recibida, más baja la velocidad de las ondas compresivas, y finalmente existirá una menor permeabilidad (Klimentos & McCann, 1990).

Se ha observado un comportamiento contrario al habitual en la curva GR y de resistividad en la zona sello y almacén del sondeo SB-1: lecturas anormalmente bajas de resistividad y elevadas de GR en la facies arenosa y areniscas del Keuper, y lecturas bajas de GR en la facies arcillosa del Keuper. Esto se atribuye a la elevada presencia de arcillas en las arenas del almacén (confirmado por los análisis de DRX), lo que suele ser una de las causas de los bajos valores de resistividad (Moore, 1993), y su grado de influencia dependerá de su volumen y distribución, y de la tipología presente. Por otra parte, la presencia de arenas de grano fino, micas, la existencia de laminación y los efectos diagenéticos también pueden generar respuestas bajas de resistividad en areniscas y arenas arcillosas (Gandhi *et al.*, 2011), lo que justificaría las bajas respuestas de GR en la facies arcillosa (sello) del Keuper estudiada en SB-1.

9. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

9.1 Conclusiones

El objetivo principal de esta Tesis era abordar diversos aspectos básicos del almacenamiento geológico de CO₂ en la Península Ibérica, mediante el estudio litológico y petrofísico detallado de determinadas formaciones geológicas consideradas pares almacén-sello en varias de sus cuencas sedimentarias. La aportación más novedosa consiste en la aplicación integrada de técnicas modernas de testificación geofísica en sondeos someros *slim-hole* menos costosos (<200m), correlación con diagráfias de petróleo en sondeos profundos, ensayos de laboratorio y campo, y análisis de muestras de mano.

La metodología desarrollada se presenta como una opción eficiente y económicamente asequible en el estudio geológico y petrofísico del subsuelo. Dicha metodología, aplicada en esta tesis a rocas detríticas y carbonatadas, es aplicable a cualquier otro tipo de roca, independientemente de su naturaleza composicional, localización, o profundidad, siempre que el equipo de testificación sea capaz de alcanzar la profundidad requerida. De esta forma, a mayor profundidad, se incrementará la complejidad del estudio.

Las observaciones de los testigos pertenecientes a los sondeos someros, y los ensayos de laboratorio y al microscopio, han permitido complementar con éxito, las interpretaciones llevadas a cabo sobre diagráfias. De igual forma, también se han obtenido resultados satisfactorios en los ensayos de campo. En los sondeos profundos y antiguos de petróleo, al no disponer de testigos, la información procedente de los informes técnicos de su perforación ha jugado un papel decisivo en muchas de las interpretaciones litológicas llevadas a cabo. Solo en el sondeo profundo Reus-1 se ha dispuesto de ripios a la profundidad estudiada, para poder realizar análisis de DRX.

El estudio de las rocas detríticas y carbonatadas en las áreas en las que se ha desarrollado la tesis, ha pasado por la testificación de un total de 6 sondeos someros y el análisis detallado de 4 de ellos, además de la integración posterior a dicho estudio de información procedente de sondeos profundos de petróleo próximos a ellos. Mediante el uso de diagráfias, sobre todo el registro de Radioactividad Gamma Natural, se han establecido correlaciones estratigráficas y/o cronoestratigráficas, entre las formaciones geológicas análogas de sondeos próximos y/o

pertenecientes a una misma cuenca sedimentaria. Estas correlaciones han permitido estudiar de una forma más cómoda y con mayor información (en superficie) una determinada formación geológica que se encuentra a mayor profundidad y de la que no se dispone de mucha información.

En todos los sondeos se ha diferenciado el par sello-almacén, y de acuerdo con los objetivos iniciales, se ha realizado una interpretación litológica en detalle, así como la estimación de sus propiedades petrofísicas más importantes para el estudio de almacenamiento geológico de CO₂. Ambas, interpretación litológica y estimación de parámetros petrofísicos como porosidad y permeabilidad, han sido mejoradas con respecto a los datos disponibles previamente.

Los resultados de laboratorio, de campo y de microscopio han validado el carácter heterogéneo de las distintas formaciones geológicas y facies estudiadas en los sondeos someros. También han permitido ver la variabilidad, en ocasiones limitada y en ocasiones más importante, de la misma facies a cientos o miles de metros de profundidad.

El uso del parámetro Ik-Seis como indicador de permeabilidad ha mostrado ser efectivo en todos los casos donde ha sido aplicado. Lo mismo ha sucedido con la imagen acústica de la pared del sondeo en la detección eficaz de fracturas abiertas y selladas. Los ensayos Lugeon, el perfil del registro sísmico o los resultados de permeabilidad hidráulica en laboratorio han complementado la valiosa información necesaria para establecer zonas con cierta permeabilidad.

La idoneidad del par sello-almacén ha sido valorada en todos los casos según el criterio de Chadwick *et al.*, (2008). En las formaciones sello la valoración resultante ha sido positiva en la gran mayoría de los casos, tanto en la continuidad lateral como en el espesor. En las formaciones reservorio se ha interpretado también una buena continuidad lateral en todos los casos, a excepción del Keuper arenoso en el sondeo SB-1 donde se han identificado cambios laterales de facies, pero en cambio solo se han identificado espesores óptimos en las formaciones carbonatadas (SE-4 y SB-4). En cuanto a parámetros petrofísicos, las formaciones reservorio no presentan los resultados esperados (IGME, 2014), observándose valores de permeabilidad muy bajos en general (cuestionables), a excepción del sondeo SB-4 donde se observan los valores más elevados. En cuanto a la porosidad, los valores estimados son muy variables dependiendo de la formación estudiada. De este modo, también las formaciones carbonatadas son las que presentan valores más elevados, pero que fluctúan entre 2 y más del 20 %.

Se pone por tanto de manifiesto, que el estudio a nivel local de una formación geológica es esencial para establecer una buena base en el conocimiento de formaciones confinantes y reservorios de CO₂. La relación geología-parámetros petrofísicos no es de carácter invariablemente uniforme, sino que sufre la dependencia de su historia geológica, desde su génesis y evolución hasta los episodios de transformación como resultado de los procesos de diagénesis. Dentro de este conjunto de factores, la metodología aquí presentada constituye un primer paso para una evaluación más profunda y precisa de un posible sello-almacén de CO₂, dentro del contexto amplio que puede suponer una cuenca sedimentaria. Para la consecución de ese objetivo, se precisa profundizar no solo en algunas de las técnicas utilizadas en esta tesis, sino en el uso de nuevas metodologías e instrumentos que puedan generar respuestas más detalladas de las formaciones de interés, tanto a nivel local como regional.

9.2 Líneas futuras

De acuerdo con el trabajo desarrollado y a las conclusiones presentadas, se hacen necesarios ciertos cambios o mejoras en una línea futura de investigación.

La mejora instrumental es una opción muy importante a tener en cuenta en posibles trabajos de este tipo. El uso de sondas no convencionales puede aportar información geológica y petrofísica más precisa. Una técnica muy eficaz, aunque costosa, es la sonda de resonancia magnética nuclear, ya que pueden solucionar el problema de la estimación de parámetros petrofísicos a menudo críticos como la permeabilidad o la porosidad efectiva y total.

La aplicación complementaria de otras técnicas es una alternativa más que necesaria para reducir la incertidumbre del resultado obtenido. Entre dichas técnicas se incluyen análisis especiales de testigos, como los ensayos de calcimetría para una estimación cuantitativa precisa de la composición carbonatada, estudios de porosimetría de mercurio importantes para estimar con precisión la porosidad de una determinada muestra, o el análisis de muestras al microscopio electrónico para poder realizar un estudio en profundidad de la porosidad mediante el estudio de la conectividad de poros (microporosidad).

Las interpretaciones realizadas a partir de los registros geofísicos deberían poder ser comparadas con los resultados obtenidos a partir de ensayos sobre un número significativo de muestras. La toma de muestras se ha de realizar de acuerdo a los objetivos iniciales de la investigación. Siguiendo en esta misma línea, es importante que tanto la toma de muestras como muchos de los análisis realizados a lo largo de una formación geológica para su

caracterización petrofísica, sean decididos una vez que se ha realizado una primera interpretación y análisis de las diagrfías. Por ejemplo, los ensayos de permeabilidad Lugeon se deberían tener en cuenta posteriormente a haber analizado los tramos permeables mediante el análisis de las ondas sónicas.

El conocimiento no solo de las técnicas de estudio empleadas, sino del campo de trabajo, es fundamental como ahorro de tiempo, de recursos y de energía. Ampliar la zona de estudio puede ser un recurso aconsejable cuando se trata de estudiar las formaciones geológicas que se cortan en un sondeo. Un previo conocimiento de la geología, sedimentología y una buena caracterización estructural de la cuenca sedimentaria donde se va a perforar un sondeo es fundamental para que el trabajo de investigación no resulte un fracaso. En este sentido se han de valorar otros estudios geofísicos a mayor escala como estudios sísmicos y magnetotelúricos.

Igual de importantes son los factores intrínsecos y extrínsecos a la testificación geofísica, puesto que influirán en la calidad de los registros, así como un buen control de las labores de testificación, incluyendo zonas de repetición de registros en los niveles de interés.

La combinación de los diferentes resultados obtenidos conforma una buena base de datos para una formación geológica almacén/sello dentro de la cuenca objeto de estudio, pudiendo constituir una referencia para la misma formación geológica en otros puntos de interés.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, J.A.S. & Weaver, C.E. (1958). Thorium, uranium and zirconium concentrations in bauxite. *Econ. Geol.*, 55, 1653 – 1675.
- Adams, A.E., MacKenzie, W.S. & Guilford, C. (1997). Atlas de rocas sedimentarias. Ed. Masson S.A., 106 p.
- Alcalde, J., Marzán, I., Saura, E., Martí, D., Ayarza, P., Juhlin, C., Pérez-Estaún, A. & Carbonell, R. (2014). 3D geological characterization of the Hontomín CO₂ storage site, Spain: multidisciplinary approach from seismic, well-logging and regional data. *Tectonophysics*.
- Alfaro, P. (1995). Neotectónica en la Cuenca del Bajo Segura (Cordillera Bética Oriental). Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 217 p.
- Alonso, F. J., Esbert, R. M. & Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Boletín geológico y minero*, T. XCVIII-II, 226 - 237.
- Alonso, F. J. (2006). Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica). Universidad de Oviedo.
- Alzate, G., Branch, J., Suárez, O. & Vega, C. (2006). Correlación de registros entre pozos con redes neuronales artificiales utilizando múltiples curvas o variables Registradas. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Anadón, P., Cabrera, L., Guimerà, J. & Santanach, P. (1985a). Paleogene strike-slip deformation and sedimentation along the southeastern margin of the Ebro Basin. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral.*, 37, 303 - 318.
- Arche, A., López-Gómez, J. & García-Hidalgo, J.F. (2002). *Journal of Iberian Geology*, 28, 13 – 30.

-
- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. of AIME* 146 (1): 54 - 62.
 - Archie, G. E. (1952). Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *American Association of Petroleum Geologists (AAPG). Bull.*, Vol. 36, No. 6, 1952, 278 - 298.
 - Ardèvol, L., Klimowitz, J., Malagón, J. & Nagtegaal, P.J.C. (2000). Depositional sequence response to foreland deformation in the Upper Cretaceous of the southern Pyrenees, Spain. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 84, 566 – 587.
 - Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 5*, vol. 41, 237 - 276.
 - Asoodeh, M. & Bagheripour, P. (2013). Core porosity estimation through different training approaches for neural network: back-propagation learning vs. genetic algorithm. *Int. J. Comput. App* 63 (5), 11 - 15.
 - Asquith, G. & Gibson W. (1982). *Interpretation of Well logs*. AAPG, Tulsa, Oklahoma, USA. 213 p.
 - Asquith, G.B. & Krygowsky, D. (2004). *Basic well log analysis*. 2nd ed. American Association of Petroleum Geologists. Tulsa. Oklahoma.
 - Azema, J., Foucault, A. & Fourcade, E. (1979). *Las microfacies del Jurásico y Cretácico de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas*. Universidad de Granada.
 - Bachu, S. (2000). Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management* 41, 953 - 970.
 - Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Christensen, N.P., Holloway, S. & Mathiassen, O.M. (2007). Estimation of CO₂ Storage capacity in geological media, Phase2. Carbon sequestration leadership Forum, Technical Group, Task Force on CO₂ Storage Capacity Estimation, Phase II, Final Report, 42.
 - Barton, C. A., Zoback, M. D. & Moos, D. (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23, 8, 683 - 686.

- Barton, C.A. & Zoback, M. (2000). Discrimination of natural fractures from Drilling-Induced wellbore failures in wellbore image data – Implications for reservoir permeability. Society of Petroleum Engineers. 2000 SPE International Petroleum Conference and Exhibition en Mexico, 1- 3 Febrero.
- Bauer, J.F., Meier, S. & Philipp, S.L. (2015). Architecture, fracture system, mechanical properties and permeability structure of a fault zone in Lower Triassic sandstone, Upper Rhine Graben. *Tectonophysics*, vol. 647 – 648, 19 April 2015, 132 – 145.
- Beard, D. C. & Weyl, P. K. (1973). Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *AAPG Bulletin*, vol. 57, 349 – 369.
- Benson, S. & Cook, P. (2005). Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Chapter 5, Underground Geological Storage.
- Besems, R.E. (1981a). Aspects of Middle and Late Triassic Palynology. Palynostratigraphical data from the Chiclana de Segura Formation of the Linares-Alcaraz region (SE Spain) and correlation with palynological assemblages from the Iberian Peninsula. *Rev. Paleobot. Palynol.*, 32, 257 – 273.
- Blatt, H. (1979). Diagenetic processes in sandstones. En: P.A. Scholle y P.R. Schluger (Eds.). *Aspects of Diagenesis*, S.E.P.M. Spec. Publ. nº 26, 141 – 157.
- Bliss, J. & Rushton, K. (1984). The reliability of packer tests for estimating the hydraulic conductivity of aquifers. *Q. J. Eng. Geol.*, 17, 81 - 91.
- Bourbie, T., Coussy, O. & Zinszner, B. (1987). *Acoustics of porous media*: Gulf Publishing, Houston, 334 p.
- Burst, J.F. (1969). Diagenesis of Gulf coast clayey sediments and its possible relation to petroleum migration. *Bull. Am. Assoc. Petro. Geol.* 53 (1), 73 - 93.
- Calvet, F. & Ramón, X. (1987). Estratigrafía, sedimentología y diagénesis del Muschelkalk inferior de los Catalánides. *Cuad. Geol. Iber.*, vol.11, 141 - 169.

- Cámara, P. & Klimovitz, J. (1985). Interpretación geodinámica de la vertiente centro-occidental surpirenaica (Cuencas de Jaca-Tremp). *Rev. Estudios Geológicos CSIC*, 41 (5 – 6), 391 - 404.
- Cassan, M. (1982). Los ensayos “*in Situ*” en la mecánica del suelo – Tomo I. Su ejecución e Interpretación. Editores técnicos asociados, S.A., Barcelona, España.
- Castellort, F.X. (1986). Estratigrafía del Muschelkalk mitjà dels Catalànids I sedimentología de les seves unitats detrítiques, Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona, 376 p.
- Castro Dorado, A. (1989). Petrografía básica: textura, clasificación y nomenclatura de rocas. Ed. Paraninfo, Madrid, 143 p.
- CGS (1976). Informe geológico sondeo Cajigar-1.
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P. (2008). Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE Projects. British Geological Survey, 273 p.
- Choquette, P. W. & Pray, L. C. (1970). “Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates.” *Am. Assoc. Petrol. Geol. (AAPG) Bull.*, Vol. 54, 1970, 207 - 250.
- Chuo, P., Hsu, S., Chen, P., Lin, J. & Lo, H. (2014). Fractured-bedrock aquifer studies based on a descriptive statistics of well-logging data: a case study from the Dajia River Basin, Taiwan. *Acta Geophysica*, vol. 62, nº 3, June 2014, 564 – 584.
- Clark, N. J. (1969). Elements of petroleum reservoirs. Society of Petroleum Engineers, Dallas, 250 p.
- Comas, M.C. & García Dueñas, V. (1988): Evolución de un segmento del Paleomargen Sudibérico: Zona Subbética. Introducción y Guía de Campo (Excursión B-3). II Congreso Geológico de España. Granada.
- Corbí, H. (2010). Los foraminíferos de la Cuenca Neógena del Bajo Segura (SE de España): Bioestratigrafía y cambio paleoambientales en relación con la crisis de salinidad del Mediterráneo. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 280 p.

- Cuevas, J.L. (1992). Estratigrafía del “Garumniense” de la Conca de Tremp, Prepirineo de Lérida. *Acta Geológica Hisp.*, 27, 95 – 108.
- Danielsen, B.E. & Dahlin, T. (2006). Geophysical and hydraulic properties in rock. Conference processing, 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 4 – 6, Helsinki.
- Danielsen, B.E. & Dahlin, T. (2009). Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsas Tunnel, Sweden. *Eng. Geol.*, 107, 118 – 129.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris. 647 p.
- Davis, J.C. (2002). *Statistics and data analysis in geology*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, N.Y. 638 p.
- Davies, S.J. & Elliot, T. (1996). Spectral gamma-ray characterization of high-resolution sequence stratigraphy: examples from Upper Carboniferous fluvio-deltaic systems, Co. Clare, Ireland. En: *High Resolution Sequence Stratigraphy: Innovations and Applications*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 104, 25 – 35.
- DeGolyer & McNaughton, S.L. (1960). Informe geológico sondeo Monesma-1.
- Ding, X., Chen J. & Tan X. (2012). Structural characteristics of intra-platform shoal in the Leikoupo Formation (T2) in the transitional zone of the central and southern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(4), 444 - 451.
- Dresser Atlas (1979). *Log interpretation charts*. Dresser Atlas Division. Dresser Industries, Huston, TX.
- Dunham, R.J. (1962). Classification of Carbonate rocks according to depositional texture, W. E. Ham, Ed., *Classification of carbonate rocks*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 108–121.
- Eichenseer, H. (1988). *Facies geology of late Maastrichtian to early Eocene coastal and shallow marine sediments*. Tesis Doctoral. Universidad de Tübingen, 273 p.

- Ellis, D. & Singer, J. (2008). Well logging for earth scientists. 2nd Edition. Springer. Dordrecht, Netherlands, 692 p.
- Esbert, R. M., Ordaz, J. (1985). Alteración y alterabilidad de las piedras de construcción: criterios petrofísicos y ensayos de laboratorio. I congreso de patología en la edificación, C.O.A.C., Barcelona (1985), 15 p.
- Etnyre, L.M. (1989). Finding oil and gas from well logs. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Fabricius, I. L., Baechle, G., Eberli, G.P. & Weger, R. (2007). Estimating permeability of carbonate rocks from porosity and Vp/Vs. Geophysics 72 (5), 185 – 191.
- Fernández, J. (1977). Sedimentación triásica en el borde SE de la Meseta. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 173 p.
- Fernández, J., Dabrio, C. J. & Pérez-López, A. (1994). El Triásico de la región Siles-Alcaraz (Cordillera Bética). En: IV Congreso sobre el Pérmico y Triásico de España, Guía de campo. Cuenca, 47 p.
- Finkbeiner, T., Barton, C.A. & Zoback, M.D. (1997). Relationship among in-situ stress, fractures and faults, and fluid flow: Monterey Formation, Santa María Basin, California, AAPG Bulletin, 12, 1975 – 1999.
- Folk, R.L. (1962). Spectral subdivision of limestones types, W.E. Ham. Ed, Classification of carbonate rocks. The American Association of Petroleum Geologists, nº1, 62 – 84.
- Fraser, H. J. (1935). Experimental study of porosity and permeability of clastic sediments: Journal of Geology, vol. 43, 910 – 1010.
- Freeman, D. & Osoba, J.S. (1979). Porosity determined from neutron, density and sonic logs in western tight gas sands: U.S. Department of Energy Annual Symposium on Enhanced Oil and Gas Recovery, and Improved Drilling Techniques, 5th, Tulsa, vol.1, p. L2/1-L2/9.
- Gandhi, A., Kubik, P., Termina, J. J., Rocque, T., & Volkmar, M. (2011). Low Resistivity Petrophysical Mapping Expands The Terry (Sussex) Play In Wattenberg Field, Colorado. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. SPWLA 52nd Annual Logging Symposium, 14-18 May, Colorado Springs, Colorado.

- García-Hernández, M. (1978). El Jurásico terminal y el Cretácico inferior en las sierras de Cazorla y Segura (zona prebética). Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 344 p.
- García Lobón, J. L., Martín León, J., Reguera García, M. I., Rey Moral, C., Berrezueta Alvarado, E. R. & Pérez Ortiz, I. (2010). Primera fase del plan de almacenamiento geológico de CO₂ del IGME (Proyecto ALGECO2). 2010. Plan de selección y caracterización de áreas y estructuras favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ en España. Resumen ejecutivo. Fondo Documental del IGME, Madrid.
- Garrido-Megías, A. & 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.
- Gómez, R. (2009). Caracterización hidro-mecánica del suelo del terraplén de Rouen. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall - Pearson Education, 750 p.
- Guerrero M. A., Vázquez M. A., Galán, E. & Zezza, F. (1989). The physical-mechanical properties and ultrasonic data as criteria for evaluation of calcareous stone decay. La Conservazione dei Monumenti nel bacino del Mediterraneo. 1st International Symposium Bari, 309 - 312.
- Haldorsen, J., Linton, D., Plona, T., Sinha, B., Valero, H. & Winkler, K. (2006). Borehole acoustic waves. Schlumberger. Oilfield Review.
- Hamm, S., Kim, M., Cheong, J., Kim, J., Son, M. & Kim, T. (2007). Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite, Engineering Geology, 92, 73 - 87.
- Hardy, R. & Tucker, M. (1991). X-Ray powder diffraction of sediments. Techniques in sedimentology. Tucker, M. Ed., Blackwell Scientific Publications, 191 – 228.
- Hassan, M. & Al-Maleh, K. (1976). La répartition de l'uranium dans les phosphates Sénoniens dans le Nord-Ouest Syrien. C. R. Acad. Sci. (Paris), 282 p.

- Hayes, J.B. (1979). Sandstone diagenesis – the hole truth. Pp. 127 – 139. En: Aspects of Diagenesis (P.A. Scholle & P.R. Schluger, ed.). Spec. Publ. Soc. Econ. Pal. Min. 26.
- Heap, M.J., Baud, P., Reuschlé, T., Meredith, P.G. (2013). Stylolites in limestones: Barriers to fluid flow?. Geological Society of America, vol. 42, nº 1, 51 – 54.
- Helle, H.B., Bhatt, A., Ursin, B. (2001). Porosity and permeability prediction from wireline logs using artificial neural networks: a North Sea case study. Geophys. Prospect. 49, 431-444.
- Hernández Pacheco, E. (1934). Síntesis fisiográfica y geológica de España. Trab. Museo Nacional Ciencias Naturales, Ser. Geol., vol. 38, 586 p.
- Holloway, S. (2007). Carbon dioxide capture and geological storage. Philosophical Transactions of the Royal Society, 365, 1095 – 1107.
- Houlsby, A. (1976). Routine interpretation of the Lugeon water-test. Q. J. Eng. Geol. Vol. 9, 303 - 313.
- IGME (1973). Cartografía geológica MAGNA, Hoja nº 15: Lastres.
- IGME (1973). Cartografía geológica MAGNA, Hoja nº 963: Lora del Río.
- IGME (1978). Cartografía geológica MAGNA, Hoja nº 445: Cornudella.
- IGME (1980). Cartografía geológica MAGNA, Hoja nº 841: Alcaraz.
- IGME (2009). Cartografía geológica MAGNA, Hoja nº 213: Pont de Suert.
- IGME (2009). Cartografía geológica MAGNA, Hoja nº 839: Torre de Juan Abad.
- IGME (2007). Síntesis exploratoria para selección de potenciales formaciones almacén de CO₂ en el subsuelo español: Cordillera Cantábrica. Madrid, 2007.
- IGME (2009). Informes técnicos CGS: sondeos SE-4, SE-3, SB-4, SB-1, SD-4 y SB-3.
- IGME (2009). Estudio preliminar de las formaciones favorables para el almacenamiento subterráneo de CO₂ en España. IGME. Grupo de Almacenamiento de CO₂.

- IGME (2010). Plan de selección y caracterización de áreas y estructuras favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ en España – ALGECO2.
- IGME (2014). Atlas de estructuras del subsuelo susceptibles de almacenamiento geológico de CO₂ en España, 211 p.
- IPCC (2005) – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2005: Carbon Dioxide Capture and Storage. Synthesis Report. Summary for Policymakers (2005).
- IPCC (2007) – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers (2007).
- IPCC (2014) – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers (2014).
- Ivanova, A., Kashubin, A., Juhojuntti, N., Kummerow, J., Hennings, J., Juhlin, C., Lüth, S. & Ivandic, M. (2012). Monitoring and volumetric estimation of injected CO₂ using 4D seismic, petrophysical data, core measurements and well logging: a case study at Ketzin, Germany. *Geophysical Prospecting*, vol. 60, nº 5, 957 – 973.
- Jackson, M.P.A. & Talbot, C.J. (1986). External shapes, strain rates and dynamics of salt structures. *BGSA*, 97, 305 - 323.
- Jerez, L. (1973). Geología de la Zona Prebética en la transversal de Elche de la Sierra y sectores adyacentes (provincias de Albacete y Murcia). Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 750 p.
- Jiang, Z., Schrank, C., Mariethoz, G. & Cox, M. (2013). Permeability estimation conditioned to geophysical downhole log data in sandstones of the northern Galilee Basin, Queensland: Methods and application. *Journal of Applied Geophysics*, 93, 43 – 51.
- Jorgensen, D.G. (1989). Using geophysical logs to estimate porosity, water resistivity and intrinsic permeability. *U.S. Geological Survey Water Supply*, 2321, 24 p.
- Jurado, M.J. (1989). Diagrañas: su aplicación en el análisis sedimentario. *Rev. Soc. Geol. España*, 2, 291 – 301.

- Kazatchenko, E., Markov, M., & Mousatov, A. (2003). Determination of primary and secondary porosity in carbonate formations using acoustic data. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 5-8 October 2003.
- Keys, W. S. (1989). Borehole geophysics applied to ground-water investigations. National Ground Water Association. Dublin, Ohio.
- Kirsch, R. (2009). Groundwater Geophysics. A tool for Hydrogeology. 2nd Ed. Springer. Berlin.
- Klimentos, T. & McCann, C. (1990). Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones. *Geophysics*, vol.55, nº8, 998 - 1014.
- Kobr, M., Mareš, S. & Paillet, F. (2005). Borehole geophysics for hydrogeological studies: principles and applications. En: Rubin, Y., & Hubard, S. (Eds.), *Hydrogeophysics*. Dordrecht: Springer-Verlag, 291 – 331.
- Kutílek, M. & Nielsen, D.R. (1994). Soil Hydrology. *Catena Verlag*, 87 – 120.
- Lanaja, J. M. (1987). Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España. IGME, Publicaciones Especiales, 92-DG-A-003.
- Larionov, V. V. (1969). Borehole radiometry: Moscow, U.S.S.R., Nedra.
- Lebreton F. & Morlier P. (1983) A permeability acoustic logging, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*1, 101 - 105.
- Lebreton, F., Sarda, J.P., Trocqueme, F. & Morlier, P. (1978). Logging tests in porous media to evaluate the influence of their permeability on acoustic waveforms. SPWLA 19th Annual Logging Symposium, 13-16 June, El Paso, Texas.
- Leymerie, A. (1863). Note sur le système Garumnien. *Bull. Soc. Géol. France*, 20, 483 – 488.
- Li, S.X., Pengra, D.B. & Wong, P. Z. (1995). Onsager's reciprocal relation and the hydraulic permeability of porous media, *Phys. Rev. E*, 59, 2049 – 2059.

- Ling, H.E., Zhao, L. Li, J., Ma, J., Lui, R. & Wang, S. (2014). Complex relationship between porosity and permeability of carbonate reservoirs and its controlling factors: A case of platform facies in Pre-Caspian Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(2), 225 – 234.
- Lofts, J.C. & Bourke, L.T. (1999). The recognition of artefacts from acoustic and resistivity borehole imaging devices. *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 159, 59-76.
- Longman, M.W. (1980). Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *AAPG Bull.*, vol. 64, 461 – 487.
- López-Gómez, J., Arche, A. & Pérez-López, A. (2002). Permian and Triassic in: *Geology of Spain*, W. Gibbson, T. Moreno, Eds. Geological Soc. London.
- Lugeon, M. (1933). *Barrage et Géologie*. Dunod. Paris
- Machel Hans G. (1997). Recrystallization versus neomorphism, and the concept of “significant recrystallization” in dolomite research, *Sedimentary Geology*, vol.113, nº 3-4, 161 - 168.
- Mamillan, M. (1972). Connaissances actuelles pour mesurer le degré d’altération des pierres et l’efficacité des méthodes de traitement. 1st International Symposium on the deterioration of building stones, La Rochelle, 47 - 56.
- Mari, J.L., Gaudiani, P. & Delay, J. (2011). Characterization of geological formations by physical parameters obtained through full waveform acoustic logging. *J. Phys. Chem. Earth*.
- Mari, J.L. & Guillemot, D. (2012). Detection of porous and permeable formations: from laboratory measurements to seismic measurements. *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 67 (2012), No. 4, 703 - 721.
- Martínez del Olmo, W., Aguirre, W. & Fernández Ortigosa, F. (1991). I Congreso Grupo Español del Terciario. Vic, 206 – 209.

-
- Martínez Ibarra, R. (2009). Dolomitización y generación de porosidad vugular en la brecha K/T del Campo Cantarell, Zona Marina-Campeche. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, 225 p.
 - Marzo, M. & Calvet, F. (1985). Guía de la Excursión al Triásico de los Catalánides. En Mateu, F.; Marzo, M., Ed. "Coloquio de Estratigrafía y Paleogeografía del Pérmico y Triásico de España. La Seud'Urgell, 1985.
 - Mattauer, M. (1968). Les traits structuraux essentiels de la chaîne Pyrénéenne. Rev. Geogr. Phys. et Géol. dyn, X, 1, 3 – 12.
 - Mattheß, K. & Ubell, G. (1981). Allgemeine Hydrogeologie – Grundwasserhaushalt. Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
 - Mejías, M. & López-Geta, J.A. (2003). Instrumentation and methodology for the hydraulic characterization of fractured rocks. International Conference on Groundwater in Fractured Rocks. Praga, IHP-VI, Series on Groundwater, 7, 275 - 276.
 - Melgarejo, J. C. (2004). Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada (vol. 1 y 2). Universitat de Barcelona. Fundació Folch.
 - Mercado, E., González, C., Solórzano, E., Chaves, P. & Barboza, W. (2010). Integrated methodology of the discretization of the porosity in naturally fractured reservoir. Proceedings 72th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, Paper H007.
 - Merino, E., Ortoleva, P. & Strickholm, P. (1983). Generation of evenly-spaced pressure-solution seams during (late) diagenesis: a kinetic theory. Contributions to Mineralogy and Petrology, 82, 360 - 370.
 - Montenat, C. (1977). Les bassins néogènes et quaternaires du Levant d'Alicante á Murcie (Cordillères Bétiques orientales, Espagne). Stratigraphie, paléontologie et évolution dynamique. Docum. Lab. Géol. Fac. Sci. Lyon, 69.
 - Montenat, C., Ott d'Estevou, Ph. & Copier, G. (1990). Les bassins néogènes entre Alicante et Cartagena. Doc. Et Trav. I.G.A.L. 12-13, 313 – 368.

- Moore, D. (1993). Productive low resistivity well logs of the offshore Gulf of Mexico. New Orleans, Louisiana, USA: Houston and New Orleans Geological Societies.
- Morlier, P. & Sarda, J.P. (1971). Atténuation des ondes élastiques dans les roches poreuses saturées. *Rev. Inst. Fr. Pét.* 26 (9), 731 - 755.
- Morris, R.L., Grine, D.R. & Arkfeld, T.E. (1964). Using compressional and shear acoustic amplitudes for the location of fractures. *J. Pet. Technol.*, 16 (6), 623 – 632.
- Morse, D.G. (1994). Siliciclastic reservoir rocks. *AAPG Mem.* 60, 121 – 139.
- Mountjoy, E.W., Machel, H.G., Green, D., Duggan, J. & Williams-Jones, A.E. (1999). Devonian matrix dolomites and deep burial carbonate cements: a comparison between the Rimbey-Meadowbrook reef trend and the deep basin of west-central Alberta. *Bull. Can. Petrol. Geol.* 47, 487 – 509.
- Muñoz, J.A. (1992). Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees Crustal Balanced Cross-section. En: *Thrust Tectonic* (K.R. McClay, Ed.), 235 - 246.
- Myers, K.J. & Wignall, P.B. (1987). Understanding Jurassic organic-rich mudrocks: new concepts using gamma-ray spectrometry and paleoecology: examples from the Kimmeridge Clay of Dorset and the Jet Rock of Yorkshire. En: Leggett, J.K. & Zuffa, G.G. (Eds.), *Marine Clastic Sedimentology: Concepts and Case Studies*. London, 172 – 189.
- Nelson, R. A. (1985). *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs—Contributions in petroleum geology and engineering 1*: Houston, TX, Gulf Publishing Company, 320 p.
- Norden, B., Förster, A., Vu-Hoang, D., Marcelis, F., Springer, N. & Le Nir, I. (2010). Lithological and petrophysical core-log interpretation in CO₂SINK, the European CO₂ onshore research storage and verification project. *Society of Petroleum Engineers*, Vol. 13, nº 2.
- Ogaya, X., Queralt, P., Ledo, J., Marcuello, A. & Jones, A.G. (2014). Geoelectrical baseline model of subsurface of the Hontomín site (Spain) for CO₂ geological storage in a deep saline aquifer: a 3D magnetotelluric characterization. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 27, 120 – 138.

- Olalla, C. & Sopeña, L. (1991). Ensayos de campo. Monografía nº 5. Máster de Ingeniería Geológica. Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid.
- Ortí, F. (1974). El Keuper del Levante español. *Estudios Geológicos*, 30, 7 – 46.
- Otero, P., Álvarez, I. & Gutiérrez, J.A. (2015). CIUDEN, experiencias en captura de CO₂ por oxidación. *Boletín Grupo Español Carbón*, nº 35.
- Paillet, F.L., Cheng, C.H. & Hsieh, P. (1987). Experimental verification of acoustic waveform and VSP seismic Tube Wave measurements of fracture permeability. U.S. Geological Survey Denver, 191 – 211.
- Palmer, I. & Mansoori, J. (1996). How permeability depends on stress and pore pressure in coal beds: A new model. Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado
- Patchett, J.G. & Coalson, E.B. (1979). The determination of porosity in sandstones and shaly sandstones. Part.1, Quality control. SPWLA 20th Ann. Symp. Trans., Paper QQ, 1-17.
- Pérez-Estaún, A., Gómez, M. & Carrera, J. (2009). El almacenamiento geológico de CO₂, una de las soluciones al efecto invernadero. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 17 – 2, 179 – 189.
- Pettijohn, F.J. (1975). *Sedimentary rocks*, 3rd ed., New York, Harper and Row Publ. New York, 628 p.
- Pitman, E. D. (1979). Porosity, diagenesis, and productive capability of sandstone reservoirs. P. A. Scholle, & P. R. Schluger, Eds., *Aspects of Diagenesis: Society Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 26*, 159 - 173.
- Pradhan, S. Moeck, I. & Rostron, B. (2015). Determining porosity and permeability in laminated sandstones for combined CO₂-Geothermal reservoir utilization. *Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19 – 25 April 2015*.
- Prado, A. J., Campos, R., Ruiz, C., Pelayo, M., Recreo, F., Lomba, L., Hurtado, A., Eguilior, S. & Pérez del Villar, L. (2009). Almacenamiento geológico de CO₂. Selección de formaciones favorables. Comunicación técnica. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Madrid. CIEMAT, 28 p.

-
- Pryor, W.A. (1973). Permeability-porosity patterns and variations in some Holocene sand bodies. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 57, 162 – 189.
 - Purvance, D.T. & Andricevic, R. (2000). Geoelectric characterization of the hydraulic conductivity field and its spatial structure at variable scales. *Water Resources Research*, 36 (10), 2915 – 2924.
 - Pyrak-Nolte, L. J., & J. P. Morris (2000). Single fractures under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37, 245 – 262.
 - Ramon, X. & Calvet, F. (1987). Estratigrafía y sedimentología del Muschelkalk inferior del dominio Montseny-Llobregat (Catalánides). *Estudios Geológicos*, vol. 43, nº 5 – 6.
 - Raven, K.G. & Gale, J. E. (1985). Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 22 (4), 251 – 261.
 - Raymer, L. L., Hunt, E. R. & Gardner, J. S. (1980). An improved sonic transit time to porosity transform. *Trans. SPWLA 21th Annual Logging Symposium*, July 8-11, 1980, 1 – 12.
 - Read, J.F. (1985). Carbonate platform facies models. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists*, 69, 1 – 21.
 - Reyes Urquiza, M. (2012). Estudio de las formaciones favorable para almacenamiento de CO₂ en un sector del borde meridional de las Béticas orientales. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, 262 p.
 - Rider, M.H. (1996). *The geological interpretation of well logs*. Whittles Publishing.
 - Roadmap 2050 (2011). *Energy Roadmap 2050 (COM/2011/883)* European Commission, by Günther H. Oettinger, European Commissioner for Energy.
 - Robles Orozco, S. (1974). Estudio geológico del Mesozoico del bloque del Cardó y sectores adyacentes. Tesis Doctoral. Univ. Autónoma de Barcelona, Bellaterra, 436 p.

-
- Rogers, J.J.W. & Head, W.B. (1961). Relationships between porosity, median size, and sorting coefficients of synthetic sands. *J. Sediment. Petrol.*, 31, 467 – 470.
 - Romero Morales, E. (1999). Characterization and thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated boom clay: an experimental study. PhD Thesis. Universitat Polytechnica de Catalunya, Barcelona, España, 405 p.
 - Rosell, J., Linares, R. & Llompарт, C. (2001). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14, 47 – 56.
 - Rostami, R., Lashkaripour, G. & Ghafoori, M. (2014). Predictive permeability model of faults in crystalline rocks; verification by joint hydraulic factor (JH) obtained from water pressure tests. *J. Earth Syst. Sci.* 123, nº6, 1325 – 1334.
 - Rubin, Y., Mavko, G. & Harris, J. (1992). Mapping permeability in heterogeneous aquifers using hydrologic and seismic data. *Water Resources Research*, 28 (7), 1809 – 1816.
 - Ruiz, 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., Zapatero, M.A., Suárez, I. & Arenillas, A. (2007). Almacenamiento geológico de CO₂. Criterios de selección de emplazamientos. Informes técnicos CIEMAT, 1106, 100 p.
 - Sander, N. J. (1967). Classification of carbonate of marine origin. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists*, 51, 325 – 336.
 - Sandoval, M. (2000). *Diagénesis de areniscas*. U.C.V. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, 414 p.
 - Schlumberger Well Services. (1972). *Log interpretation manual/principles*, vol I. Houston, Schlumberger Well Services, Inc. 176 p.
 - Schlumberger (1974). *Log Interpretation Charts*, Schlumberger Educational Services, New York, 83 p.
 - Schlumberger (1982). *Natural Gamma Ray Spectroscopy. Essentials of N.G.S. Interpretation*.

- Schlumberger (1987). Log Interpretation Principles/Applications. Schlumberger Educational Services, 2nd Ed. SMP-7017.
- Schlumberger Well Services. (2003). Log interpretation charts. Houston, Schlumberger Well Services, Inc. 56 p.
- Schmidt, V. & McDonald, D. (1979). The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), Special Publication n° 26, 175 - 207.
- Schön, J.H. (1996). Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Handbook of geophysical exploration. Section I, Seismic Exploration, vol.18. Pergamon, Oxford, 583 p.
- Schultz, R.A. & Fossen, H (2008). Terminology for structural discontinuities. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 92, 853 – 867.
- Séguret, M. (1972): Étude Tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. Caractère sédimentaire rôle de la compression et de la gravité. Thèse Fac. Sc. de Montpellier. Série Géologie Structurale 2, 155 p.
- Serra, O. & L. (2004). Well Logging - Data acquisition and applications. Ed. Serra Log.
- Serra, O. (2008). Well Logging handbook. Éditions Technip, Paris.
- Sherer, M. (1987). Parameters influencing porosity in sandstones: a model for sandstones porosity prediction. AAPG Bulletin, vol. 71, n°. 5, 485 – 491.
- Solé de Porta, N. & Ortí, F. (1982). Primeros datos cronoestratigráficos de las series evaporíticas del Triásico superior de Valencia (España). Acta Geológica Hispánica, 17, 185 – 191.
- Soria, J.M., Caracuel, J.E., Yébenes, A., Fernández, J. & Viseras, C. (2005). The stratigraphic record of the Messinian salinity crisis in the northern margin of Bajo Segura Basin (SE Spain). Sedimentary Geology, 179, 225 – 247.

- Soria, J.M., Caracuel, J., Corbí, H., Dinarès-Turel, J., Lancis, C., Tent-Manclús, J. & Yébenes, A. (2008a). The Bajo Segura Basin (SE Spain): Implications for the Messinian salinity crisis in the Mediterranean margins. *Stratigraphy*, 5 (3-4), 257 – 263.
- Stonecipher, S. A., Winn, R. D. Jr., & Bishop, M.G. (1984). Diagenesis of the Frontier Formation, Moxa Arch: A function of sandstone geometry, texture and composition, and fluid flux. D.A. McDonald & R.C. Surdam, Eds., *Clastic Diagenesis: AAPG Memoir 37*, 289 - 316.
- Tent-Manclús, J.E. (2003). Estructura y estratigrafía de las Sierras de Crevillente, Abanilla y Algayat: su relación con la falla de Crevillente. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 814 p.
- Tucker, M. E. (1982). *The Field Description of Sedimentary Rocks: United Kingdom*. The Open University Press, 112 p.
- Valenzuela, M., García-Ramos, J.C. & Suárez de Centi, C. (1986). The Jurassic Sedimentation in Asturias (N. Spain). *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 16, 121 - 132.
- Valera, F. (2005). Estratigrafía y tectónica del Triásico Sudibérico en el sector oriental de la Cordillera Bética. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 237 p.
- Van Wagoner, J.C., Mitchum, R.M., Campion, K.M., Rahmanian, V.D. (1990). Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Methods in Exploration Series*, nº 7, 55 p.
- Vera, J. A. (Ed.) (2004). *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 890 p.
- Virgili, C. (1958). El Triásico de los Catalánides. *Bol. Inst. Geol. y Min. de España*, t. LXIX, p. VII-XIII y 1-856, Madrid, 858 p.
- Viseras, C., Soria, J.M. & Fernández, J. (2004). Cuencas neógenas postorogénicas de la Cordillera Bética. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.). SGE- IGME, 576 – 581.

-
- Walsh, J.B. (1981). Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 18, 429 – 435.
 - Wang, X., Jiang, X., Wan, L., Song, G. & Xia, Q. (2009). Evaluation of depth-dependent porosity and bulk modulus of a shear using permeability-depth trends. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46, 1175 - 1181.
 - Ward, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, 236 - 244.
 - Weber, K.J. (1986). How heterogeneity affects oil recovery. En: *Reservoir Characterization*. Ed. By L. W. Lake & H. B. Carroll, Jr. Academic Press, 487 – 543.
 - Westphal, H., Eberli, G., Smith, L., Grammer, G., & Kislak, J. (2004). Reservoir characterization of the Mississippian Madison formation, Wind River Basin, Wyoming. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 88 (2004), 405 – 432.
 - Wilson, J.L. (1975). *Carbonate Facies in Geologic History*. Springer-Verlag, Berlin, 471 p.
 - Wilson, M. J. (1987). *A handbook of determinative methods in clay mineralogy*. Blackie, Glasgow, 308 p.
 - Wu, T. & Berg, R. R. (2003). Relationship of reservoir properties for shaly sandstones based on effective porosity: *Petrophysics*, 44, 328 - 341.
 - Wyllie, M. R. J., Gregory, A.R., & Gardner, L.W. (1956). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: *Geophysics*, 21, 41 - 70.
 - Xue, Z., Tanase, D. & Watanabe, J. (2005). Estimation of CO₂ saturation from time-lapse CO₂ well logging in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan. *Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE). 75th Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, 2005*.
 - Zinszner, B., Pellerin, F.M. (2007). *A Geoscientist's Guide to Petrophysics*. Editions Technip, Paris, ISBN 978-2-7108-0899-2.

ANEXOS

ANEXO I
SONDEOS SD-4 Y SB-3

El proyecto inicial de estudio de formaciones en la cobertera sedimentaria del territorio español para almacenamiento geológico de CO₂ (IGME, 2010) incluía, además de los 4 sondeos indicados en la introducción de esta tesis (Capítulo 1), dos sondeos más, denominados SD-4 y SB-3. Estos sondeos han sido excluidos debido a dos razones fundamentales; por un lado, no se han encontrado sondeos profundos de petróleo próximos con los que establecer una correlación estratigráfica entre las formaciones geológicas estudiadas, y por otra parte, los materiales interpretados en la primera fase de estudio, no han resultado todo lo satisfactorio que cabría esperar para una formación almacén.

Los registros que se tomaron en cada uno de los sondeos se presentan en la Tabla A1-1.

Tabla A1- 1. Registros adquiridos en los sondeos SD-4 y SB-3. GR = Natural Gamma Ray, ABI = Acoustic Borehole Image, OBI = Optical Borehole Image, FWS = Full Wave Sonic, SP = Spontaneous Potential, Induc = Inducción eléctrica y RES = resistividad. Se indica el número de muestras analizadas: DRX = Difracción de Rayos X, LD = Lámina Delgada, Lugeon = ensayo de permeabilidad Lugeon.

	DIAGRAFÍAS								DRX	LD	Lugeon
	GR	ABI	OBI	FWS	SP	Induc.	RES	Caliper (Acústico = A)			
SD-4	X	X	X	X	-	X	X	X	8	4	-
SB-3	X	X	-	X	X	-	X	X	4	-	2

Parte del trabajo llevado a cabo en estos dos sondeos, se expone de forma muy resumida a continuación.

➤ **Sondeo SD-4**

Geográficamente el sondeo SD-4 se encuentra al SO de la ciudad de Gijón, perteneciente a la provincia de Asturias. Sus coordenadas geográficas son Latitud = 43°30'34.92" N, Longitud = 5°35'30.7 O.

Geológica y estructuralmente, el sondeo SD-4 se localiza en la Cuenca Mesozoico-Terciaria de Asturias, y dentro de ésta, en la Cuenca de Gijón-Villaviciosa, cuyo extremo occidental está limitado por la Falla de Veriña, y al extremo oriental por la Falla de Ribadesella. El mapa geológico detallado de la zona donde se ubica el sondeo SD-4 se puede consultar en la Hoja nº 14 de MAGNA50, correspondiente a Gijón. En la Figura A1-1, se observan las unidades paleoestratigráficas que conforman la Cuenca Mesoterciaria asturiana.

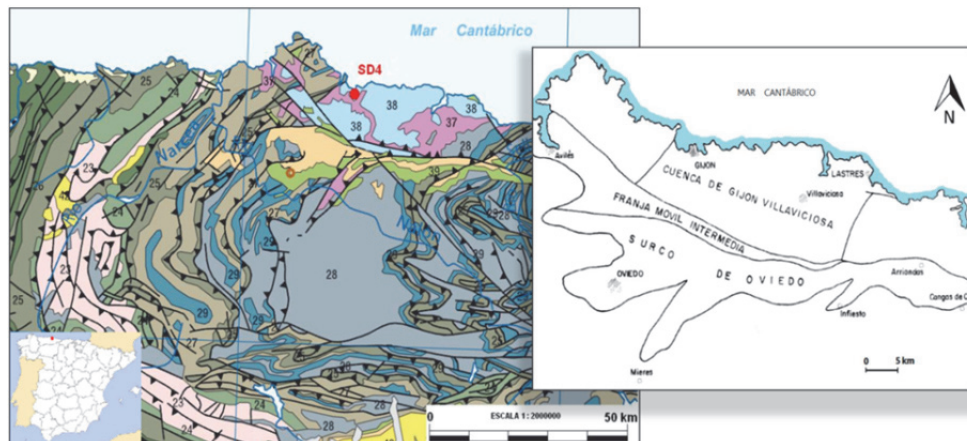


Figura A1- 1. Izquierda: Esquema geológico de los dominios principales de la Cordillera Cantábrica y localización del sondeo SD-4 (círculo rojo) (modificado de Vera, 2004). Derecha: Esquema sintético de las unidades paleogeográficas de la Cuenca Meso-Terciaria de Asturias, donde se puede observar la Cuenca de Gijón-Villaviciosa (modificado del MAGNA50, Hoja 15, IGME).

La geología jurásica de Asturias se agrupa en dos unidades litológicas (Valenzuela *et al.*, 1986); una Unidad inferior constituida básicamente por rocas carbonatadas de origen litoral (Formación Gijón) y marino abierto (Formación Rodiles), y una Unidad superior formada principalmente por rocas silíceas de origen continental, y marino restringido y costero.

El nivel geológico de partida en el sondeo SD-4 es la Formación Rodiles, consistente en una alternancia rítmica de margocalizas y margas con intercalaciones de arcillas. En profundidad le sigue la Formación Gijón, constituida por una serie calizo-dolomítica. Ambas formaciones son de edad Jurásica, y pertenecen al Grupo Villaviciosa.

La interpretación litológica llevada a cabo en esta tesis de la Formación Rodiles y la Formación Gijón es la siguiente:

- La columna litológica del sondeo SD-4, suministrada inicialmente por el IGME (IGME, 2009), ha sido modificada de acuerdo con las interpretaciones realizadas a partir de diagráfias, de los análisis de las muestras en polvo mediante DRX, y del estudio de muestras en lámina delgada mediante microscopio. Asimismo, el límite Formación Rodiles – Formación Gijón (zona sello – zona almacén) se ha establecido a los 81 m de profundidad (Figura A1-2).
- La Formación Rodiles y la Formación Gijón atravesadas por el sondeo SD-4, no se han podido correlacionar estratigráficamente con formaciones equivalentes pertenecientes a algún sondeo profundo y antiguo de petróleo próximo.

-
- A partir de la interpretación desarrollada, se observa una heterogeneidad litológica significativa en ambas formaciones, y se han diferenciado dos zonas litológicas:
 - Una zona superior, identificada como la Formación Rodiles, caracterizada por presentar valores bajos de resistividad y valores muy elevados de Radioactividad Gamma Natural. El grado de compactación del material es pequeño tal como muestra la elevada irregularidad observada en los registros geofísicos de esta zona. Se ha interpretado este tramo como alternancias de margocalizas y margas con finas intercalaciones centimétricas de arcillas.
 - Una zona subyacente, identificada como la Formación Gijón, que presenta perfiles de los registros más homogéneos, indicando que se trata de una formación ligeramente más compacta. Presenta valores más bajos de Radioactividad Gamma Natural que la zona anterior, y se observan valores de resistividad y velocidad de ondas P muy elevados. Se ha interpretado como una serie carbonatada constituida por paquetes métricos de caliza bioclástica (Mudstone, Packstone y Grainstone), caliza dolomítica y dolomicritas.
 - El estudio de la porosidad a partir de láminas delgadas tomadas a diferentes profundidades de la Fm. Gijón revela una porosidad baja en general, inferior al 10 %. Las porosidades observadas son de diferentes tipos: fisural, cavidades y de tipo matricial. Los valores de porosidad sónica muestran resultados muy variables, desde 2 a casi 45 %, observándose valores más elevados en las capas interpretadas como calizas margosas. En las calizas bioclásticas, dolomíticas y dolomicritas se han estimado valores también muy variables, hasta del 32 %.
 - A partir del estudio del registro de imagen acústica (ABI), se han identificado dos familias de fracturas naturales en la Formación Gijón, concordante con las identificadas en la formación sello. La fracturación identificada en la Fm. Gijón es abundante. Estas fracturas presentan abertura visible (1 – >3 cm) y de carácter penetrativo, aunque un elevado número de ellas están selladas por carbonato. Estas fracturas de carácter penetrativo, junto con la dolomitización observada en la Formación Gijón, podrían conferir cierto grado de permeabilidad a la formación carbonatada.
 - No se ha efectuado ningún ensayo hidráulico Lugeón ya que durante la perforación se observó que todo el fluido de perforación se filtraba. En consecuencia, se asume una gran admisibilidad para el macizo rocoso del almacén.

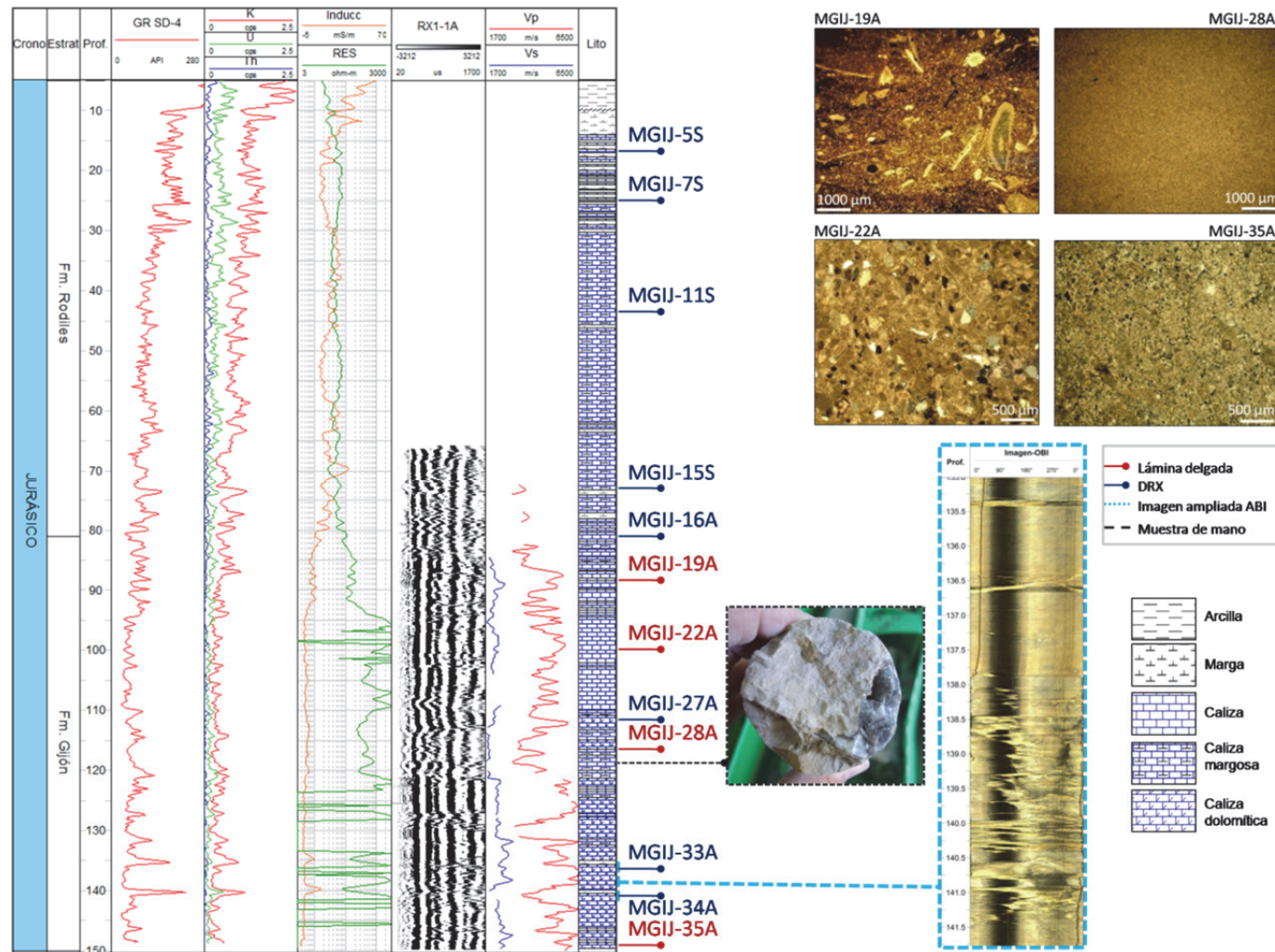


Figura A1- 2. Registros en el sondeo SD-4, de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), inducción eléctrica (conductividad) y de resistividad, señal sónica recibida en el primer receptor (RX1-1A), velocidad de ondas P (Vp) y de ondas S (Vs), y columna litológica interpretada. Se indican las profundidades a las que se tomaron muestras para análisis de DRX y para lámina delgada, con 4 fotografías de las mismas, y ampliación de un ejemplo de imagen óptica tomada entre los 135 y 141.7 m de profundidad. Se muestra una foto de testigo con la presencia de una cavidad de tamaño casi centimétrico.

- En base al escaso número de diagrfias y láminas delgadas de las que se dispone en la Formación Gijón del sondeo SD-4, no se pueden extraer conclusiones definitivas en lo que respecta a su calidad como reservorio. Sí se puede concluir que se trata de una formación con una elevada fracturación penetrativa, y que por lo observado durante los intentos de ensayos hidráulicos Lugeon, podría tener una importante permeabilidad. La disposición de los perfiles del diámetro del sondeo y el diámetro de perforación indican que cualitativamente podría ser una formación permeable hasta los 123 m de profundidad. Se aconseja por tanto un mayor y más exhaustivo estudio de los carbonatos de la Formación Gijón para extraer conclusiones definitivas sobre su calidad como reservorio.

- La interpretación de la litología sugiere dudas respecto a la idoneidad litológica como formación sello, al presentar una elevada heterogeneidad litológica. Los registros geofísicos disponibles no hacen posible extraer conclusiones petrofísicas concluyentes.

➤ **Sondeo SB-3**

Geográficamente el sondeo SB-3 se localiza en la localidad de Cantillana, en la provincia de Sevilla. Sus coordenadas geográficas son Latitud = 37° 37'13.74" N, y Longitud = 5° 51'22.29" O.

Geológicamente, el sondeo está ubicado en la Cuenca del Guadalquivir, perteneciente al conjunto de cuencas neógenas postorogénicas en la Cordillera Bética (Figura A1-3). El mapa geológico detallado de la zona donde se ubica el sondeo SB-3 se puede consultar en la Hoja nº 963 del MAGNA50 (IGME, 1973), correspondiente a Lora del Río.

La Cuenca del Guadalquivir se sitúa sobre el Zócalo Hercínico y sobre la Cobertera Mesozoica, extendiéndose desde Cádiz hasta la Sierra de Cazorla, en Jaén. Representa la cuenca de antepaís de la parte central y occidental de la Cordillera Bética (MAGNA nº 963, IGME).

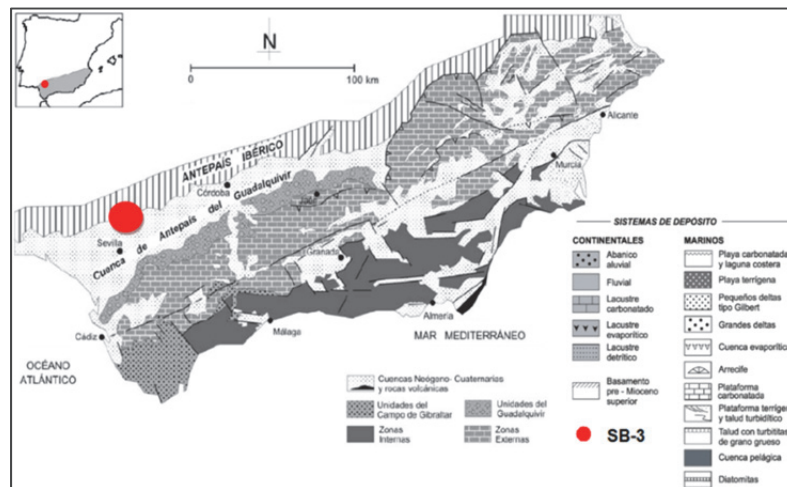


Figura A1- 3. Localización geológica del sondeo SB-3 (modificado de Vera, 2004).

El sondeo SB-3 atravesó, de techo a muro, la Formación Margas Azules del Guadalquivir y la Formación Detrítico Basal hasta la totalidad de la perforación. La Formación Margas Azules se presenta en general en la Cuenca del Guadalquivir con una gran uniformidad sedimentológica y generalmente de forma masiva o con una estratificación potente. La Formación Detrítico Basal, pertenece a un conjunto de “facies de borde” que marca la transgresión del Neógeno sobre los materiales del Paleozoico (MAGNA nº 963, IGME). Los cambios de facies en esta unidad son comunes y rápidos y por tanto la edad de esta unidad es variable de una zona a otra de la Cuenca.

La interpretación litológica de la Formación Margas Azules del Guadalquivir y la Formación Detrítico Basal es la siguiente:

Factores como la existencia de entubación hasta la profundidad de 57 m, y el nivel del agua localizado a los 54 m en el momento de la testificación geofísica, han limitado el uso de los registros y dificultado su interpretación. A continuación se exponen las conclusiones:

- La interpretación litológica a partir de diagráfias se ha complementado con el análisis mediante Difracción de RX de 4 muestras en polvo, pertenecientes en su totalidad a la Formación Detrítico Basal. En base a los resultados y análisis de las diagráfias disponibles, se ha establecido el límite entre la Formación Margas Azules del Guadalquivir y la Formación Detrítico Basal en el sondeo SB-3, a los 67 m de profundidad (Figura A1-4), modificando así el definido en los informes técnicos facilitados por el IGME (IGME, 2009).

- No se ha podido establecer una correlación estratigráfica entre las formaciones geológicas atravesadas en el sondeo SB-3 y las de algún sondeo profundo y antiguo de petróleo próximo.

- Se han identificado en el sondeo SB-3 tres zonas litológicamente diferentes:
 - Una zona superior, identificada por el IGME como la formación sello y perteneciente a la Formación Margas Azules del Guadalquivir. Se caracteriza por presentar valores de Radioactividad Gamma Natural superiores a 60 API, y valores muy variables de RES64N (<100 - 3000 ohm·m). Se ha interpretado como una arcilla limosa.
 - Una zona inmediatamente inferior, identificada por el IGME como la Formación Detrítico Basal. Se caracteriza por presentar valores muy variables de GR (40 – 100 API) y de RES64N (< 100 – 300 ohm·m). Se han interpretado esta zona como tramos métricos de arenas con intercalaciones de menor espesor de arcilla limosa, y un potente paquete de gravas hacia la parte final. Desde un punto de vista litológico, no se puede considerar esta formación geológica en el sondeo SB-3, a priori, una buena formación almacén, debido al carácter altamente friable del material que lo compone (gravas y arenas).
 - Una tercera zona subyacente, identificada como el zócalo paleozoico, y que presenta valores elevados de GR (69 – 172 API), de Vp (3900 m/s) y más elevados de RES64N (110 ohm·m). Se ha interpretado esta zona como una arenisca con alguna muy fina intercalación de arcillas.

- A partir del estudio del registro de imagen acústica (ABI) se ha identificado en el sondeo SB-3 una familia de fracturas naturales en la Formación Detrítico Basal, y otra familia en el Zócalo paleozoico, concordantes estructuralmente entre sí. En la Fm. Detrítico Basal del sondeo SB-3 la fracturación identificada es poco abundante y en general penetrativa, con apertura visible (1 – 3 cm).

- Durante el único ensayo de permeabilidad Lugeon realizado en el tramo 58 – 63 m de la Fm. Detrítico basal, se produjo una absorción total del caudal inyectado, por lo que se considera la existencia de una muy elevada permeabilidad.

- La formación Margas Azules del Guadalquivir, identificada como la formación sello en el sondeo SB-3 por el IGME, constituye aproximadamente 8 m de profundidad. No se ha podido realizar un estudio de las estructuras sedimentarias y fracturas de esa zona, al carecer de registro acústico a esa profundidad. Asimismo, tampoco se dispone de suficiente información para establecer una valoración petrofísica tanto de esta formación como de la Fm. Detrítico Basal.

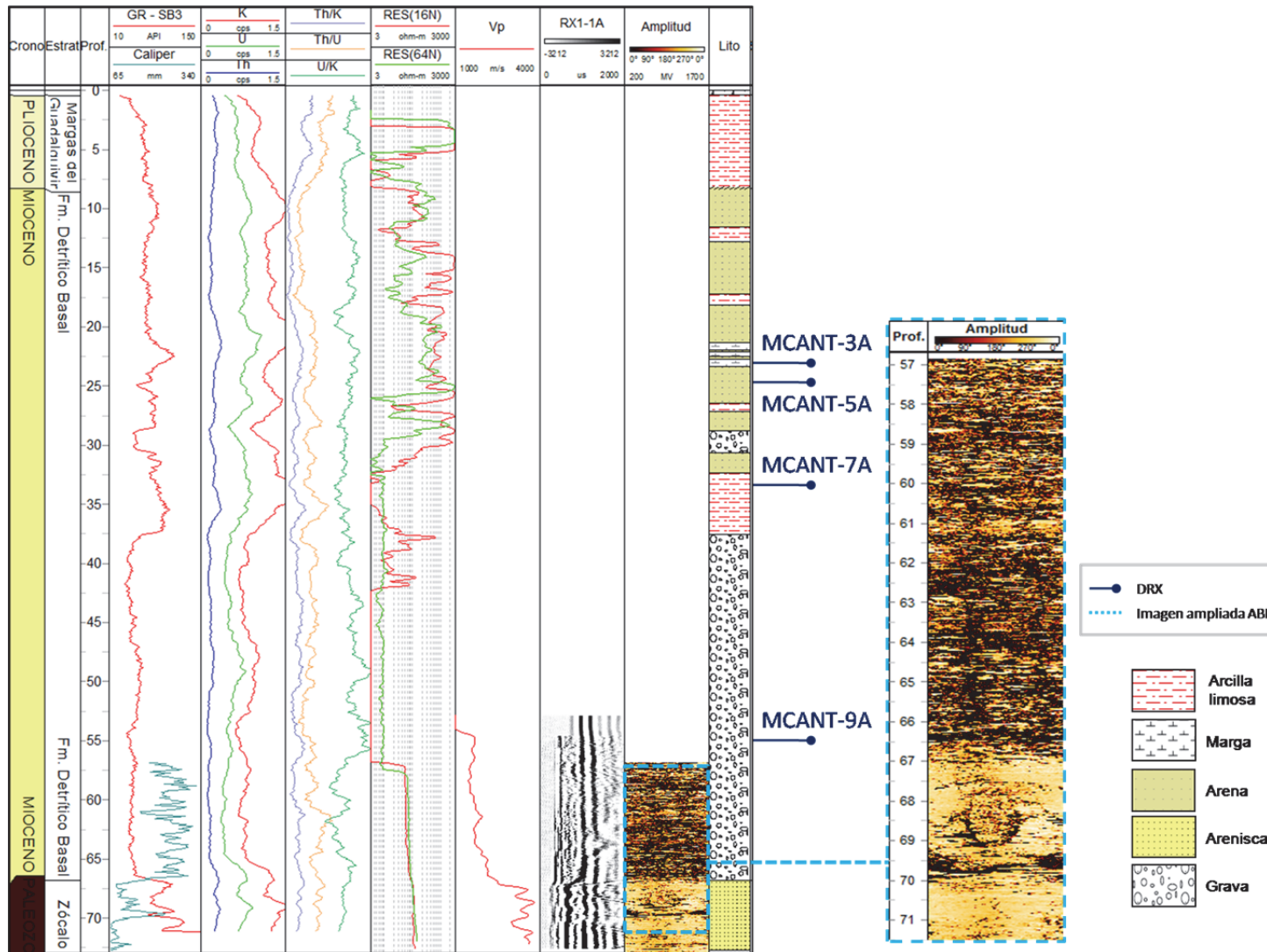


Figura A1- 4. Tramo 8 - 72 m de la Fm. Detritico Basal en el sondeo SB-3. Registros de izquierda a derecha: Radioactividad Gamma Natural (GR), *cáliper* acústico, espectrometría de K, U y Th, y relaciones Th/K, Th/U y U/K, Resistividad Normal Corta (RES16N) y Larga (RES64N), velocidad de ondas P (Vp), registro de la llegada de la señal sónica al primer receptor (RX1-1A), imagen acústica de sondeo y columna litológica interpretada. Se indican las profundidades donde se tomaron muestras para análisis de DRX, y un aumento de la imagen acústica de sondeo entre los 57 y los 71 m de profundidad.

ANEXO II

DETALLES DE LA PERFORACIÓN Y DE LA
ADQUISICIÓN DE DATOS EN LOS SONDEOS
SOMEROS

ESTIMACIÓN DEL CÁLIPER ACÚSTICO

Detalles de la perforación y de la adquisición de datos en los sondeos someros

La perforación de los sondeos someros SB-1, SB-3, SB-4, SE-3, SE-4 y SD-4 fue llevada a cabo por la empresa Compañía General de Ingeniería y Sondeos S.A. (CGS). Las maniobras se efectuaron con sondas modelo Christensen-Boyles CS-2000 y sondas ACKER MP-8C.

Como fluido de perforación se utilizó, en todos los casos, agua limpia sin adicción de lodos bentoníticos o polímeros. Las longitudes de las maniobras fueron, generalmente, de 3 m, y la recuperación de los testigos fue de aproximadamente el 90% como mínimo.

En la Tabla A2-1 se muestran algunos detalles de la perforación de todos los sondeos someros estudiados en esta tesis.

Tabla A2- 1. Diámetros de perforación y de entubación para todos los sondeos someros testificados, así como las profundidades de perforación y de testificación, y el nivel del agua en el momento de realizar las medidas.

Sondeo	Profundidad Sondeo (m)	Profundidad Testificada (m)	Diámetro Perforación (mm)	Profundidad Entubación (m)	Nivel Agua (m)
SE-4	110	107	116 – HQ96	21	20.6
SB-4	170	167	116	No	30.2
SE-3	181,2	160	116 – HQ96	11,58	2
SB-1	187,85	80	116	18	13
SD-4	200	151	131, 116, HQ96, NQ76	122,4	66.2
SB-3	73,4	73	116 – HQ96	56,8	54.3

En las figuras A2-1, A2-2, A2-3, A2-4 y A2-5 se muestran algunas fotografías tomadas durante los trabajos de campo llevados a cabo en los sondeos SB-3, SB-4, SE-3, SE-4 y SD-4 respectivamente.



Figura A2- 1. Fotografía realizada durante la adquisición de datos en el sondeo SB-3, localizado en Cantillana (Sevilla).



Figura A2- 2. Fotografía realizada durante la testificación geofísica en el sondeo SB-4, localizado en Bacarot (Alicante).



Figura A2- 3. Fotos durante las pruebas previas a la testificación geofísica del sondeo SE-3, en Orrit (Lleida). En la foto de la derecha, se puede observar al fondo, el afloramiento de las lutitas rojas de la Facies Garum pertenecientes a la parte final de la Formación Tremp.



Figura A2- 4. Foto de la testificación geofísica en el sondeo SE-4, localizado en Arbolí (Tarragona), momentos después de haberse finalizado la perforación.



Figura A2- 5. Fotografías realizada durante la testificación geofísica del sondeo SD-4, localizado en Gijón (Asturias).

➤ DETERMINACIÓN DEL CALIPER ACÚSTICO

La determinación del diámetro acústico del sondeo resulta útil tanto para el control de la calidad de los registros, como para determinar zonas fracturadas o simplemente como correctores de otros tipos de registro.

Es posible estimarlo a partir del tiempo de tránsito de la señal acústica (*Travel Time*) obtenido con el registro de imagen acústica de la pared del sondeo (ABI). Para convertir ese tiempo de viaje en radio de sondeo (*caliper*), se precisan conocer algunos parámetros más: la velocidad del fluido del sondeo a través del cual viaja la señal acústica, el radio de la sonda (en mm) y el tiempo (ida y vuelta) que tarda la señal acústica dentro de la sonda (desde el transductor de la sonda hasta la carcasa y de vuelta al receptor, el *Time Window*).

Como la medida correcta depende de lo centrada que esté la sonda dentro del sondeo, primeramente se corrige el tiempo de tránsito por los efectos de la descentralización, a través de un procesado que implica la eliminación de esa tendencia y corrige los datos de entrada ajustándolos de acuerdo a una senoide (Figura A2-6).

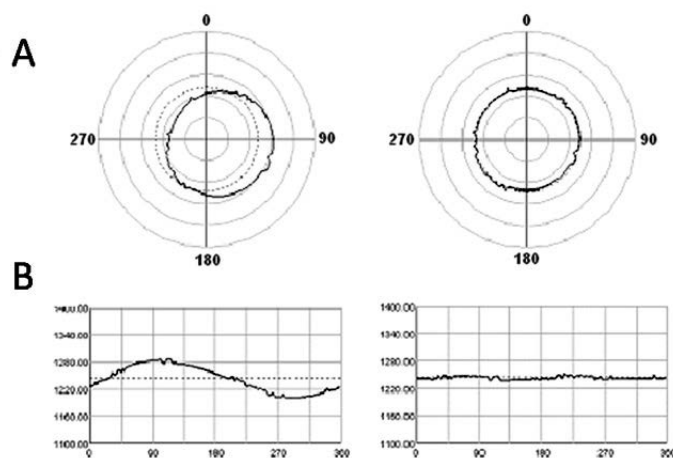


Figura A2- 6. A) Secciones transversales de los datos de *Travel Time* no centralizados (izquierda) y después de haber aplicado el proceso de centralizado (derecha). B) Las mismas secciones, en transversal.

El siguiente paso es, si se desconoce, calcular la velocidad del fluido (Figura A2-7). Se introduce el valor del diámetro conocido en dos puntos (profundidades) a lo largo del intervalo registrado (por ejemplo el diámetro de la entubación y una sección del sondeo de diámetro conocido). El diámetro de la sonda tiene por valor 19 mm, y como valor de *Travel Time* se toma el valor obtenido del proceso de centralizado calculado previamente. El parámetro *Time Window* se obtiene directamente del registrado por la sonda (*Wnd Time* en la Figura A2-7) en el momento de la adquisición.

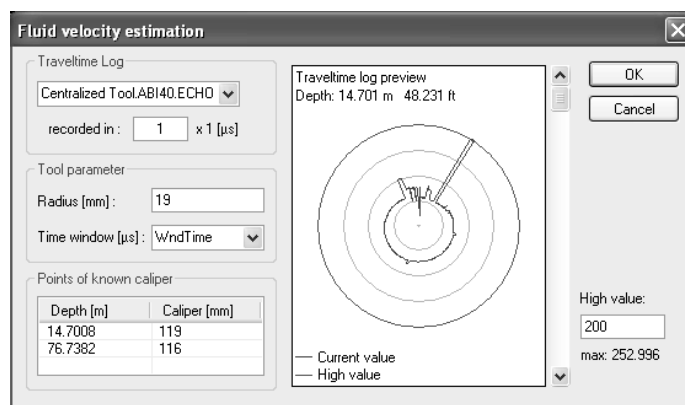


Figura A2- 7. Estimación de la velocidad de fluido a partir del registro de imagen acústica.

Obtenida ya la velocidad del fluido, y conociendo el tiempo que tarda en viajar la señal dentro de la sonda, se utiliza el dato del *Travel Time* restante para calcular la distancia entre la carcasa de la sonda y la pared del sondeo, es decir, a través del fluido. Añadiendo a esta distancia el ya conocido radio de la sonda, obtenemos finalmente el radio del sondeo. El programa permite construir un modelo 3D del sondeo, cuyo color viene definido por los valores del registro de amplitud (Figura A2-8).

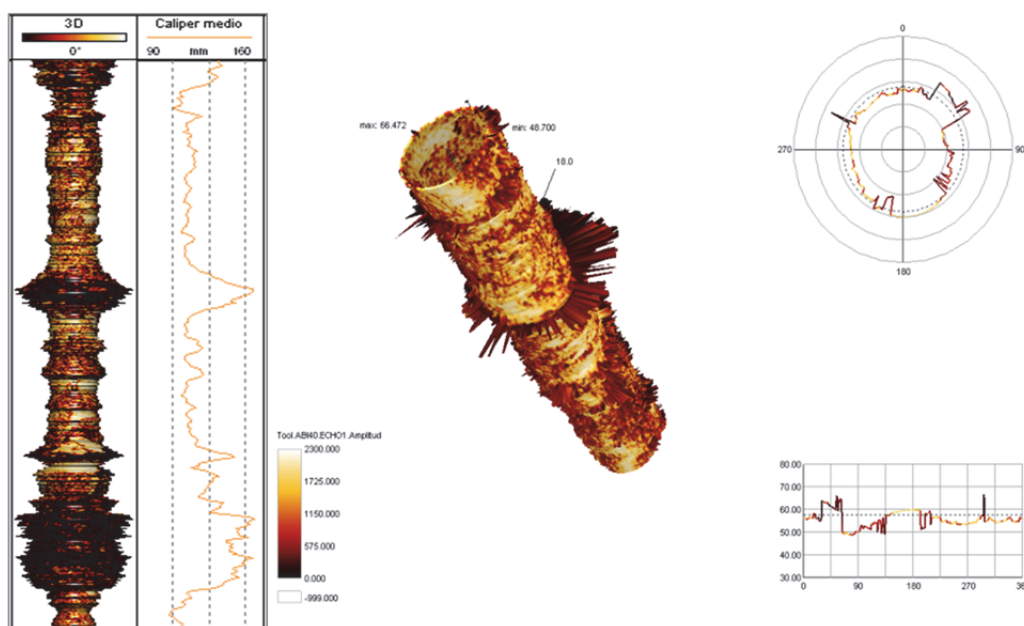


Figura A2- 8. Ejemplo de registro acústico (izquierda) y su visualización 3D (derecha). En la imagen 3D se aprecia una sección transversal del sondeo (margen derecho superior) y la sección planar correspondiente (margen derecho inferior), además de una escala de amplitudes (margen izquierdo inferior).

La visualización tridimensional del sondeo permite identificar con mayor facilidad zonas de fracturas, plegamientos, zonas caídas de la pared, e incrementos o disminuciones del diámetro del sondeo.

ANEXO III
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE
DIFRACCIÓN DE RAYOS X

RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN EL SONDEO SE-4

Tabla A3- 1. Resultados de DRX en las muestras analizadas del sondeo SE-4. (*) La clasificación no resulta concluyente al no aparecer reflejadas en el difractograma todas las reflexiones características de la especie mineral.

Muestra	Minerales Principales	Minerales Secundarios	Accesorios (<1% del total) y Trazas (<0.01% del total)
MARB-1S	Yeso	Calcita, Basanita	Grafito (*)
MARB-2S	Yeso, Cuarzo, Dolomita	Calcita, Anhidrita	Feldespato K, Mica
MARB-3S	Cuarzo, Dolomita	Yeso	Feldespato K, Mica, Hematites
MARB-4S	Cuarzo	Dolomita	Feldespato K, Mica, Hematites
MARB-8S	Cuarzo	Yeso, Mica	Dolomita, Feldespato K, Hematites
MARB-7A	Cuarzo	Dolomita	Feldespato Na (Albita)
MARB-19A	Cuarzo	Dolomita	Feldespato Na (Albita)

RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN EL SONDEO REUS-1

Tabla A3- 2. Resultados obtenidos de los ensayos de muestras en polvo mediante DRX para el tramo estudiado del sondeo Reus-1. (*) La clasificación no resulta concluyente al no aparecer reflejadas en el difractograma todas las reflexiones características de la especie mineral.

Muestra	Minerales Principales	Minerales Secundarios	Accesorios (<1% del total) y Trazas (<0.01% del total)
MREUS-1	Dolomita	Yeso	Cuarzo, M. A. (Mica)
MREUS-2	Yeso	Dolomita, Cuarzo, M.A. (Mica, Clorita)	Feldespato K, Calcita, Hematites, Anhidrita (*)
MREUS-3	Yeso, Cuarzo	Dolomita, M.A. (Mica, Clorita)	Feldespato K, Hematites, Calcita (*), Anhidrita (*)
MREUS-4	Yeso	Dolomita, Cuarzo, M.A. (Mica, Clorita)	Feldespato K, Hematites, Anhidrita
MREUS-5	Yeso	Dolomita, Cuarzo	M.A. (Mica, Clorita*), Feldespato K, Calcita, Anhidrita (*)
MREUS-6	Yeso	Anhidrita, Dolomita	Calcita, Cuarzo, M.A. (Mica*)
MREUS-7	Dolomita	Yeso, Cuarzo	Calcita, M.A. (Mica, Esmeclita*)

RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN EL SONDEO SB-4

Tabla A3- 3. Resultados obtenidos de los análisis mediante DRX de muestras en polvo pertenecientes al sondeo SB-4.

(*) La identificación no resulta concluyente al no aparecer reflejadas en el difractograma todas las reflexiones características de la especie mineral.

Muestra	Minerales Principales	Minerales Secundarios	Accesorios (<1% del total) y Trazas (<0.01% del total)
MBAC-2S	Calcita, Cuarzo	Ankerita	Mica, Pirita (*)
MBAC-4S	Calcita	Cuarzo, Ankerita, Dolomita	Mica, Pirita (*)
MBAC-8S	Calcita	Cuarzo, Ankerita, Dolomita	Mica, Pirita (*)
MBAC-18A	Calcita	Ankerita	Cuarzo (*)
MBAC-28A	Calcita	Ankerita	Cuarzo (*)

RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN EL SONDEO SE-3

Tabla A3- 4. Resultados obtenidos del análisis de DRX en el sondeo SE-3. (*) La identificación no resulta concluyente al no aparecer reflejadas en el difractograma todas las reflexiones características de la especie mineral.

Muestra	Minerales Principales	Minerales Secundarios	Accesorios (<1% del total) y Trazas (<0.01% del total)
MORR-3S	Calcita, Cuarzo	M.A. (Mica, Clorita, Caolín, Esmeclita*)	Plagioclasa, Goethita
MORR-6S	Calcita, Cuarzo	M.A. (Mica, Clorita, Caolín, Esmeclita)	Plagioclasa, Goethita
MORR-12S	Calcita, Cuarzo	M.A. (Mica, Clorita, Caolín, Esmeclita)	Plagioclasa, Goethita
MORR-17S	Calcita, Cuarzo	M.A. (Mica, Clorita, Caolín, Esmeclita)	Plagioclasa, Goethita
MORR-20S	Calcita, Cuarzo	M.A. (Mica, Clorita, Caolín, Esmeclita)	Plagioclasa, Pirita
MORR-25A	Calcita, Cuarzo	Dolomita	-?
MORR-26A	Calcita	Cuarzo	Goethita, M.A. (Caolín*)

RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN SONDEO SB-1

Tabla A3- 5. Resultados obtenidos de los análisis mediante DRX en el sondeo SB-1. (*) La identificación no resulta concluyente al no aparecer reflejadas en el difractograma todas las reflexiones características de la especie mineral.

Muestra	Minerales Principales	Minerales Secundarios	Accesorios (<1% del total) y Trazas (<0.01% del total)
MALCA-4S	Yeso	Magnesita	Cuarzo, M.A. (Mica)
MALCA-5S	Yeso	Magnesita	Cuarzo, M.A. (Mica)
MALCA-11S	M.A. (Mica, Clorita)	Cuarzo, Magnesita	Yeso, Feldespato K(*)
MALCA-14S	M.A. (Mica, Clorita)	Cuarzo, Magnesita	Feldespato K(*), Plagioclasa*, Bernalita*
MALCA-15S	Yeso	M.A. (Mica)	Magnesita, Cuarzo (*)
MALCA-16S	M.A. (Mica)	Cuarzo	Yeso, Feldespato K
MALCA-29S	Magnesita	Yeso, Calcita	Cuarzo, M.A. (Mica)
MALCA-8A	Yeso	Cuarzo, M.A. (mica)	Plagioclasa
MALCA-9A	M.A. (mica)	Cuarzo	Feldespato K, Plagioclasa
MALCA-21A	Cuarzo	M.A. (mica)	Plagioclasa, Feldespato K, Yeso, Hematites

RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN SONDEO SB-3

Tabla A3- 6. Resultados obtenidos del análisis mediante DRX en muestras tomadas en SB-3. (*) La identificación no resulta concluyente al no aparecer reflejadas en el difractograma todas las reflexiones características de la especie mineral, y ser sus intensidades muy bajas.

Muestra	Minerales Principales	Minerales Secundarios	Accesorios (<1% del total) y Trazas (<0.01% del total)
M-CANT-3A	Cuarzo, Plagioclasa	Arcillas (Mica, Clorita*)	Feldespato K, Bernalita*
M-CANT-5A	Cuarzo, Plagioclasa	Feldespato K	Arcillas: Mica, Clorita*, Calcita*
M-CANT-7A	Cuarzo	Plagioclasa, Feldespato K	Arcillas: Mica, Esmeclita*
M-CANT-9A	Cuarzo	Plagioclasa	Feldespato K, Arcillas: Mica, Clorita

RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN EL SONDEO SD-4

Tabla A3- 7. Resultados obtenidos de los análisis mediante DRX en el sondeo SD-4. (*) La identificación no resulta concluyente al no aparecer reflejadas en el difractograma todas las reflexiones características de la especie mineral, y ser sus intensidades muy bajas.

Muestra	Minerales Principales	Minerales Secundarios	Accesorios (<1% del total) y Trazas (<0.01% del total)
M-GIJ-5S	Calcita	-	Cuarzo, M.A.(Mica, Clorita), Pirita, Plagioclasa (*)
M-GIJ-7S	Calcita	-	Cuarzo, M.A.(Mica, Clorita), Pirita, Plagioclasa (*)
M-GIJ-11S	Calcita	-	Cuarzo, M.A.(Mica), Plagioclasa (*)
M-GIJ-15S	Calcita	-	Cuarzo, M.A.(Mica), Plagioclasa (*)
M-GIJ-16A	Calcita	Dolomita, Ankerita	Cuarzo, M.A.(Mica), Plagioclasa (*)
M-GIJ-27A	Dolomita	-	-
M-GIJ-33A	Dolomita	-	Cuarzo, Feldespato K, M.A.(Mica), Yeso, Pirita (*)
M-GIJ-34A	Dolomita	-	Cuarzo