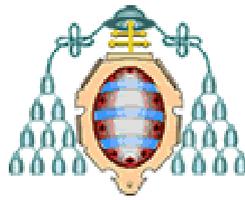


UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Geología



Tesis Doctoral

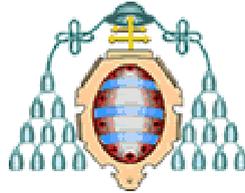
**Petrofísica de la roca matriz del acuífero costero de Campos
(Mallorca): Funcionalidad hidráulica de su porosidad.**

Félix Javier Mateos Redondo

2011

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Geología



**“PETROFÍSICA DE LA ROCA MATRIZ DEL ACUÍFERO
COSTERO DE CAMPOS (MALLORCA): FUNCIONALIDAD
HIDRÁULICA DE SU POROSIDAD”**

Memoria que presenta

Félix Javier Mateos Redondo

Para optar al grado de Doctor por la Universidad de Oviedo

DIRECTORES DE TESIS:

Rosa M^a Esbert Alemany
Modesto Montoto San Miguel

Oviedo, Julio de 2011



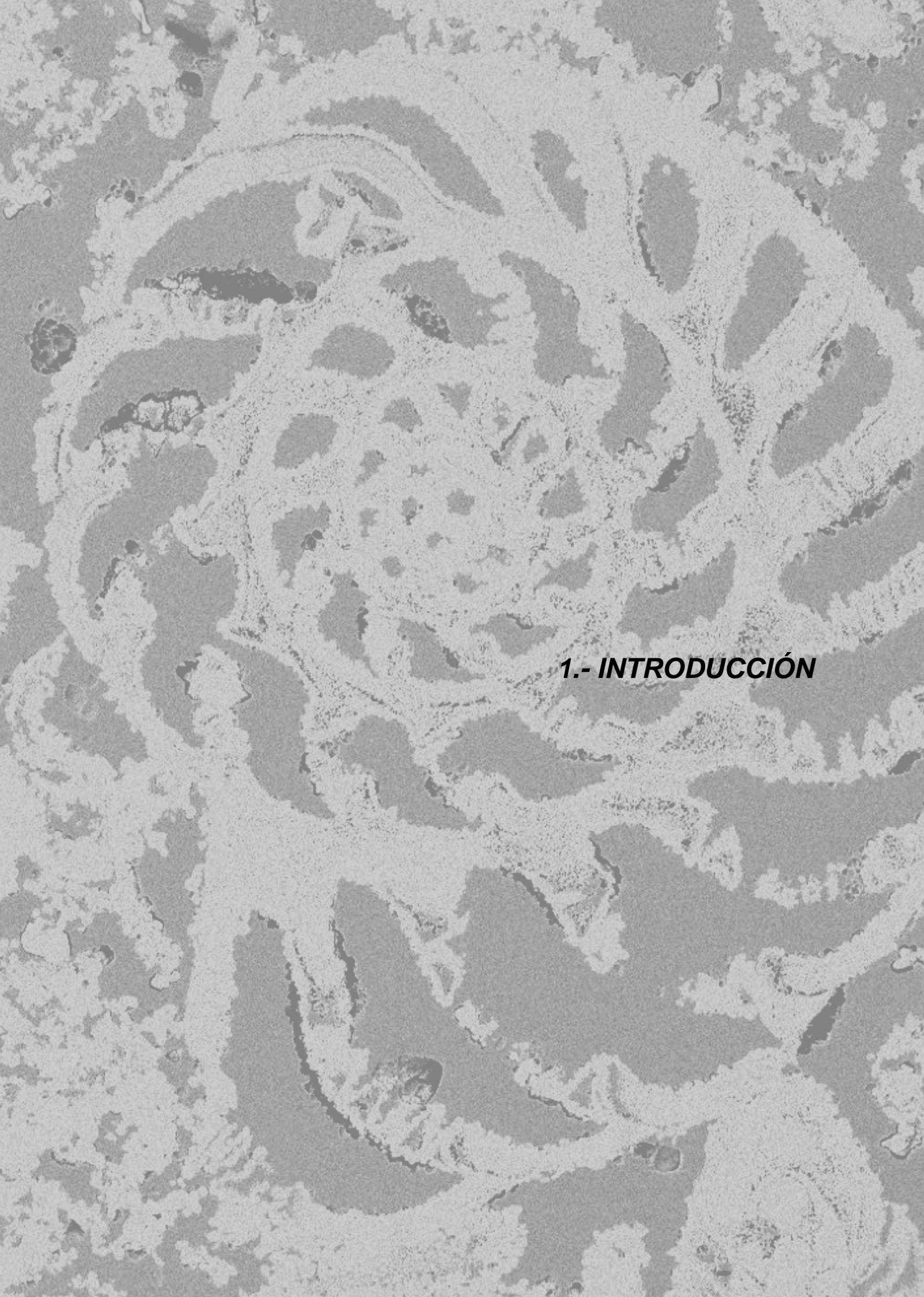
INDICE DE CONTENIDOS

1.- Introducción	3
1.1.- Antecedentes	5
1.2.- Objetivos	9
1.3.- Estructura del trabajo	10
2.- Marco geológico del área estudiada	15
2.1.- Geología regional	17
2.2.- Geología del acuífero costero de Campos	19
2.2.1.- La plataforma arrecifal de Lluçmajor	20
2.2.2.- Campo de ensayos de Ses Sitjoles	22
2.2.2.1.- Labores de reconocimiento	22
2.2.2.2.- Geología del campo de ensayos	24
3.- Muestreo	29
4.- Caracterización petrofísica de la roca matriz	37
4.1.- Heterogeneidad y anisotropía de la roca matriz	39
4.1.1.- Introducción y metodología	39
4.1.2.- Resultados obtenidos	42
4.2.- Propiedades hidráulicas de la roca matriz	53
4.2.1.- Introducción y metodología	54
4.2.2.- Equipos automatizados de medición de propiedades hidráulicas	60
4.2.3.- Resultados obtenidos	65
4.3.- Estudio petrográfico	88
4.3.1.- Introducción y metodología	89
4.3.2.- Petrografía de las rocas carbonatadas	93
4.3.2.- Composición química	138
4.4.- Caracterización del sistema poroso	141
4.4.1.- Introducción	141
4.4.2.- Metodología	151
4.4.3.- Resultados obtenidos	156

5.- Interpretación petrofísica de los resultados obtenidos	177
5.1.- Propiedades dinámicas	179
5.1.1.- Velocidad de propagación vs porosidad total	179
5.1.2.- Velocidad de propagación vs densidad aparente	181
5.1.3.- Anisotropía y heterogeneidad	182
5.2.- Funcionalidad hidráulica	184
5.2.1.- Absorción libre y forzada de agua vs porosidad	184
5.2.2.- Grado de saturación vs configuración sistemas porosos	187
5.2.3.- Permeabilidad vs configuración sistemas porosos	200
6.- Porosidad obtenida a partir de logging	203
6.1.- Introducción y metodología	205
6.2.- Resultados obtenidos	212
6.3.- Correlación entre porosidad de logging vs laboratorio	213
7.- Conclusiones	221
8.- Bibliografía	227

ANEXOS

I.- CD-ROM: Documentación petrofísica: Archivo de datos multimedia con los resultados obtenidos en los materiales carbonatados (Campos-Mallorca)



1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Antecedentes

Aproximadamente el 50 % del agua dulce de la superficie terrestre (ríos y lagos) o próxima a ésta (aguas subterráneas), se encuentra sobreexplotada por las actividades humanas, estando estas últimas especialmente amenazadas en áreas urbanas o semiáridas, con máximo peligro en zonas costeras, donde se concentra más del 60 % de la población mundial (World Bank, 2004).

Como principal abastecimiento para agua de consumo humano, este estratégico pero vulnerable recurso, es de vital importancia en estas áreas próximas al mar, donde las intrusiones salinas detectadas en muchos de estos acuíferos costeros, tanto de origen natural como de origen antropogénico, están directamente relacionadas con sobreexplotaciones debido a usos agrícolas (Masiyandima *et al.*, 2002; Scott y Shah, 2004; Al Suleimani y Wohaibi, 2006; Adepelumi *et al.*, 2008), las altas densidades de población (Calvache y Pulido-Bosch, 1997), y los efectos de las sequías en regiones áridas.

Mientras algunos de los procesos y fenómenos físicos clásicamente asociados a las intrusiones salinas (Custodio y Llamas, 1976; Volter y Rushton, 1982; Custodio y Llamas, 1983; Bear y Verruijt, 1987; Voss y Souza, 1987) se encuentran desde hace años en discusión, se necesitan numerosos datos de campo y de laboratorio, que permitan desarrollar modelos capaces de predecir y monitorizar a medio y largo plazo la vulnerabilidad y/o sostenibilidad de los recursos hídricos del subsuelo.

En los últimos años, diversos proyectos europeos de investigación (SALTRANS-EVK1-CT-2000-00062; TRACE-FRACTURE-EKV1-CT-1999-00013; ALERT-505329; MEDITATE-509112; ALIANCE-EKV1-CT-2001-00091; SWIMED-ICA3-CT-2002-10004; CRYSTECHSALIN-EVK1-CT-2000-00055; IMVUL-212298; IC18960122, IC18960048 e IC20960019 del programa INCO de la EC; ENV4950156 del programa ENV 2C de la EC, etc.), así como numerosos autores (Naji *et al.*, 1999; Sakr, 1999; Oude, 2001; Gemitzi, 2002; Toledo, 2002; Masciopinto, 2006; Gemitzi y Tolikas, 2007, etc.), han comenzado a abordar esta problemática, trabajando fundamentalmente en mejorar los aspectos teóricos, generar modelos cuantitativos, diseñar nuevas herramientas de control y monitorización de las intrusiones salinas, desarrollar nuevas tecnologías que permitan prevenir o minimizar éstas, etc.

El presente trabajo se encuentra englobado dentro del proyecto ALIANCE (Advanced Logging Investigations of Aquifers in Coastal Environments, with application to salt intrusion processes), financiado por la Unión Europea (EKV1-CT-2001-00091) y que ha contado con la participación de España, Francia, Suiza, Reino Unido y Luxemburgo. El principal objetivo de este proyecto europeo ha sido desarrollar, integrar y valorar un conjunto de nuevas herramientas geofísicas, métodos y mejoras científicas, que permitan obtener una mejor descripción de los acuíferos y de los parámetros del fluido en el subsuelo, mejorando así, el conocimiento y monitorización de los procesos de intrusión salina asociados a estos acuíferos costeros.

De los dos acuíferos costeros utilizados como campos de ensayo en el citado proyecto, “Ploemeur” en la Bretaña Francesa y “Ses Sitjoles” próxima a la localidad mallorquina de Campos, ha sido en este último en el que se ha centrado la presente Tesis Doctoral, por ser su casuística muy similar a los problemas que una parte importante de los acuíferos de las costas mediterráneas españolas, están sufriendo en la actualidad o son susceptibles de sufrir a corto y medio plazo.

Al igual que cualquier otro planteamiento de ingeniería del terreno, el comportamiento hidráulico de un acuífero viene condicionado por la superposición de dos escalas o sistemas claramente separables; la escala de macizo y la escala de roca matriz o “intact rock” (Noetinger y Estebenet, 2000; Montoto, 2003).

A nivel de macizo y a corto plazo, la circulación de agua dentro de un acuífero está controlada fundamentalmente por sistemas de cavidades interconectadas, niveles cársticos ó grandes fracturas, que van desde decenas de decímetros a decenas de kilómetros de longitud. La caracterización de estos sistemas hidráulicamente activos se realiza fundamentalmente mediante técnicas geofísicas superficiales; tomografía eléctrica, sísmica de reflexión y refracción, georadar, etc. (Barker, 1996; Sanz Pérez, 1996; Barker y Moore, 1998; Zhou, 1999; Morales y Castillo, 2000; Sankar *et al.*, 2000; Aracil, 2001; Mendieta, 2001; Sree Devi, 2001; Aracil *et al.*, 2003, 2004; Assaad *et al.*, 2004; Jorreto *et al.*, 2005; Todd y Mays, 2005; Meléndez *et al.*, 2007; Ogilvy *et al.*, 2009; Nguyen *et al.*, 2009; Adeoti, 2010). En los últimos años son importantes los avances en el campo de la exploración indirecta de aguas subterráneas mediante la utilización de satélites (Pettyjohn, 1979; Schultz y Engman, 2000; Rodell y Famiglietti, 2002; Ahmed *et al.*, 2005; Brunner *et al.*, 2007, etc.).

Por el contrario, los complejos sistemas de espacios vacíos que forman parte de la roca matriz (cm- μ m) van a controlar a medio y largo plazo, la capacidad de almacenamiento de dichos acuíferos y la movilidad del agua en su seno (Glass, 1996; Worthington, 2000). El estudio detallado de la configuración de estos sistemas es una tarea lenta y compleja, que fundamentalmente se lleva a cabo en el laboratorio sobre testigos de roca extraídos en sondeos a rotación (Guéguen y Palciauskas, 1992, 1994; Sahimi, 1995; Moore, 2001; Montoto, 2003; Tiab y Donaldson, 2004; Braithwaite, 2005; Lucía, 2007; Zinszner y Pellerin, 2007; etc.), formando parte de lo que se ha dado en conocer como “petrofísica de la roca matriz”.

En este trabajo de Tesis Doctoral, bajo dicha denominación se incluye el estudio de dos tipos de propiedades físicas concretas (hidráulicas y dinámicas), y su interpretación en término de sus componentes petrográficos con significado petrofísico: poros, fisuras, uniones intergranulares, anisotropía, alteración, composición química y mineralógica, etc. (Montoto, 1978a, 1981f, 1983; Siegesmund *et al.*, 1993; Vollbrecht *et al.*, 1994; Schild *et al.*, 2001; Montoto, 2003; etc.).

Las clasificaciones petrográficas clásicamente utilizadas, con un marcado matiz petrogenético (composición mineralógica, fábrica, condiciones de campo), son difícilmente aplicables desde un punto de vista petrofísico, al no tener en cuenta los componentes petrográficos de mayor significado petrofísico, que condicionan notablemente los valores de algunas de las propiedades físicas de las rocas. Por ello, la clasificación propuesta por Duncan (1969) es ampliamente utilizada en el campo de la petrofísica. Basada principalmente en el carácter de los contactos de sus componentes sólidos, e indirectamente en la relación existente entre sólido y espacios vacíos, divide las rocas en cinco tipos, cuyos extremos corresponden con los términos de roca cristalina y roca cementada.

Las rocas cristalinas se caracterizan por la presencia de espacios vacíos tipo fisura, que le confieren a la roca valores de porosidad total muy bajos, raramente superiores al 1-2 % del volumen rocoso, cuando se trata de rocas inalteradas. Por el contrario, los poros son el tipo dominante de espacios vacíos presentes en las rocas cementadas. En este caso, los valores de porosidad total, mucho más variables, pueden alcanzar valores muy superiores, que en algunos casos pueden situarse alrededor del 30-40 % del volumen rocoso.

Como consecuencia, el movimiento del agua a través de la roca matriz de rocas cristalinas o fisuradas, está principalmente restringida a la red microfractográfica abierta o comunicada, lo que se traduce en bajo valores de velocidad y volumen del agua circulante. En las rocas cementadas o porosas, el comportamiento es muy diferente. La cinética de los procesos de circulación del agua es en general mucho más rápida, siendo además los volúmenes de agua involucrados mucho mayores. En este caso, el movimiento del agua en el seno de la roca matriz está gobernado por la configuración del sistema poroso, jugando un papel fundamental tanto los poros propiamente dichos como los conductos que unen éstos.

Los procedimientos utilizados para caracterizar, cuantificar y visualizar los distintos componentes con significación petrofísica y las vías de circulación de agua a través del seno rocoso, han sido ampliamente abordados por muy diversos campos aplicados de la geología desde la década de los 70 hasta la actualidad (hidrocarburos, almacenamiento geológico de CO₂, gas y residuos radioactivos, conservación de patrimonio histórico construido en piedra, ingeniería civil, roca ornamental, etc.), y por numerosos autores: Allman y Lawrence, 1972; NASA, 1973; Hutchison, 1974; ISRM, 1978; Montoto *et al.*, 1980; Brown, 1981; Montoto *et al.*, 1984b; Alonso *et al.*, 1986; Raynaud *et al.*, 1989; Hellmuth *et al.*, 1990; Zimmerle, 1991; Humphries, 1992; Valdeón *et al.*, 1992; Zimmerman *et al.*, 1992; Hellmuth *et al.*, 1993; Zimmerle, 1993; Zamora *et al.*, 1994; Humphrey *et al.*, 1996; Montoto, 1996f; Möri *et al.*, 1996; Rasilainen *et al.*, 1996; Siegesmund, 1996; Siitari-Kauppi, 1996; Valdeón *et al.*, 1996; Esbert *et al.*, 1997; Klobes *et al.*, 1997a, b; Siitari-Kauppi *et al.*, 1997; Winkler, 1997; ASTM, 1998; Esbert *et al.*, 1998; Mosquera *et al.*, 1998; Siitari-Kauppi *et al.*, 1998; Hellmuth *et al.*, 1999; Rasolofosaon *et al.*, 1999; ASTM, 2000; Chen *et al.*, 2000; Pérez *et al.*, 2001; Pusch, 2001; Schild *et al.*, 2001; Roberts, 2002; Carlson *et al.*, 2003; Hardy, 2003; Van Geet *et al.*, 2003; Ketcham e Iturrino, 2004; Montoto *et al.*, 2004; Moura *et al.*, 2004; Montoto y Mateos, 2006; Lähdemäki *et al.*, 2007; Mateos *et al.*, 2009, etc.

Las dos escalas de trabajo anteriormente citadas -escala de macizo y escala de roca matriz- pueden ser abordadas conjuntamente mediante la realización de campañas geofísicas asociadas a sondeos, dentro de lo que se ha dado a conocer como "logging" (Jordan y Campbell, 1984, 1986; Rider, 1986; Labo, 1987; Asquith y Krygowski, 2004; Bassiouni, 1994). Así, la ejecución de perfiles sínicos (acústicos),

eléctricos, nucleares, etc., han sido llevados a cabo dentro del proyecto ALIANCE, punto de partida del presente trabajo. Sin embargo, el grado de precisión a escala de roca matriz que se obtiene mediante estas técnicas geofísicas es limitado, no permitiendo discriminar el papel hidráulico que ejercen los diferentes tipos de porosidad y, mostrando además frecuentes errores asociados a los artefactos generados durante la ejecución de los sondeos.

Por ello, a día de hoy, es estrictamente necesaria la caracterización petrofísica en el laboratorio de los materiales geológicos que constituyen un acuífero, consiguiendo la adecuada calibración de las herramientas geofísicas a utilizar y, obteniendo una buena base de correlación y una serie de parámetros complementarios, que permitan la correcta modelización del comportamiento hidráulico del acuífero costero, en lo que a movilidad del agua y capacidad de almacenamiento se refiere. En este último punto, uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta de cara a su correcta cuantificación, es la integración de los datos a escala de macizo, con los datos de porosidad a escala de roca matriz, ya que estos últimos ejercen un dominante control sobre los volúmenes existentes en el acuífero.

1.2.- Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo es caracterizar desde un punto de vista petrofísico y a escala de roca matriz, cada una de las unidades geológicas (litofacies) presentes en el acuífero costero de Campos (Mallorca).

Para alcanzar este objetivo, es preciso conocer detalladamente la configuración de los sistemas porosos de cada una de estas unidades, ya que éstas representan las vías de circulación y almacenamiento del agua dentro del acuífero. Es fundamental por lo tanto, caracterizar la porosidad abierta efectiva y no efectiva, porosidad total y porosidad cerrada, ésta última, de vital importancia a la hora de calibrar las herramientas geofísicas basadas en la emisión de ondas sínicas; de este modo se podrá realizar una interpretación hidráulica más realista del papel que juega la porosidad de la roca.

Otro de los objetivos del presente trabajo, ha sido establecer una comparativa entre los datos obtenidos en el laboratorio sobre testigos de sondeo y los datos geofísicos obtenidos para ese mismo sondeo ("logging"). Esta comparativa ha contribuido a la optimización de las herramientas geofísicas desarrolladas en el proyecto ALIANCE, ámbito en el cual se ha desarrollado esta Tesis Doctoral. De la misma manera, estos ajustes y la aportación de nuevos parámetros, contribuirán directamente a la correcta modelización del acuífero costero de Campos.

Conocidas las posibles vías de circulación y almacenamiento del agua, es necesario mejorar el conocimiento de su cinética en cada ámbito petrofísico particular, es decir, obtener información de la mayor o menor facilidad de ésta para ser extraída, moverse o quedar almacenada dentro los sistemas porosos. Es por tanto preciso determinar la respuesta de cada uno de estas unidades frente al agua. Se han optimizado los ensayos de las propiedades hidráulicas de las rocas, mediante la utilización de equipos de medición automatizados, que permiten además utilizar muestras procedentes de sondeos de hasta 25 cm de longitud y 10 cm de diámetro, con lo que los volúmenes utilizados han sido representativos, y comparables en cualquier caso con los datos obtenidos en la geofísica asociada a los sondeos.

Finalmente, la gran cantidad de información obtenida durante la caracterización petrofísica de las distintas unidades geológicas, ha planteado como nuevo objetivo, su correcta documentación, mediante la elaboración de un archivo de datos multimedia, donde de una manera clara, rápida y sencilla, se pueda acceder a toda la información obtenida. Es mi deseo, que este archivo multimedia que aparece presentado en formato CD-ROM, sirva de precedente como sistema de intercambio de la información en este tipo de proyectos.

1.3.- Estructura del trabajo

Junto al capítulo actual, donde se recogen los antecedentes, objetivos y estructura de la presente Tesis Doctoral, ésta se encuentra dividida en otros 8 capítulos.

El segundo capítulo recoge las características geológicas de la isla de Mallorca, área donde se ubica el acuífero costero de Campos. Se describen geológicamente las

principales unidades geológicas existentes, así como, de una manera mucho más detallada, las litofacies presentes en el acuífero, deducidas de los sondeos realizados en el campo de ensayos de Ses Sitjoles (Mallorca).

El tercer capítulo describe la estrategia seguida en la toma de muestras llevada a cabo a partir de uno de los sondeos a rotación con recuperación de testigo, ejecutado y testificado en el campo de ensayo descrito en el capítulo anterior. Se procede a la catalogación de las muestras seleccionadas y al exhaustivo control del muestreo sistemático realizado y de los tipos de ensayos que se realiza a partir de cada uno de los testigos de sondeo muestreado.

El cuarto capítulo, el de mayor extensión de esta tesis, entra de lleno en la caracterización petrofísica a escala de roca matriz, de las distintas litofacies establecidas dentro del acuífero costero de Campos. En primer término, se analiza la heterogeneidad y anisotropía de las mismas. Este estudio ha sido de vital importancia a la hora de planificar algunos de los análisis posteriormente realizados, ya que representan el punto de partida para establecer correctamente el número y la posición de las diferentes preparaciones a realizar, de cara a posteriores estudios microscópicos, hidráulicos, porométricos, etc. Este análisis de la heterogeneidad y anisotropía se ha realizado procediendo a la evaluación, longitudinalmente a los testigos y según diferentes direcciones del espacio, de la velocidad de propagación de ondas P.

En segundo término, dentro de este capítulo cuarto, se sintetizan los resultados obtenidos en los ensayos hidráulicos llevados a cabo, a diferentes escalas, sobre cada uno de los testigos muestreados, que globalmente aportan una información fiable sobre la mayor o menor facilidad del agua para moverse y/o almacenarse en el seno de las distintas litofacies estudiadas. Estos ensayos, sobre la cinética del agua en el seno de la roca matriz, han sido llevados a cabo principalmente mediante equipos automatizados y computerizados (AUTOSORC), que en su conjunto, ofrecen una serie de ventajas frente a los tradicionales ensayos normalizados. Junto a la densidad y los distintos tipos de porosidad, se han determinado entre otros, la capacidad de absorción y desorción, la capilaridad y la permeabilidad.

El capítulo cuarto continúa con una sintética y gráfica descripción petrográfica de las distintas muestras de sondeo obtenidas para cada una de las litofacies estudiadas. Se presta, obviamente, especial atención al tipo de espacios vacíos presentes, así como, a las posibles fases minerales que aparecen ocupando parcial o totalmente estos espacios a modo de cemento, rellenos, mineralizaciones. El resto de la información petrográfica (micrografías, difractogramas, análisis químicos elementales, etc.) aparecen en el archivo de datos multimedia que recoge toda la documentación petrofísica obtenida en el presente trabajo (Anexo I).

El capítulo cuarto termina con el análisis de la configuración de los sistemas porosos presentes en las distintas litofacies definidas dentro del campo de ensayos de Ses Sitjoles, ubicado en la plataforma arrecifal de Lluçmajor (Mallorca). Partiendo del análisis de los perfiles de porosidad obtenidos mediante “logging”, se lleva a cabo un análisis exhaustivo, a escala de roca matriz, de los testigos de sondeo obtenidos en las campañas de campo, estableciéndose los distintos tipos de porosidad, tanto desde un punto de vista genético (móldica, intergranular, etc.) como desde un punto de vista de su respuesta frente al agua (abierta, efectiva, cerrada, etc.).

Se presta la máxima atención al estudio de la estructura del sistema poroso, determinando, para ello, las distribuciones de los tamaños de poros y de los radios de acceso que unen los mismos, aspecto éste último de vital importancia para conocer tanto la capacidad de flujo como de almacenamiento de agua de la roca.

El quinto capítulo se centra en la interpretación petrofísica de los resultados anteriormente obtenidos, y muy especialmente en comprender los bajos de valores de saturación en agua que muestran la mayor parte de los testigos estudiados. Se incide en determinar cual/es de los componentes petrográficos con significado petrofísico a escala de roca matriz, ejerce un mayor control sobre la cinética del agua dentro de estas rocas carbonatadas, intentando correlacionar los datos de velocidad de propagación de ondas P, valores de porosidad abierta (efectiva y no efectiva) y cerrada, y la distribución de tamaños y volumen de los conductos que unen dichos poros, tortuosidad, conectividad, etc.

En el sexto capítulo de esta tesis se aborda la temática de los datos de porosidad obtenidos mediante técnicas geofísicas asociadas a sondeos “logging”. Partiendo de la

descripción de aquellas técnicas geofísicas utilizadas en el campo de ensayos de Ses Sitjoles para la determinación de la porosidad, este capítulo aborda un estudio comparativo entre los datos de porosidad obtenidos en los capítulos 4 y 6 respectivamente, es decir, entre los valores de porosidad determinados en el laboratorio a partir de los testigos de sondeo, y los obtenidos directamente en el subsuelo mediante el uso de sondas geofísicas asociadas a sondeos (“logging”). Se presta especial atención a todos aquellos aspectos, donde se hacen necesarios la realización de ensayos de laboratorio para ajustar correctamente los perfiles geofísicos obtenidos, fundamentalmente en lo que a valores de porosidad abierta efectiva y no efectiva se refiere.

El séptimo capítulo presenta las conclusiones obtenidas a lo largo de la presente Tesis Doctoral, planteándose además la idoneidad de las técnicas geofísicas asociadas a sondeos (“logging”) desarrolladas a lo largo del proyecto ALIANCE

La bibliografía consultada a largo de esta Tesis Doctoral aparece recogida en el capítulo 8.

Finalmente, se ha documentado el importante volumen de información obtenida durante la caracterización petrofísica de las distintas litofacies, mediante la elaboración de un archivo multimedia. Éste aparece recogido en el CD-ROM que acompaña la presente Tesis Doctoral (Anexo I).



2.- MARCO GEOLÓGICO

2.1.- Geología regional

La estructura geológica de la isla de Mallorca, es el resultado de una compleja evolución paleogeográfica, que se puede sintetizar en tres etapas fundamentales: una etapa extensiva, previa a la colisión entre África y Europa, que tiene lugar durante el Mesozoico, una etapa de colisión Oligoceno-Mioceno y, una etapa extensiva durante el Neógeno (Gelabert, 1998).

La interacción de estas tres etapas ha dado como resultado un conjunto de horsts y grabens, que se disponen de manera alternativa dando lugar a las sierras y llanos que actualmente conforman la actual orografía de la isla (Gelabert y Sàbat, 2002). De sureste a noroeste se diferencian: la sierra de Levante, la cuenca de Campos, las sierras Centrales, las cuencas de Palma, Inca y Sa Pobla, y la sierra de Tramontana (Figura 2.1).

Esta estructura global a modo de horsts y grabens viene dada por la presencia de grandes fallas normales lístricas de edad Mioceno Superior, de orientación NE-SO, que pueden llegar a alcanzar desplazamientos kilométricos.

Los horsts se corresponden con las sierras, las cuales constituyen segmentos de un cinturón de pliegues y cabalgamientos del Mioceno Inferior. La estructura geológica consiste básicamente en un sistema imbricado de cabalgamientos con vergencia hacia el NO. Las láminas cabalgantes presentan una serie estratigráfica que comprende esencialmente las arcillas y margas del Keuper (Triásico Superior), las dolomías del Retiense (Triásico Superior), las calizas masivas del Lias, y las calizas margosas y margas del Jurásico Medio-Superior y del Cretácico (Gelabert, 1998).

Los grabens constituyen las cubetas que están rellenas por sedimentos del Mioceno Superior y Cuaternario. La estructura general es una disposición subhorizontal del relleno sedimentario (desde el Mioceno Superior hasta el Cuaternario). Estratigráficamente se pueden distinguir calizas (Mioceno Superior), calcarenitas (Pleistoceno) y terrígenos (Cuaternario). Por debajo de estas cubetas se encuentra la continuación de pliegues y cabalgamientos que afloran en las sierras (Gelabert 1998).

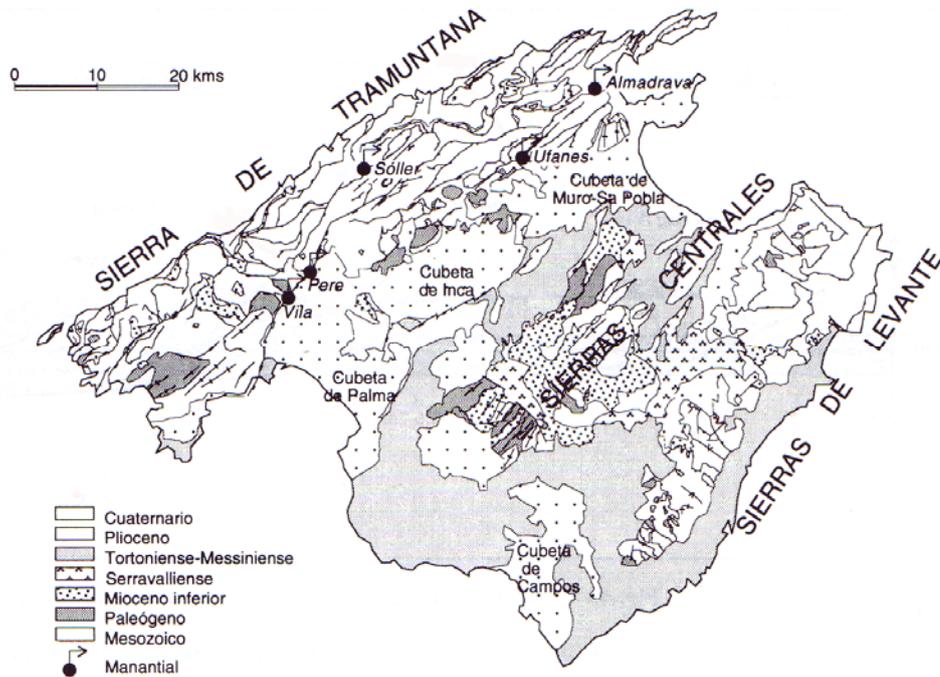


Figura 2.1.- Mapa geológico simplificado de la isla de Mallorca, con indicación de los principales accidentes orográficos (Gelabert y Sàbat, 2002).

Desde un punto de vista hidrológico, y fundamentalmente en lo que a los acuíferos subterráneos se refiere, la isla de Mallorca está constituida fundamentalmente por dos tipos de acuíferos de tipo cárstico (Barón y González, 1987).

Según estos autores, el primer tipo de acuíferos se desarrolla a expensas de las calizas y dolomías del Jurásico Inferior, que está limitado por niveles poco permeables del Keuper y Cretácico. Los acuíferos en las sierras se disponen adyacentes unos a otros y con una dirección de flujo paralela a la dirección de traza de los cabalgamientos. Se caracterizan por áreas de recarga de unos pocos Km², formados por afloramientos de roca desnuda. Sus descargas se producen por medio de pequeños manantiales o surgencias cársticas, que normalmente se encuentran sobre las fallas normales que limitan la sierra Tramontana de los llanos adyacentes. Corresponden a muchos de los acuíferos localizados en la sierra Tramontana.

Por el contrario, el segundo tipo de acuífero cárstico se localiza en los depósitos tabulares del Mioceno Superior (Tortonense-Messiniense), que afloran en el sector sur y este de la isla. Funcionan como acuíferos isotrópicos en las partes más internas y como cársticos en las proximidades a la costa. En estas cuencas, los niveles acuíferos

se superponen unos a otros, llegándose a distinguir en el Llano de Palma y de Inca hasta tres acuíferos superpuestos.

Esta disposición en horsts y grabens tiene una implicación directa en el funcionamiento hidráulico de la isla (Figura 2.2). Así, la dirección de flujo subterráneo es desde las sierras (horsts) hacia las cuencas (grabens).

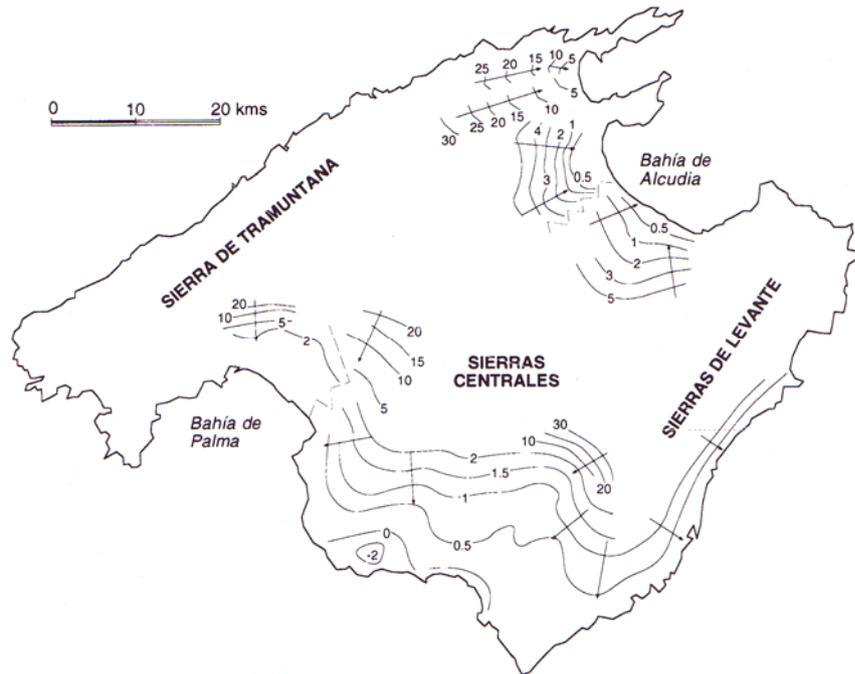


Figura 2.2.- Mapa general de isopiezas de la isla de Mallorca (Diciembre, 1999), realizado a partir de los datos cedidos por la Junta de Aguas de Baleares, mostrando la dirección general de flujo del agua subterránea desde las sierras hasta los llanos (Gelabert y Sàbat, 2002).

2.2.- Geología del acuífero costero de Campos

La intrusión de agua salada dentro de las capas de agua dulce, es un importante y frecuente problema en los acuíferos situados en las áreas costeras densamente pobladas. Antes de comenzar a erradicar este problema, se necesita un conocimiento detallado de la geología e hidrogeología de la zona. Así, es necesario conocer la estratigrafía de los materiales que constituyen el acuífero, mostrando particular interés, la distribución de agua dulce y del agua salada dentro del mismo, la localización de la zona de mezcla y, los flujos preferenciales responsables de las perturbaciones artificiales o naturales.

En este sentido, dentro del marco del proyecto ALIANCE, y de acuerdo con el Gobierno Balear, se ha seleccionado como zona de pruebas el suroeste de la isla de Mallorca, dentro de la plataforma arrecifal de Lluçmajor, donde la intrusión salina muestra en algunos puntos un avance muy importante.

2.2.1.- La plataforma arrecifal de Lluçmajor

El altiplano o rellano de Lluçmajor se localiza en el borde suroccidental de la isla de Mallorca (Figura 2.3). Es una plataforma arrecifal progradacional, construida entre finales del Tortonense y principios del Messiniense, gracias a los repetidos cambios del nivel del mar, que debieron superar los 60 m respecto al nivel del mar actual. En cambio, la subsidencia de la cuenca marina fue insignificante, de manera que en menos de dos millones de años de adosamiento de "sigmoides" arrecifales avanzó más de 20 km hacia el sur de Lluçmajor. Hacia el suroeste, por la parte de la cuenca de Palma, la progradación fue inferior a los 2 km (Pomar y Ward, 1995).

Este complejo arrecifal progradacional, que muestra una potencia media de unos 100 m. se desarrolla en un momento (Mioceno Superior) de estabilidad tectónica y baja afluencia de terrígenos, por lo que la arquitectura y distribución de las litofacies que constituyen este complejo está controlado principalmente por fluctuaciones del nivel del mar de 4º a 7º orden.

Esta plataforma ha adquirido reputación mundial ya que su estructura y estratigrafía es fácilmente observable en los acantilados costeros (Figura 2.4). Especialmente esta zona de la plataforma, ha sido estudiada intensivamente por numerosos investigadores de todo el mundo, desde un punto de vista estructural, sedimentológico, estratigráfico, genético, etc., adquiriendo el estatus de ejemplo a nivel mundial de la progradación miocena de las plataformas arrecifales (Gines y Gines, 1995; Barón *et al.*, 1995; Pomar y Ward, 1995; Pomar *et al.*, 1996; Pomar y Ward, 1999; Ardila y Pomar, 2000; Pomar *et al.*, 2004a).

La plataforma arrecifal de Lluçmajor lleva asociada un acuífero con un importante papel socio-económico para esta zona de la isla. La explotación de este acuífero mediante pozos de bombeo, ha sido fuertemente incrementada durante los últimos 20 años, lo que ha originado una dramática intrusión salina, que llega incluso a afectar

algunos los bombeos alejados de la costa. Este acuífero aparece confinado en el sur y suroeste por el mar mediterráneo. El llano de Palma y la cubeta de Campos representan límites para el agua, mientras que la sierra de Levante proporciona parte de la recarga de la plataforma, si bien, la recarga principal del acuífero viene de la infiltración directa del agua de lluvia.

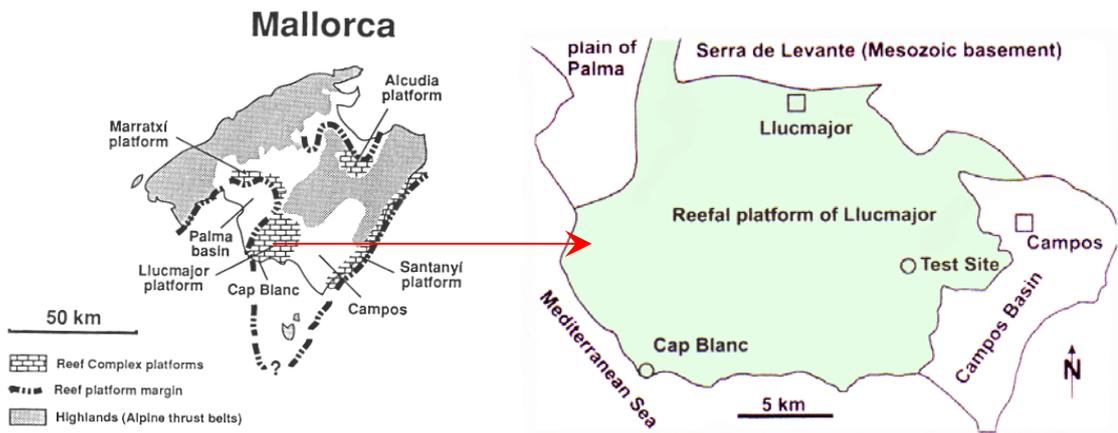


Figura 2.3.- Localización de la plataforma arrecifal de Lluçmajor, que ocupa el borde suroccidental de la isla de Mallorca (Pomar y Ward, 1995).



Figura 2.4.- Acantilados de Cabo Blanco (Plataforma arrecifal de Lluçmajor).

2.2.2.- Campo de ensayos de Ses Sitjoles

Dentro de la plataforma arrecifal de Llucmajor, la zona seleccionada para la realización de la campaña de reconocimiento se localiza en un área conocida como Ses Sitjoles, que se sitúa próxima a la localidad de Campos. Es una zona prácticamente llana, con una superficie próxima a los 10.000 m², ubicada a unos 6 kilómetros de la costa (Figura 2.5).



Figura 2.5.- Imagen de satélite donde se localiza el campo de ensayos de Ses Sitjoles, situado al sur de la isla de Mallorca, y próximo a la localidad de Campos.

2.2.2.1.- Labores de reconocimiento

Dentro de este área de estudio, tal y como se representa en la figura 2.6, se ha llevado a cabo una completa campaña de reconocimiento del terreno dentro del proyecto ALIANCE (Jaeggi, 2006).

En primer término, se han ejecutado cinco sondeos a rotación con recuperación de testigo de 84 mm de diámetro y unos 100 m de profundidad (MC1 a MC5). La recuperación de testigo se sitúa entre el 86% y el 94 % a excepción del sondeo MC1, con tan sólo un 33% de recuperación, aspecto este fácilmente explicable teniendo en cuenta la presencia de cavidades cársticas y materiales pobremente cementados. Asociados a estos cinco sondeos (MC1 a MC5) se han llevado a cabo una intensa

campana de “logging”, realizándose ensayos geofísicos e hidrogeoquímicos asociados a dichos sondeos (Figura 2.7).

Junto a estos sondeos se ha ejecutado otro sondeo destructivo, sin recuperación de testigo y profundidad similar a los anteriores (MC7), y otros cinco, también destructivos y profundidades variables; todos ellos están en relación con los ensayos de bombeo que se han llevado a cabo dentro del campo de estudio de Ses Sitjoles.

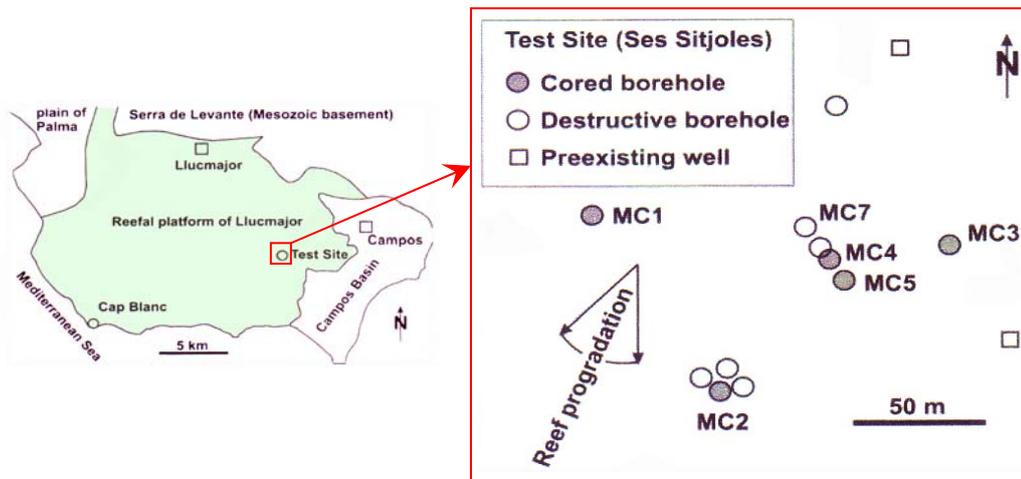


Figura 2.6.- Localización de los ensayos llevados a cabo dentro del campo de pruebas de Ses Sitjoles, a lo largo de la campaña de reconocimiento del proyecto ALIANCE (Jaeggi, 2006).



Figura 2.7.- Detalle de la campaña de “logging” llevada a cabo dentro del campo de pruebas de Ses Sitjoles. Las fotografías muestran diversos detalles de los ensayos asociados a los sondeos MC2 (izquierda) y MC1 (derecha).

2.2.2.2.- Geología del campo de ensayos

El análisis de los testigos recuperados en los sondeos MC1 a MC5, así como, las imágenes de las paredes de los sondeos, obtenidas mediante “logging”, ponen de manifiesto la presencia de 5 litofacies dentro de la zona de estudio, coincidentes con las descritas por Pomar y Ward (1995) para la plataforma de Lluçmajor, variando ligeramente los espesores de unos sondeos a otros. Se ha podido detectar además en algunos sondeos una sexta litofacies, representada por parches arrecifales localizados dentro del lagoon externo (Figura 2.8).

Por lo tanto, desde un punto de vista estratigráfico, dentro del área de Ses Sitjoles y la plataforma de Lluçmajor se pueden distinguir 6 litofacies, que de techo a muro y de manera sintética muestran las siguientes características (Pomar y Ward, 1995; Mateos y Montoto, 2004; Jaeggi, 2006):

- ✚ Lagoon interno (LI): la potencia observable oscila entre 10-13 m. Esta litofacies, constituida por capas horizontales limitadas por superficies erosivas, aparece representada por grainstones oolíticas, packstones y wackstones, donde son frecuentes los moldes verticales de raíces, así como la presencia de pellets fecales, foraminíferos bentónicos y bivalvos. Son también abundantes las intercalaciones de delgados niveles de gasterópodos y caliches, estos últimos con cierto carácter discontinuo. Esta litofacies pone en evidencia varios ciclos de transgresión y regresión.

- ✚ Lagoon externo (LE): la potencia observable oscila entre 30-46 m. Como en el caso anterior, se trata de capas horizontales con superficies erosivas, representadas por grainstones y packstones esqueléticas, que exhiben gran variedad de fauna, entre las que caben destacar algas rojas, moluscos, rodolitos, equinodermos, foraminíferos bentónicos y fragmentos de coral. Localmente se pueden observar intercalaciones de parches arrecifales.

- ✚ Parche arrecifal (PR): la potencia observable oscila entre 8-14 m. Al igual que la barrera coralina aparece representada por framestones y bindstones de algas rojas.

- ✚ Barrera coralina (BC): la potencia observable oscila entre 4-19 m. Con una marcada estratificación sigmoidal, esta litofacies aparece representada por framestones, grainstones y packstones, estas últimas a modo de sedimento interno. Aparecen también bindstones de algas rojas. La morfología de las colonias de coral presentes en el arrecife coralino muestra una marcada zonación, con la presencia de corales en forma de disco en la parte baja, corales ramados en la zona media y corales masivos en el parte alta.

- ✚ Talud proximal (TP): con potencias observables de 20-30 m, esta litofacies está representada por packstones bioclásticas e intraclásticas intensamente bioturbadas, con una inclinación entre 10-30° hacia el mar. Aparecen capas lenticulares de rudstones, depositadas en periodos intermitentes de tormentas, por el deslizamiento a favor de la pendiente (debris flow) y acumulación de fragmentos de corales y granos esqueléticos. La presencia de rodolitos da lugar a la presencia de texturas floatstones o rudstones.

- ✚ Talud distal (TD): representa la unidad más baja de la plataforma arrecifal de Lluçmajor antes de alcanzar el fondo oceánico (plataforma marina abierta). Está constituida por packstones y grainstones de grano fino e intensamente bioturbadas, con una suave inclinación hacia el mar (< 10°).

Esquemáticamente las distintas litofacies definidas para un único sigmoide aparecen recogidas gráficamente en la figura 2.9.

El área de Ses Sitjoles se localiza dentro de una región agrícola, donde la explotación de los acuíferos subterráneos es muy importante. Debido a la irrigación excesiva, la intrusión de agua salada es notable, especialmente en la cubeta de Campos.

En el área estudiada, estos fenómenos de intrusión salina (Figura 2.10) se pueden detectar a más de 6 Km de distancia de la línea de costa, lo que refleja el rápido avance de la cuña salina tierra adentro (Van Meir *et al.*, 2005). En los sondeos ejecutados en esta área, el nivel del agua se sitúa actualmente a unos 40 m de la superficie topográfica. Hasta los 60 m de profundidad los análisis hidrogeoquímicos ponen de manifiesto la presencia de agua dulce, abarcando la zona de mezcla desde

los 60 hasta los 80 m. Por debajo de esta profundidad el acuífero costero se encuentra ocupado por agua salina.

Dentro de las litofacies anteriormente descritas, y a escala de macizo, es la base de la barrera coralina la que generalmente muestra mayores valores de permeabilidad dentro del complejo arrecifal, debido fundamentalmente al extenso karst asociado a este nivel. También el lagoon externo y el talud proximal son altamente permeables, sin embargo, el contraste hidráulico con la base de la barrera coralina sigue siendo considerable (Van Meir *et al.*, 2005).

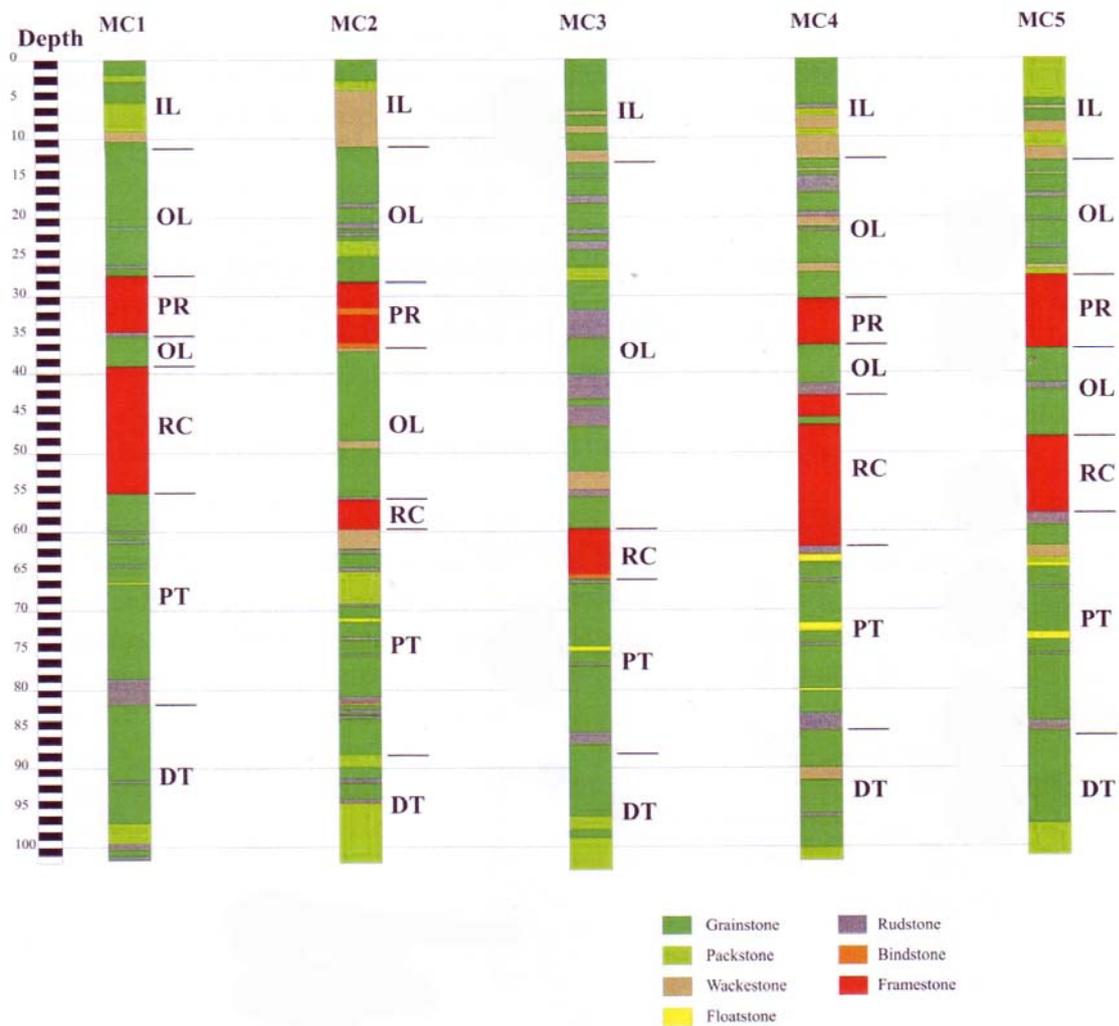


Figura 2.8.- Columna estratigráfica de los 5 sondeos con recuperación de testigo llevados a cabo en el campo de ensayo de Ses Sitjoles. Se han representado las distintas litofacies identificadas (IL: lagoon interno; OL: lagoon externo; PR: parche arrecifal; RC: barrera coralina; PT: talud proximal; DT: talud distal). En distintos colores se han identificado las texturas detectadas a lo largo de cada uno de los sondeos (Jaeggi, 2006).

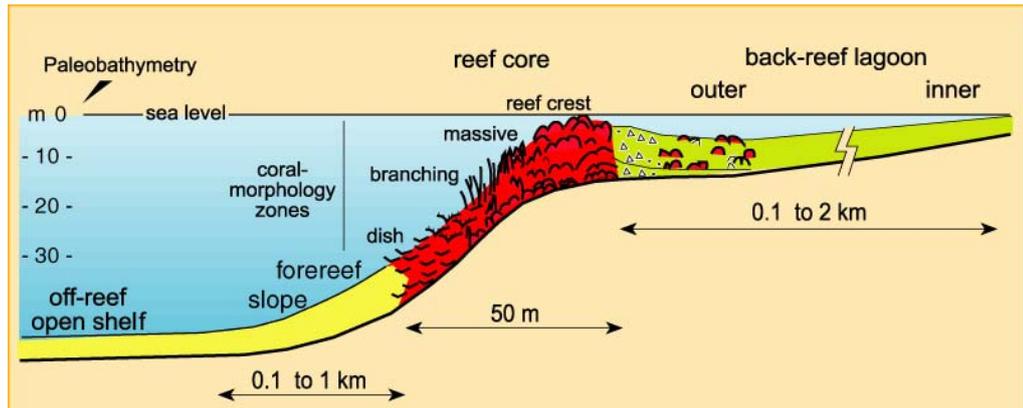


Figura 2.9.- Esquema ilustrativo de las distintas litofacies separadas dentro de la plataforma arrecifal de Lluçmajor. Zonación de las morfologías de las colonias de corales dentro de la litofacies de la barrera coralina en función de la paleobatimetría (Pomar, 2004a).

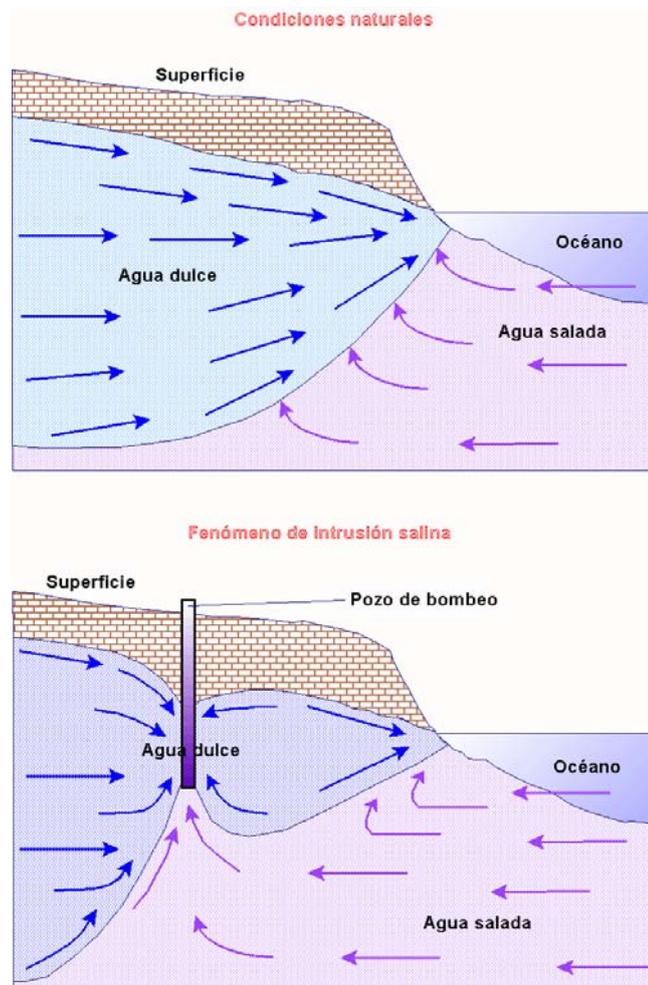


Figura 2.10.- Esquema ilustrativo idealizado de los procesos de intrusión salina en acuíferos costeros sometidos a sobreexplotación. Arriba: distribución de la cuña salina en un acuífero costero no sobreexplotado. Abajo: distribución de la cuña salina cuando el acuífero costero es sobreexplotado, modificando el régimen hidráulico del acuífero.

3.- MUESTREO

La caracterización petrofísica a escala de roca matriz de las diferentes litofacies establecidas dentro del acuífero costero de Campos, ha sido llevada a cabo a partir de las muestras obtenidas en los sondeos a rotación con recuperación de testigo, ejecutados en el área de estudio de Ses Sitjoles (plataforma arrecifal de Lluçmajor), anteriormente descrita en el capítulo 2.2.2.1.

Se ha procedido al análisis exhaustivo de los testigos procedentes de tres de los sondeos ejecutados (MC2, MC3 y MC5), centrándose los estudios que aparecen recogidos en la presente Tesis Doctoral en el primero de ellos (MC2). Los otros dos sondeos (MC3-MC5) han sido estudiados paralelamente por el Swiss Federal Institute of Technology de Zürich (ETH) y por el Institut des Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Espace de Montpellier (ISTEEM), socios ambos del proyecto ALIANCE. Los resultados obtenidos en los tres sondeos son perfectamente correlacionables entre sí.

A lo largo del sondeo MC2, con una longitud de 100 m y un diámetro de 86 mm, se ha procedido a la recogida selectiva de una serie de testigos de sondeo siguiendo tres criterios básicos:

- ✚ Logging: el análisis previo de los datos de porosidad obtenidos mediante los ensayos geofísicos asociados al sondeo MC2 (logging), han permitido identificar diversas zonas, donde a priori, los valores de porosidad obtenidos son extremadamente superiores e inferiores a los valores medios obtenidos a lo largo de todo el perfil. Los datos de logging han sido proporcionados por ETH e ISTEEM respectivamente.
- ✚ Litofacies: se han seleccionado muestras representativas de las distintas litofacies identificadas tradicionalmente en la plataforma arrecifal de Lluçmajor (Pomar *et al.*, 1996) y las identificadas en el sondeo MC2 (Mateos y Montoto, 2004; Jaeggi, 2006). De esta manera, se ha procedido a la toma de muestras de facies de lagoon interno, lagoon externo, barrera arrecifal, talud proximal y talud distal. Además, se ha procedido al muestreo del parche arrecifal detectado en algunos de los sondeos ejecutados dentro del área de estudio.
- ✚ Heterogeneidad de las litofacies: se ha tenido la posibilidad de sacar los testigos de las cajas de sondeo, y restituir los 100 metros de sondeo en el

laboratorio. De esta manera, se han podido observar macroscópicamente las variaciones texturales que aparecen dentro de cada una de las litofacies establecidas, prestando especial interés a los cambios en su porosidad macroscópica.

Se ha procedido así, a la toma de muestras de todas aquellas variaciones presentes dentro una misma litofacies, a fin de obtener una información del conjunto lo más representativa posible (Figura 3.1).



Figura 3.1.- Cajas de testigos correspondientes al sondeo MC2. El despliegue, observación y análisis detallado de los testigos de sondeo ha permitido determinar las heterogeneidades, que a escala macroscópica, están presentes dentro de cada una de las litofacies establecidas, procediendo al muestreo posterior de las zonas de mayor interés petrofísico.

Se han recopilado un total de 30 testigos de sondeo, con una longitud que oscila entre 10 y 50 cm y un diámetro de 86 mm (Figura 3.2). La caracterización petrofísica y los estudios de porosidad han sido llevados a cabo sobre 17 de los testigos recopilados, ya que muchos de ellos aparecían duplicados, y han sido utilizados como material de reserva.

En primer término, se ha procedido a corroborar la correcta orientación de los mismos en relación a su posición en el terreno, gracias a las imágenes de televiewer proporcionadas por el ETH y el ISTEEM, donde se han podido observar con todo detalle las paredes del sondeo. Estas imágenes han permitido también establecer con gran precisión la cota de los diferentes testigos de sondeo muestreados.

Se ha sido extremadamente meticuloso con el despiece llevado a cabo sobre cada uno de los testigos de sondeo estudiados, estableciendo una clara estrategia de documentación (Flint, 1998; Montoto, 2003). A este fin, cada uno de los especímenes obtenidos a partir de los testigos de sondeo, sus profundidades y los estudios desarrollados sobre cada una de ellos, han sido en todo momento recogido gráficamente (Figura 3.3). Esta información aparece recopilada en el archivo de datos multimedia, que en formato CD-ROM aparece anexo a la presente Tesis Doctoral.

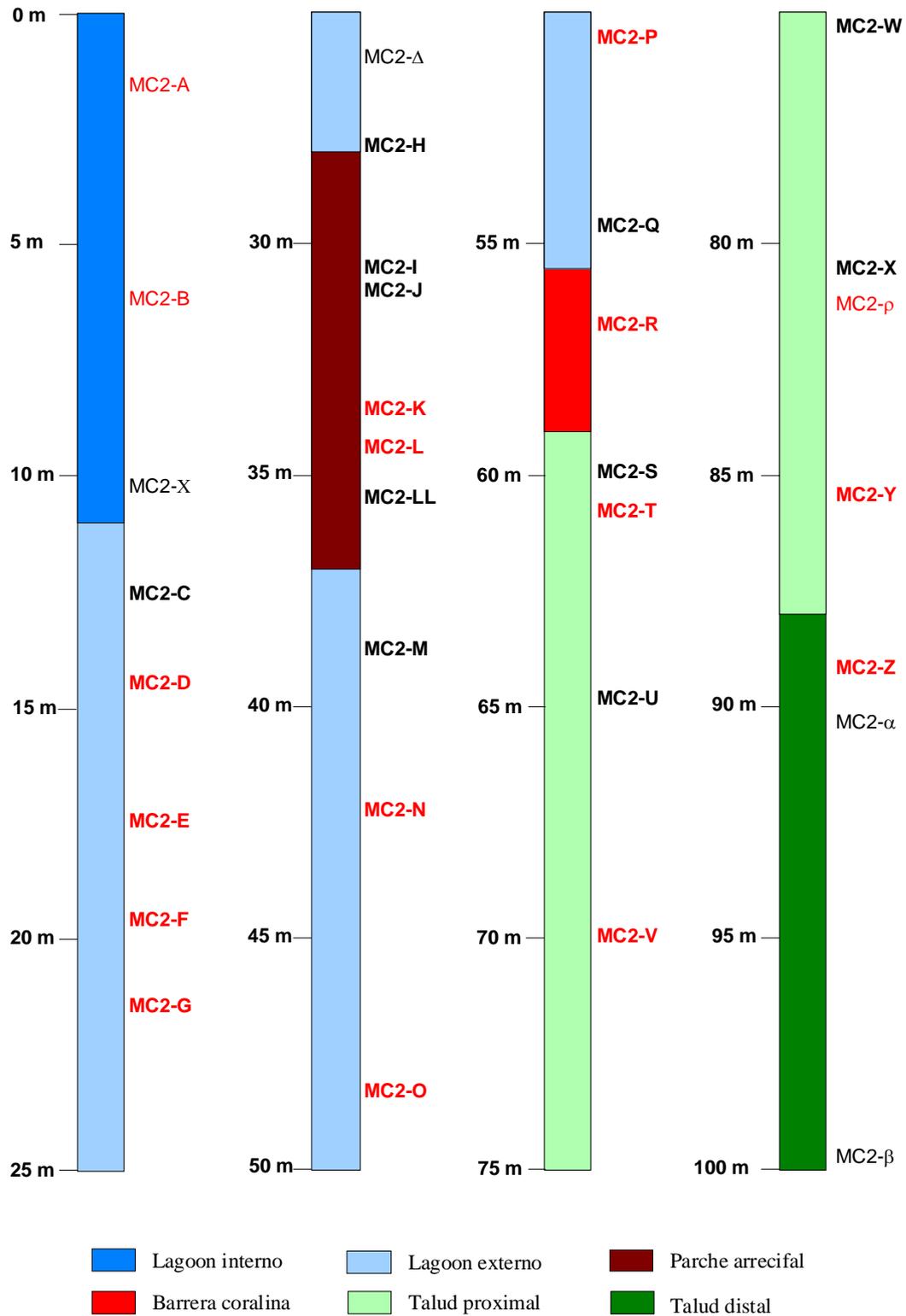


Figura 3.2.- Muestreo llevado a cabo dentro del sondeo MC2. El elevado y selectivo muestreo llevado a cabo a lo largo de dicho sondeo, hace que se pueda considerar representativo, por incluir las distintas litofacies presentes, sus variaciones texturales más importantes y, aquellos puntos donde los valores de porosidad son anómalos (logging). Las muestras marcadas en rojo han sido utilizadas posteriormente en el laboratorio para su caracterización petrofísica. Las muestras en azul aparecen duplicadas, habiendo sido reservadas por si se hace necesaria la repetición de algún ensayo.

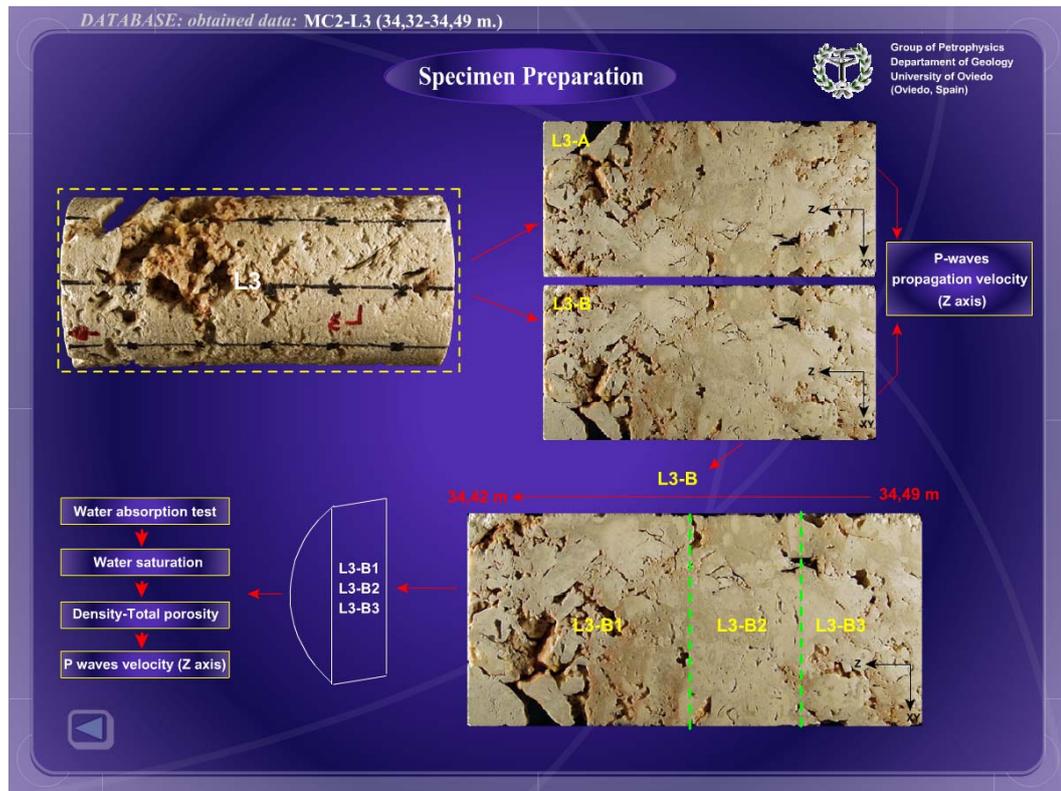
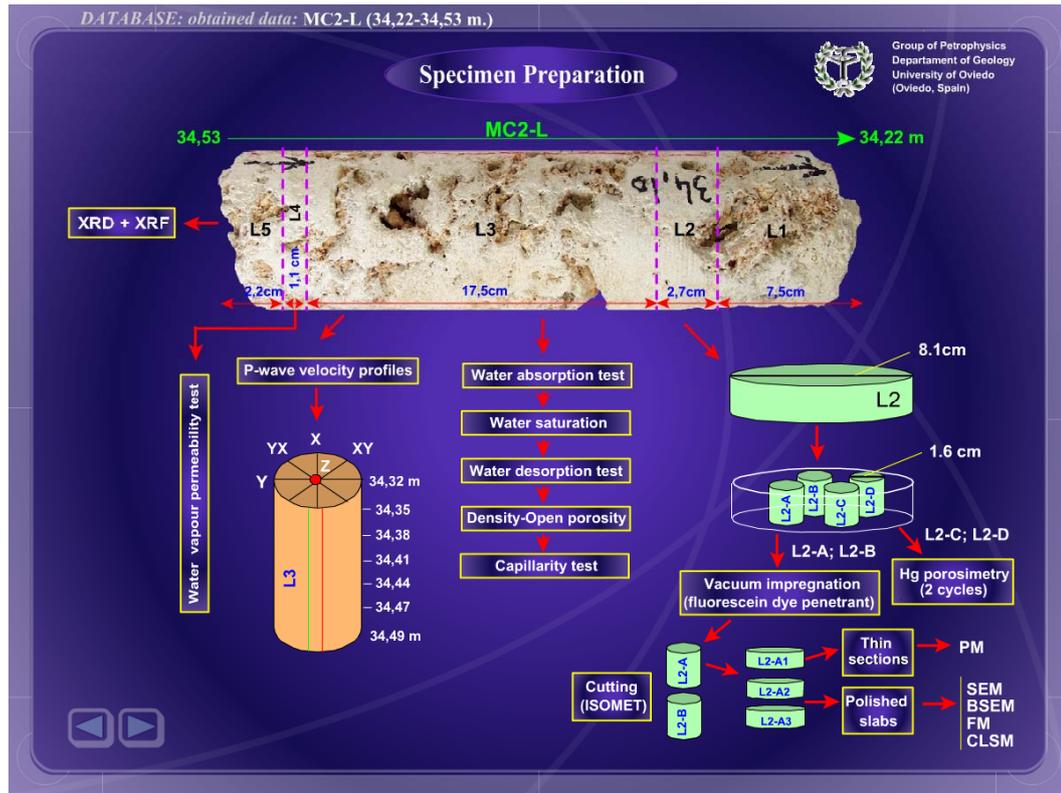
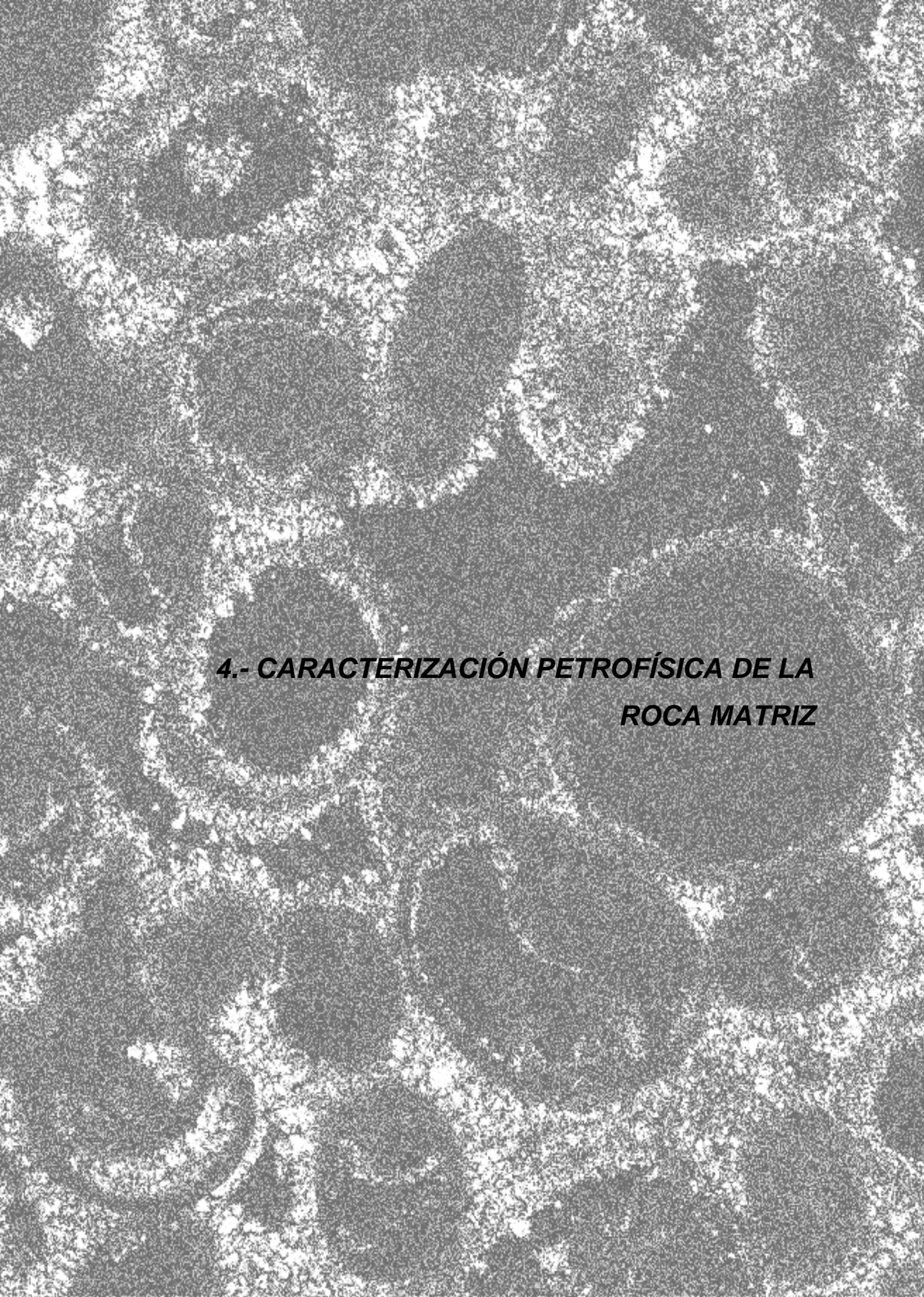


Figura 3.3.- Documentación petrofísica recogida en el archivo de datos multimedia incluida en el CD-ROM anexo a la presente tesis. Ejemplo de las fichas correspondientes al testigo de sondeo MC2-L, donde se recoge el despiece que se ha realizado, con la profundidad de cada una de los especímenes obtenidos y los ensayos llevados a cabo sobre cada uno de ellos.



**4.- CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA DE LA
ROCA MATRIZ**

4.1.- Heterogeneidad y anisotropía de la roca matriz

4.1.1.- Introducción y metodología

La heterogeneidad (diferentes valores en distintas zonas) y anisotropía (diferentes valores a lo largo de diferentes direcciones de medida) son dos de las características petrográficas de mayor interés en el estudio de las propiedades físicas de las rocas (Montoto, 2003). Su correcta caracterización, independientemente de la escala de observación, tiene una marcada influencia en los estudios petrofísicos a desarrollar posteriormente, al ejercer un importante control sobre las diferentes etapas involucradas en los mismos (muestreo, ensayos, interpretación de los datos, modelización, etc.).

La determinación de ambas características petrográficas ha de ser obligatoriamente previa a cualquier otro tipo de estudio petrofísico, dado que, el grado de anisotropía y heterogeneidad medido en la roca, deben marcar las estrategias de muestreo y posterior despiece, en lo que a número, tamaño, localización y orientación de las muestras se refiere. Igualmente, su determinación debe ser llevada a cabo de manera que se preserven las características originales de la roca (composición, textura, estructura, etc.), para que otros ensayos puedan ser realizados sobre las mismas muestras, por lo que ha de recurrirse a la utilización de técnicas no destructivas (NDT).

Las técnicas no destructivas representan uno de los más valiosos, extendidos y prácticos procedimientos para la caracterización de la roca matriz. Por ello, la literatura existente es amplia y en continuo desarrollo (Rider, 1986; Vinegar, 1986; Kobranova, 1989; Raynaud *et al.*, 1989; Jonhs *et al.*, 1993; Jacobs y De Cleene, 1994; Siegesmund y Dahmas, 1994; Pleinert y Degueldre, 1995; Degueldre *et al.*, 1996; Denison *et al.*, 1997a, b; Klobes *et al.*, 1997a, b; Prasad y Manghnani, 1997; Coles *et al.*, 1998; Keller, 1998; Dului, 1999; Hellmuth *et al.*, 1999; Klein *et al.*, 1999; Ruiz de Argandoña, 1999; Barker *et al.*, 2000; Exadaktylos *et al.*, 2000; Geet *et al.*, 2000; Mauricio y Figueiredo, 2000; Bertels *et al.*, 2001; Ketcham y Carlson, 2001; Miaoyue y Quingyum, 2001; Pyrak-Nolte *et al.*, 2001; Arns *et al.*, 2002; Bosch *et al.*, 2002; Kozaki *et al.*, 2002; Landis *et al.*, 2002; Van Geet *et al.*, 2002, 2003; Zamora *et al.*, 2002; Carlson *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003; Mees *et al.*, 2003; Ruiz de Argandoña, 2003;

Sellers *et al.*, 2003; Vandersteen *et al.*, 2003; Vogel y Brown, 2003; Ketcham e Iturrino, 2004; etc.).

En este sentido, una de las técnicas no destructivas más utilizadas en el campo de la Petrofísica, es la propagación de ondas ultrasónicas (Piniska, 1982; Engelder y Plumb, 1984; Piniska, 1986; Calleja *et al.*, 1989; Pérez *et al.*, 1989; Montoto *et al.*, 1991a, b, 1994c; Zamora *et al.*, 1994; Montoto *et al.*, 1996d, f; Siegesmund *et al.*, 1996; Valdeón *et al.*, 1996, 1997; Berryman *et al.*, 1997; Popp y Kern, 1998; Rasolofosaon *et al.*, 1999; Montoto *et al.*, 2000b; Zamora *et al.*, 2002; Mateos *et al.*, 2006; etc.).

La metodología desarrollada en el presente trabajo, ha seguido las pautas anteriormente descritas; así, antes de llevar a cabo cualquier otro estudio de laboratorio, la caracterización petrofísica de los testigos de sondeo muestreados en el sondeo MC2, ha comenzado con el análisis de su heterogeneidad y la localización de posibles anisotropías. La información obtenida ha marcado el número, tamaño, localización y orientación de las muestras a extraer de cada testigo de sondeo, a la vez que se han preservado las características originales de la roca, para poder utilizar los mismos testigos en posteriores ensayos (propiedades hidráulicas, composición química y mineralógica, etc.). Igualmente la información obtenida, ha sido utilizada en la interpretación de los resultados obtenidos.

En el análisis de la heterogeneidad y anisotropía, la técnica ultrasónica no destructiva utilizada, ha sido el método de transmisión directa de ondas P (Valdeón *et al.*, 1996; Shatilo *et al.*, 1998; Couvreur y Thimus, 1999; ASTM D2845, 2000; EN 583-5, 2004; etc.), ya que es el que mejor refleja el papel de los distintos componentes petrográficos, mostrando especial repercusión la porosidad, microfisuración, densidad y grado de alteración de la misma (Figura 4.1).

A fin de minimizar los errores inducidos por la fijación manual de los transductores durante la medición de los “tiempos de vuelo”, se ha diseñado un estativo que permite adquirir los datos, sin necesidad de esa sujeción manual (Figura 4.2); de este modo los transductores son enfrentados y fijados a la muestra por medio de unos muelles de presión regulable. En cada estación de medida se han tomado 5 datos de los tiempos de vuelo, procediendo a la obtención de sus valores medios.

Se han determinado los tiempos de tránsito o “tiempos de vuelo” de las ondas P (t_p en μs) cada 3 cm a lo largo del eje axial del testigo, según cuatro direcciones perpendiculares a dicho eje, separadas entre sí 45° (Figura 4.3). Posteriormente, ha sido calculada la velocidad de propagación (V_p en m/s) y el slowness (el inverso de la velocidad medida en $\mu s/cm$). Con los valores obtenidos, se han representado los perfiles de velocidad de propagación y perfiles de tiempos residuales.



Figura 4.1.- Equipo ultrasónico y estativo utilizado para la determinación de los tiempos de vuelo de las ondas P mediante transmisión directa. Este sólido y manejable estativo utilizado para la obtención de perfiles ultrasónicos a lo largo de los testigos de sondeo, ha sido específicamente diseñado para este proyecto por el Grupo de Petrofísica de la Universidad de Oviedo.



Figura 4.2.- Detalle del par de transductores (Ei-Ri) de 1 MHz colocados dentro del soporte especialmente diseñado para su sujeción. El testigo de sondeo se desplazada a lo largo de su eje longitudinal por acción de una manivela, registrando así los transductores los valores de tiempos de tránsito de las ondas P a lo largo de todo el perfil. Se han utilizado transductores Panametrics.

Basándose en la buena correlación entre porosidad total (p) y velocidad de propagación (V_p) que muestran estas rocas, las zonas que a lo largo de los testigos registran un mayor grado de heterogeneidad, han sido identificadas petrofísicamente como zonas de baja/alta porosidad. Identificar estas zonas ha sido de gran interés para seleccionar las zonas a muestrear de cara a los estudios petrográficos, pomométricos y los ensayos hidráulicos a realizar.

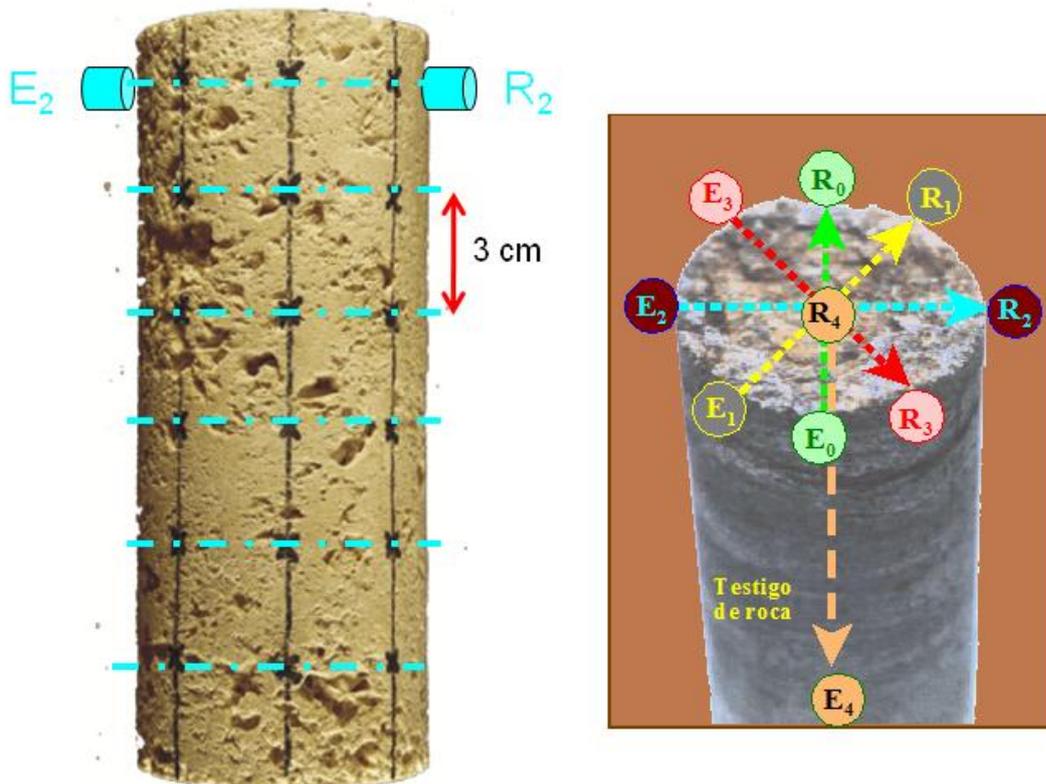


Figura 4.3.- Esquema ilustrativo del procedimiento seguido para la determinación sistemática de los tiempo de tránsito o “tiempos de vuelo” de las ondas P, a lo largo del eje axial del testigo (cada 3 cm), según cuatro direcciones (E_i-R_i) perpendiculares a dicho eje, separadas entre sí 45° : E_0-R_0 ; E_1-R_1 ; E_2-R_2 ; E_3-R_3 y longitudinalmente al mismo (E_4-R_4).

4.1.2.- Resultados obtenidos

Es evidente, que los tiempos de tránsito de las ondas P que atraviesan un material rocoso, y con ello los valores de velocidad de propagación, vienen condicionados por sus componentes petrográficos con significado petrofísico, mostrando especial relevancia los espacios vacíos (poros y fisuras) y el grado de alteración y/o meteorización.

Ambos aspectos van a influir notablemente, junto a la mineralogía, en los valores de densidad de la roca, estando esta propiedad física de la roca directamente relacionada con su porosidad según la siguiente relación; a mayor densidad mayor velocidad de propagación de las ondas P y menor porosidad, y viceversa.

El análisis de los perfiles ultrasónicos obtenidos, pone de manifiesto importantes diferencias en los valores de velocidad, es decir, de porosidad, para las distintas litofacies establecidas, así como, entre algunos de los testigos de sondeo estudiados para una misma litofacies.

De los testigos seleccionados a lo largo del sondeo MC2, son los correspondientes al techo del lagoon interno (lagoon oolítico), parche arrecifal y barrera arrecifal, los que muestran mayores valores de velocidad de propagación de ondas P, al igual que uno de los testigos correspondientes al tramo inferior del lagoon externo. Por el contrario, los menores valores corresponden a los testigos muestreados dentro del tramo superior e inferior del lagoon externo y el talud, tanto distal como proximal (Figura 4.4). Los valores obtenidos para cada uno de los 17 testigos de sondeo estudiados aparecen recogidos en la tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Valores de velocidad de propagación de ondas P obtenidas para cada uno de los testigos de sondeo estudiados en el presente trabajo. Se muestran los valores medios obtenidos a lo largo del perfil medido para cada una de las cuatro direcciones de medición perpendiculares al eje axial del testigo, la media de las mismas, y el valor obtenido según la dirección del eje axial del sondeo (Z-Z').

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Velocidad (m/s)					
			X-X'	Y-Y'	XY-XY'	YX-YX'	Media	Z-Z'
MC2-A3	1,98-2,18	Lagoon interno	4834	4905	4752	4896	4847	4988
MC2-B3	5,89-5,96		3455	3483	3515	3277	3433	3568
MC2-D3	14,54-14,66	Lagoon externo	3263	3351	3334	3248	3299	2611
MC2-E3	17,35-17,46		3021	2885	2979	3001	2972	2528
MC2-F2	19,24-19,43		2712	2918	2822	2806	2814	2861
MC2-G2	21,37-21,48		2969	3293	3662	3288	3303	3537
MC2-K3	33,35-33,47	Parche arrecifal	4030	3886	4288	3775	3995	4576
MC2-L3	34,32-34,49		4355	4567	4385	4462	4443	4780
MC2-N2	42,12-42,31	Lagoon externo	4399	4200	4404	4347	4337	4392
MC2-O3	48,16-48,29		4206	3511	3994	3843	3888	2615
MC2-P2	50,49-50,68		3195	3185	3216	3201	3199	3078
MC2-R4	56,60-56,77		Barrera	4882	5164	5206	4803	5014
MC2-T2	60,79-60,90	Talud proximal	3239	3510	3296	3308	3338	3130
MC2-V3	69,88-70,00		2818	2764	2783	2690	2764	2675
MC2-p3	81,05-81,12		3107	3184	3178	3149	3155	3208
MC2-Y4	85,43-85,57		3031	3001	3012	3028	3018	2967
MC2-Z3	88,94-89,05		Talud distal	2798	2853	2814	2843	2827

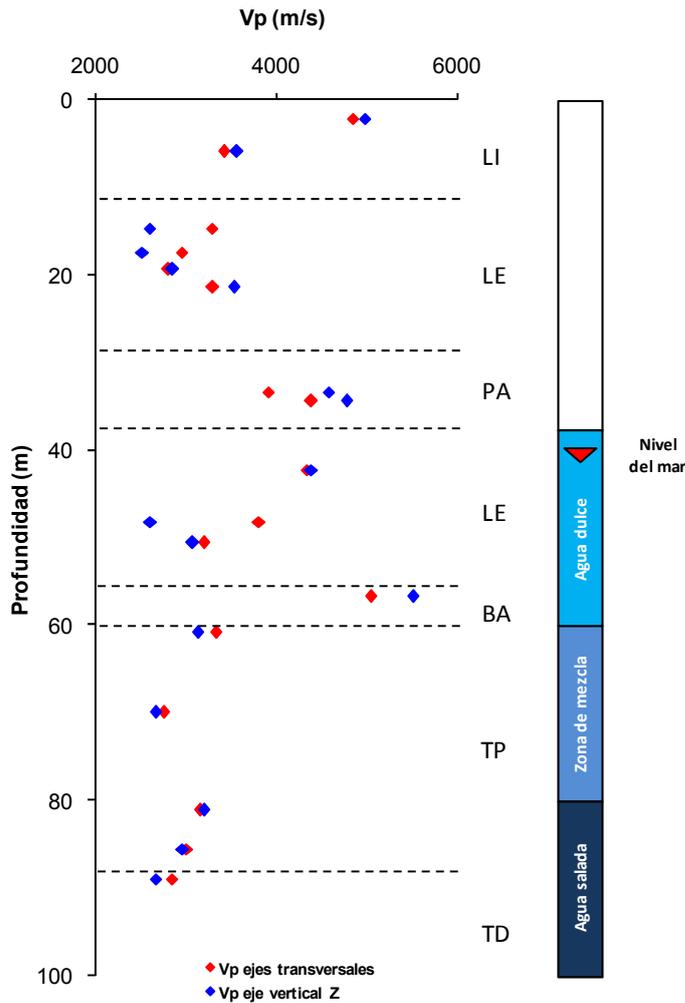


Figura 4.4.- Perfil de velocidad ultrasónica obtenida para los testigos muestreados a lo largo del sondeo MC2. Los puntos azules representan la velocidad de propagación media obtenida a lo largo del perfil medido para cada una de las cuatro direcciones de medición perpendiculares al eje axial del testigo. Los puntos rojos representan la velocidad de propagación obtenida para cada uno de los testigos según el eje vertical Z. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

El análisis de los perfiles ultrasónicos pone de manifiesto una marcada heterogeneidad en la mayor parte de los testigos de sondeo estudiados. Esta heterogeneidad, que viene condicionada por la distribución irregular de los espacios vacíos (poros y/o fisuras) a lo largo del eje axial del testigo, es claramente observable a escala macroscópica en muchos de los testigos estudiados (Figura 4.5), evidenciándose tan sólo a escala microscópica en otros de los testigos analizados (Figuras 4.6 y 4.7).

Este último aspecto, ha sido de gran interés a la hora de planificar el muestreo a menor escala a partir de los testigos para posteriores estudios, ya que los perfiles ultrasónicos obtenidos, indican claramente las zonas de mayor y menor porosidad dentro del testigo. La totalidad de los perfiles ultrasónicos obtenidos para los 17 testigos de sondeo analizados, aparecen recogidos en el archivo de datos multimedia que en formato CD-ROM acompaña esta Tesis Doctoral.

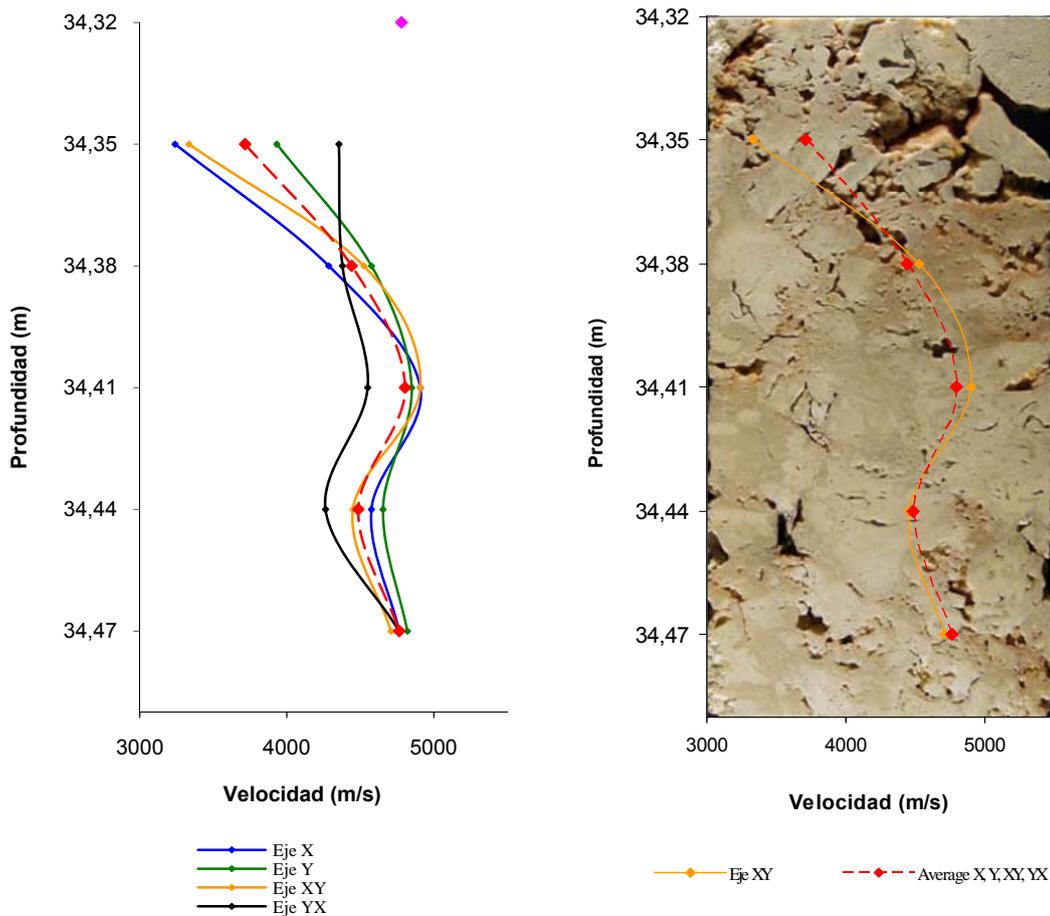


Figura 4.5.- Muestra MC2-L3 correspondiente a la litofacies PA (parche arrecifal). El gráfico de la izquierda recoge los perfiles de velocidad obtenidos para las cuatro direcciones de medición (X-X', Y-Y', XY-XY' y YX-YX'), perpendiculares al eje axial del testigo (Z-Z'), y el perfil medio de las mismas. Se ha proyectado también mediante un punto, el valor de velocidad media obtenido para el eje axial Z-Z'. El gráfico de la derecha muestra la imagen obtenida tras el corte longitudinal del testigo según la dirección XY-XY'. Sobre dicha imagen se ha proyectado el perfil de velocidad obtenido según la dirección de corte (XY-XY'), y el perfil medio de las cuatro direcciones citadas. Existe una clara relación entre la porosidad observable macroscópicamente y la velocidad de propagación de ondas obtenida, destacando las zonas de mayor y menor heterogeneidad.

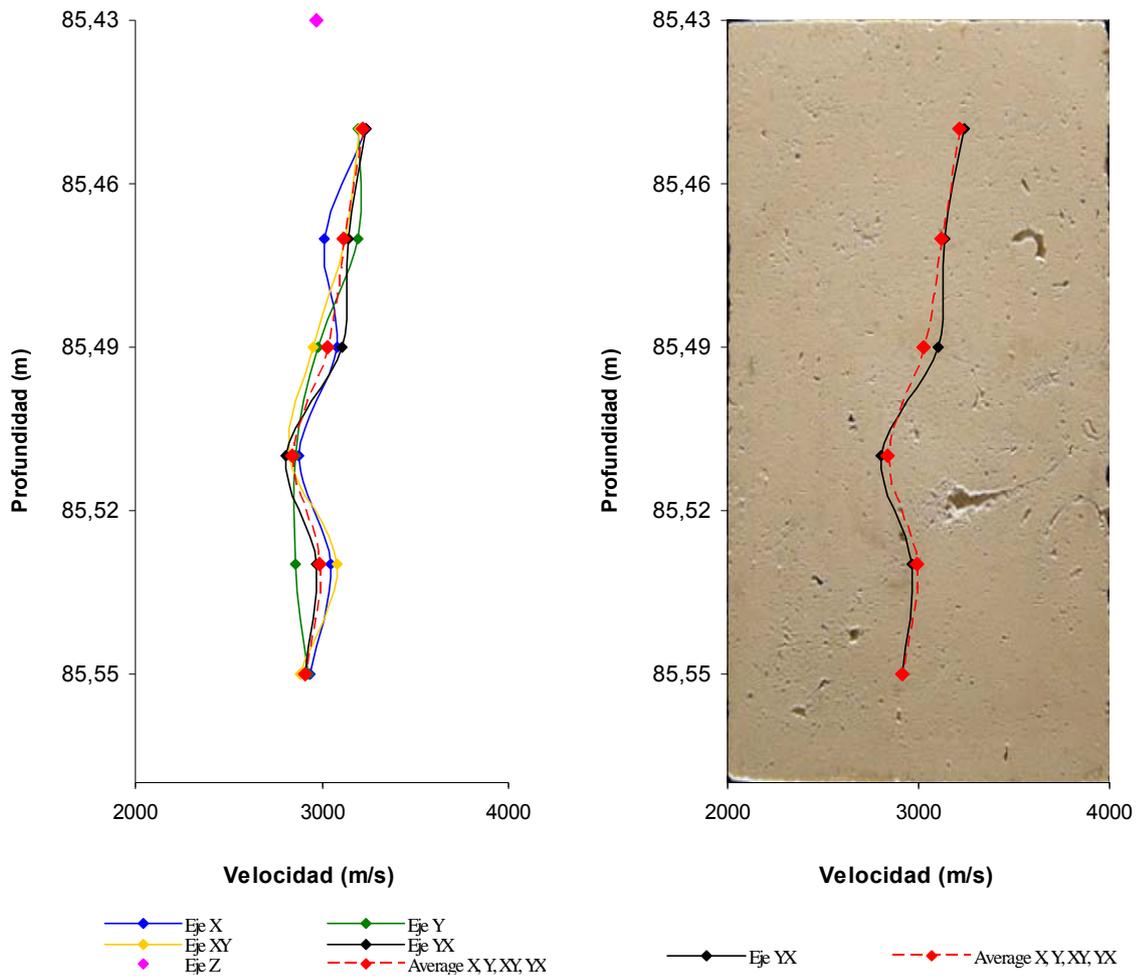


Figura 4.6.- Perfil ultrasónico obtenido para la muestra MC2-Y3 correspondiente a la facies TP (talud proximal). El gráfico de la izquierda recoge los perfiles de velocidad obtenidos para las cuatro direcciones de medición ($X-X'$, $Y-Y'$, $XY-XY'$ y $YX-YX'$), perpendiculares al eje axial del testigo ($Z-Z'$), y el perfil medio de las mismas. Se ha proyectado también mediante un punto, el valor de velocidad media obtenido para el eje axial $Z-Z'$. El gráfico de la derecha muestra la imagen obtenida tras el corte longitudinal del testigo según la dirección $YX-YX'$. Sobre dicha imagen se ha proyectado el perfil de velocidad obtenido según la dirección de corte ($YX-YX'$), y el perfil medio de las cuatro direcciones citadas. En este caso, los poros macroscópicamente observables no son tan evidentes, si bien, existe una progresiva disminución de la velocidad con la profundidad dentro del perfil ultrasónico obtenido. Estas variaciones de velocidad, es decir, su heterogeneidad, reflejan claramente la distribución e influencia de la microporosidad a lo largo del eje axial del testigo.

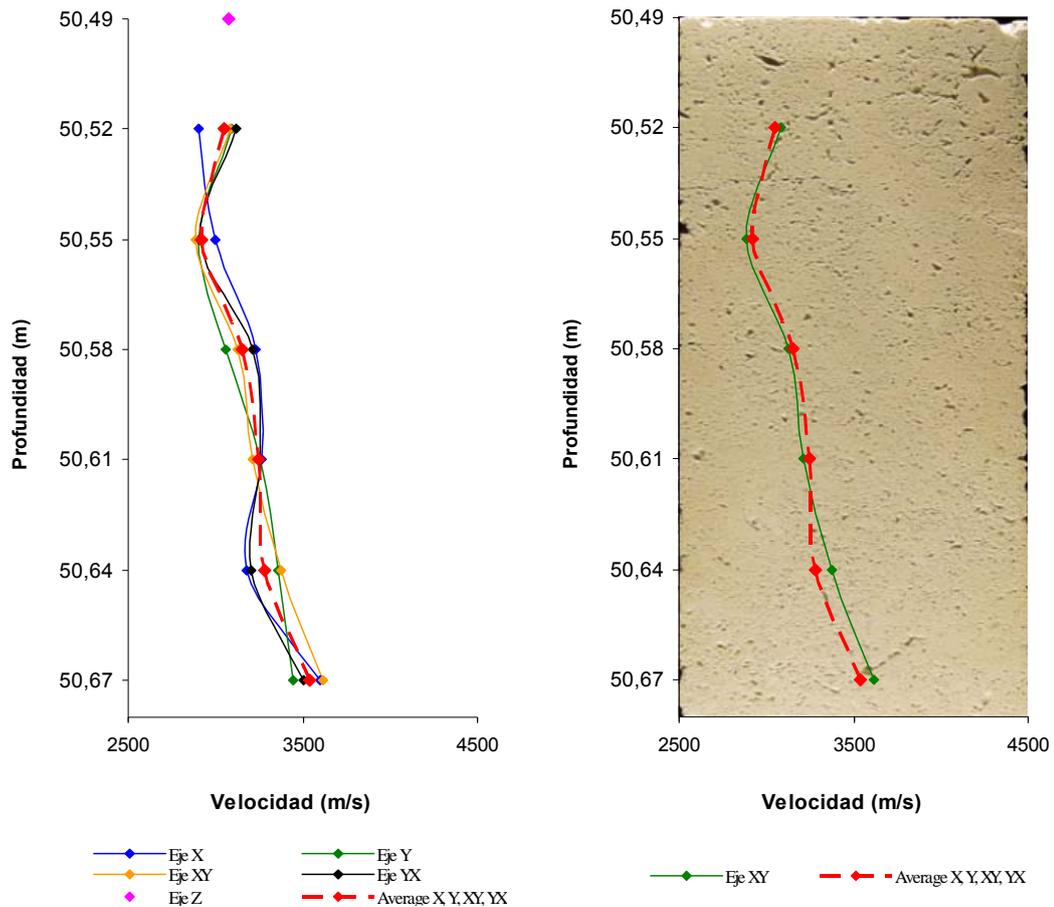


Figura 4.7.- Perfil ultrasónico obtenido para la muestra MC2-P2, correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (LE). El gráfico de la izquierda recoge los perfiles de velocidad obtenidos para las cuatro direcciones de medición ($X-X'$, $Y-Y'$, $XY-XY'$ y $YX-YX'$), perpendiculares al eje axial del testigo ($Z-Z'$), y el perfil medio de las mismas. Se ha proyectado también mediante un punto, el valor de velocidad media obtenido para el eje axial $Z-Z'$. El gráfico de la derecha muestra la imagen obtenida tras el corte longitudinal del testigo según la dirección $XY-XY'$. Sobre dicha imagen se ha proyectado el perfil de velocidad obtenido según la dirección $XY-XY'$, y el perfil medio de las cuatro direcciones citadas. Se trata de un caso intermedio a los dos anteriores. Los menores valores de velocidad de propagación detectados en el tramo superior del testigo de sondeo, concuerdan perfectamente con la presencia en este tramo de un mayor volumen de poros observables macroscópicamente, mientras que hacia la parte baja del sondeo, y a medida que la presencia de éstos es menor, aumenta la velocidad de propagación de ondas.

Por otra parte, la ocasional presencia de ligeras anisotropías a lo largo de una determinada dirección no ha sido considerada relevante (Tabla 4.2). Solamente, algunos testigos muestran cierta anisotropía según el eje axial del testigo ($Z-Z'$), marcada por la presencia de niveles de alta/baja porosidad perpendiculares al eje axial del testigo, que al ser atravesadas por las ondas P medidas en la dirección $Z-Z'$, influyen en los tiempos de vuelo medidos y con ello, en la velocidad de propagación en esta dirección (Figura 4.8).

Tabla 4.2.- Coeficientes de anisotropía determinados en cada uno de los testigos de sondeo estudiados. Se muestran los coeficientes obtenidos para cada una de las cuatro direcciones de medición perpendiculares al eje axial del testigo (X-X', Y-Y', XY-XY' y YX-YX'), la media de las mismas, y el valor según el eje axial del sondeo (Z-Z').

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Coeficiente de anisotropía					
			X-X'	Y-Y'	XY-XY'	YX-YX'	Media	Z-Z'
MC2-A3	1,98-2,18	Lagoon interno	1,02	1,03	1,00	1,03	1,02	1,05
MC2-B3	5,89,5,98		1,05	1,06	1,07	1,00	1,05	1,09
MC2-D3	14,54-14,66	Lagoon externo	1,25	1,28	1,28	1,24	1,26	1,00
MC2-E3	17,35-17,46		1,19	1,14	1,18	1,19	1,18	1,00
MC2-F2	19,24-19,43		1,00	1,08	1,04	1,03	1,04	1,06
MC2-G2	21,37-21,48		1,00	1,11	1,23	1,11	1,11	1,19
MC2-K3	33,35-33,47	Parche arrecifal	1,07	1,03	1,14	1,00	1,06	1,21
MC2-L3	34,32-34,49		1,00	1,05	1,01	1,02	1,02	1,10
MC2-N2	42,12-42,31	Lagoon externo	1,05	1,00	1,05	1,03	1,03	1,05
MC2-O3	48,16-48,29		1,61	1,34	1,53	1,47	1,49	1,00
MC2-P2	50,49-50,68		1,04	1,03	1,04	1,04	1,04	1,00
MC2-R4	56,80-56,77		Barrera	1,02	1,08	1,08	1,00	1,04
MC2-T2	60,79-60,90	Talud proximal	1,03	1,12	1,05	1,06	1,07	1,00
MC2-V3	69,88-70,00		1,05	1,03	1,04	1,01	1,03	1,00
MC2-w3	81,05-81,12		1,00	1,02	1,02	1,01	1,02	1,03
MC2-Y4	85,43-85,57		1,02	1,01	1,02	1,02	1,02	1,00
MC2-Z3	88,94-89,05		Talud distal	1,05	1,07	1,05	1,07	1,06

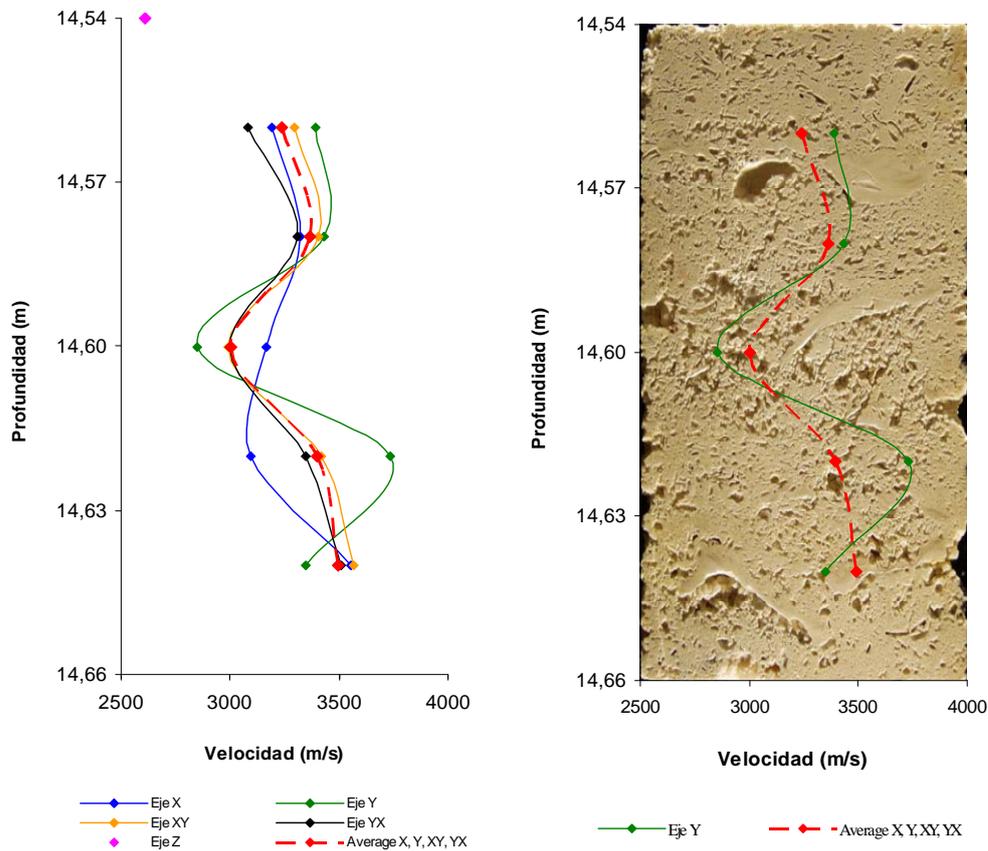


Figura 4.8.- Perfil ultrasónico obtenido para la muestra MC2-D3, correspondiente al techo del lagoon externo (LE). Izquierda; Perfiles de velocidad obtenidos para las cuatro direcciones de medición (X-X', Y-Y', XY-XY' y YX-YX'), y el perfil medio de las mismas. Se ha proyectado también mediante un punto, el valor de velocidad media obtenido para el eje axial Z-Z'. Derecha; Imagen obtenida tras el corte longitudinal del testigo según la dirección Y-Y'. Sobre dicha imagen se ha proyectado el perfil de velocidad obtenido según la dirección de corte (Y-Y'), y el perfil medio de las cuatro direcciones citadas. La velocidad de propagación obtenida para el eje Z-Z' (punto rosa) es mucho menor que las obtenidas para los perfiles longitudinales obtenidos transversalmente al eje Z-Z', lo que refleja la atenuación sufrida por las ondas al atravesar los niveles de concentración de porosidad.

Con el fin de enfatizar la presencia de anisotropías y fundamentalmente de heterogeneidades, se han determinado los valores de “slowness” (inversa de la velocidad). El “slowness” obtenido para cada par emisor-receptor ($E_i - R_i$) es comparado con un “valor de referencia” del testigo medido.

Este “valor de referencia”, es el “slowness” de un pequeño volumen de roca matriz seleccionada como representativa de una situación ideal (libre de alteración, sin microfisuras o macroporos observables, etc.). El “valor de referencia” es restado del “slowness” obtenido para cada par $E_i - R_i$ medido a lo largo del testigo, obteniendo los “tiempos residuales”.

Los “tiempos residuales” determinados a lo largo de todo el testigo de sondeo (Tabla 4.3), se muestran a modo de perfil, con valores negativos y positivos, en relación con las zonas que muestran mayor o menor porosidad que el “valor de referencia”. Se enfatizan y se localizan de manera más evidente la posición de las heterogeneidades presentes de en roca matriz (Figura 4.9).

Estos perfiles, han sido de gran utilidad para establecer la zona o zonas de cada testigo, en la que deberían programarse estudios detallados de la configuración del sistema poroso; de este modo se ha conseguido una mayor representatividad del conjunto, y un análisis más completo del sistema poroso de estas rocas.

Tabla 4.3.- Tiempos residuales obtenidos para cada uno de los testigos de sondeo estudiados. Se muestran los coeficientes obtenidos para cada una de las cuatro direcciones de medición ortogonales al eje axial del testigo, la media de las mismas, y el valor según la dirección del eje axial del sondeo (Z-Z’).

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Tiempos residuales ($\mu\text{s}/\text{cm}$)				
			X-X'	Y-Y'	XY-XY'	YX-YX'	Media
MC2-A3	1,98-2,18	Lagoon interno	0,00	0,13	0,05	-0,03	0,03
MC2-B3	5,89,5,96		0,06	0,00	-0,09	0,03	0,00
MC2-D3	14,54-14,66	Lagoon externo	-0,09	-0,50	-0,34	-0,24	-0,29
MC2-E3	17,35-17,46		0,04	0,18	-0,02	0,07	0,07
MC2-F2	19,24-19,43		0,10	-0,03	0,01	0,05	0,03
MC2-G2	21,37-21,48		-0,65	-0,04	-0,25	-0,17	-0,28
MC2-K3	33,35-33,47	Parche arrecifal	-0,05	-0,03	-0,05	0,10	-0,01
MC2-L3	34,32-34,49		0,16	0,05	0,08	-0,10	0,05
MC2-N2	42,12-42,31	Lagoon externo	0,01	0,00	0,04	-0,06	0,00
MC2-O3	48,16-48,29		0,04	0,14	0,46	0,13	0,19
MC2-P2	50,49-50,68		0,08	0,08	0,01	0,06	0,06
MC2-R4	56,60-56,77	Barrera	0,06	-0,07	-0,06	0,12	0,01
MC2-T2	60,79-60,90	Talud proximal	-0,04	-0,09	0,04	0,07	-0,01
MC2-V3	69,88-70,00		-0,02	0,32	0,15	0,16	0,15
MC2-p3	81,05-81,12		0,02	0,00	0,00	0,02	0,01
MC2-Y4	85,43-85,57		0,06	-0,02	-0,06	0,09	0,02
MC2-Z3	88,94-89,05	Talud distal	0,13	0,03	0,10	-0,01	0,06

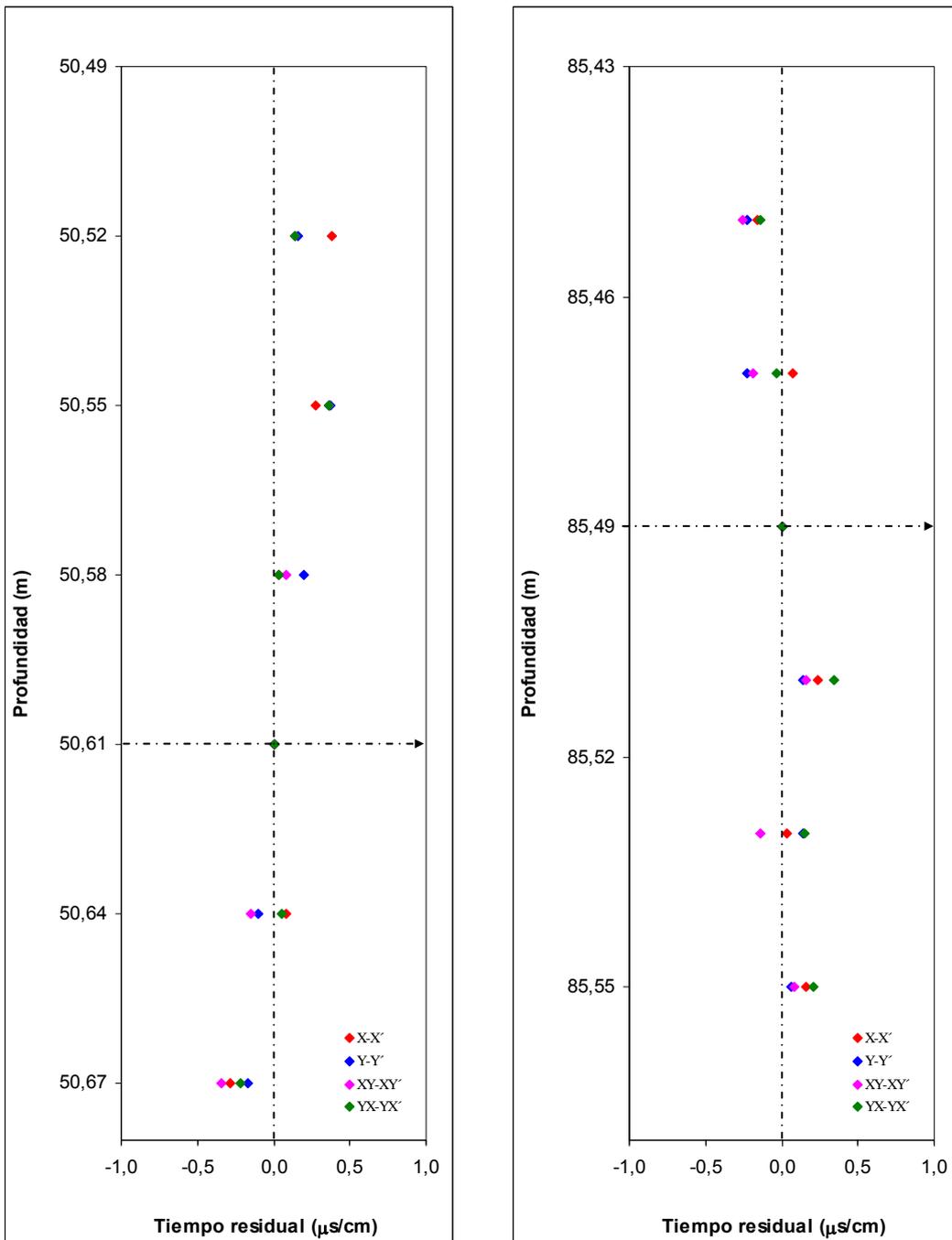


Figura 4.9.- Perfiles de tiempos residuales obtenidos para las muestras MC2-P3, correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (izquierda) y MC2-Y3, correspondiente al talud proximal (derecha). La flecha indica la profundidad de la zona de referencia seleccionada. Los tiempos residuales positivos ponen de manifiesto zonas del testigo donde la porosidad es mayor que en la zona de referencia. Por el contrario, los tiempos residuales negativos, indican la presencia de zonas con mayor porosidad que la zona de referencia. Los gráficos recogen los perfiles de tiempos residuales obtenidos para las cuatro direcciones de medición (X-X', Y-Y', XY-XY' y YX-YX').

Por lo tanto, teniendo en cuenta los aspectos descritos dentro del presente subcapítulo, y para cada una de las litofacies establecidas en Ses Sitjoles, se puede sintetizar que:

- ✚ Lagoon interno (LI): existe una importante diferencia en los valores de velocidad de propagación (V_p) obtenidos para las muestras correspondientes al tramo superior (lagoon oolítico - MC2-A3) y la correspondiente al tramo inferior (lagoon fangoso - MC2-B3).

La primera, con una respuesta ultrasónica bastante homogénea a lo largo de todo el testigo, muestra valores de V_p para los cuatro ejes de medición X-X', Y-Y', XY-XY' y YX-YX' (de ahora en adelante transversales) que oscilan entre 4752 y 4905 m/s, alcanzando un valor medio de 4847 ± 70 m/s. La medida llevada a cabo según el eje axial (Z-Z'), alcanza un valor de 4988 m/s. La segunda, con una distribución mucho más heterogénea a lo largo del testigo, muestra valores entre 3277 y 3515 m/s según estos 4 ejes, con un valor medio de 3433 ± 106 m/s, en todos los casos bastante inferiores a los obtenidos en la primera de las muestras. A lo largo del eje axial, el valor obtenido para esta segunda muestra alcanza los 3568 m/s.

- ✚ Lagoon externo (LE): aunque con ligeras excepciones, el tramo superior del lagoon externo (MC2-D3, MC2-E3, MC2-F2 y MC2-G2), muestra menores valores de velocidad de propagación que el tramo inferior del mismo (MC2-N2, MC2-O3 y MC2-P2), situado por debajo del parche arrecifal. Ambos tramos se caracterizan sin embargo, por mostrar una distribución de velocidades predominantemente heterogénea a lo largo de los testigos estudiados, si bien aparecen algunas excepciones (MC2-F2 y MC2-N2), con una distribución prácticamente homogénea.

Así, el tramo superior muestra valores de V_p que oscilan entre 2712 y 3662 m/s para las mediciones transversales, alcanzando un valor medio de 3097 ± 86 m/s. Las medidas llevadas a cabo según el eje axial (Z-Z'), alcanza un valor medio de 2884 ± 457 m/s, situándose los valores mínimo y máximo en 2528 y 3537 m/s respectivamente. Destaca dentro de este tramo superior, la presencia de muestras con una marcada anisotropía según el eje Z-Z', correspondientes

a las muestras (MC2-D3, MC2-E3), con valores de velocidad aproximadamente un 25 % inferiores a los obtenidos transversalmente al testigo.

El tramo inferior muestra valores de V_p que oscilan entre 2615 y 4404 m/s, alcanzando un valor medio de 3808 ± 130 m/s para las determinaciones transversales. Las medidas llevadas a cabo según el eje axial oscilan entre 2615 y 4392 m/s alcanzando un valor medio de 3362 ± 922 m/s. Como en el tramo superior, destaca dentro de este tramo la presencia de un testigo de sondeo con una marcada anisotropía según el eje Z-Z'. Corresponde con la muestra MC2-O3, donde se han detectado valores de velocidad aproximadamente un 40 % inferiores a los obtenidos perpendicularmente al eje axial del testigo.

✚ Parche arrecifales (PR): junto a la barrera coralina propiamente dicha y el tramo superior del lagoon interno, es la litofacies que presenta los mayores valores de velocidad de propagación de ondas, mostrando los dos testigos analizados (MC2-K3 y MC2-L3) una distribución de velocidades ligeramente heterogénea.

Las medidas llevadas a cabo de manera transversal al eje del testigo, ponen de manifiesto valores de V_p que oscilan entre 3775 y 4567 m/s, alcanzando un valor medio de 4219 ± 91 m/s. Las medidas llevadas a cabo según el eje axial (Z-Z'), alcanzan un valor medio de 4678 ± 144 m/s.

✚ Barrera coralina (BC): es la litofacies que muestra mayores valores de velocidad de propagación de ondas, presentando además una distribución de velocidades ligeramente heterogénea.

Las medidas llevadas a cabo de manera transversal al único testigo analizado (MC2-R4), ponen de manifiesto elevados valores de V_p , que alcanzan valores medios de 5014 ± 201 , situándose los valores mínimo y máximo en 4803 y 5206 m/s respectivamente. Las medidas llevadas a cabo según el eje axial (Z-Z'), alcanzan un valor medio de 5510 m/s, en relación a una menor atenuación según este eje vertical.

✚ Talud proximal (TP): es una de las litofacies que menores valores de velocidad de propagación presenta, tanto en los valores medios como en las medidas correspondientes a cada uno de los cuatro testigos analizados (MC2-T2, MC2-V3, MC2-ρ3 y MC2-Y4). En todos los casos, éstos muestran una distribución ligeramente heterogénea de velocidades.

Las medidas llevadas a cabo de manera transversal al testigo, ponen de manifiesto valores de V_p que oscilan entre 2690 y 3510 m/s, alcanzando un valor medio de 3069 ± 32 m/s. Las medidas llevadas a cabo según el eje axial (Z-Z'), alcanzan un valor medio de 2995 ± 235 m/s, mostrando valores que oscilan entre 2675 y 3208 m/s.

✚ Talud distal (TD): es la litofacies en la que se han obtenidos menores valores medios de velocidad de propagación de ondas, destacando además la presencia de cierta heterogeneidad en la distribución de las velocidades determinadas transversalmente a lo largo del testigo (MC2-Z3), pese a que macroscópicamente corresponde con una muestra muy homogénea.

Los valores de velocidad obtenidos transversalmente al testigo, oscilan entre 2798 y 2814 m/s, alcanzando un valor medio de 2827 ± 26 m/s. Las medidas llevadas a cabo según el eje axial (Z-Z'), alcanzan un valor de 2667 m/s.

4.2.- Propiedades hidráulicas de la roca matriz

Una vez caracterizadas la heterogeneidad y anisotropía de las distintas litofacies presentes en la plataforma carbonatada de Lluçmajor (Mallorca), así como sus características dinámicas, mediante la determinación de la velocidad ultrasónica, se ha procedido a la determinación de las propiedades hidráulicas de dichas litofacies. En este estudio se ha perseguido conocer la capacidad de flujo del agua en el seno de la roca y su capacidad de almacenamiento.

4.2.1.- Introducción y metodología

A escala de roca matriz, la mayor o menor facilidad del agua para moverse en el seno de una roca, viene condicionada por el gradiente de presión (factor externo a la roca) y por el grado de conectividad entre los poros y la facilidad del agua para fluir a través de ellos (factores intrínsecos).

Por ello, es necesario llevar a cabo un estudio detallado de la configuración del sistema poroso (geometría, volumen, distribución, conductos, etc.) y de su funcionalidad hidráulica (Belikov *et al.*, 1967; Zaleskii, 1967; Touloukian *et al.*, 1981; Carmichael, 1982a, b, c; Alonso *et al.*, 1986; Kobranova, 1989; Grolier *et al.*, 1990; Guéguen y Palciauskas, 1992; Guéguen y Palciauskas, 1994; Schön, 1996; Esbert *et al.*, 1997, 1998; Domenico y Schwartz, 1998; Sakaki *et al.*, 1998; Dürrast y Siegesmund, 1999; Lesniak, 1999; Montoto y Esbert, 1999b; Petford *et al.*, 2001; Schild *et al.*, 2001; Flint, 2003b; Flint y Selker, 2003a; Montoto, 2003).

Así, aspectos tales como la cantidad de agua que puede acceder al interior de una roca, la facilidad de ésta para moverse en su seno, y la cinética de dichos procesos, pueden ser conocidas mediante la determinación de la porosidad abierta de la roca (efectiva, no efectiva y cerrada), la succión capilar y permeabilidad de la misma, o la absorción (libre y forzada) y desorción de agua (Alonso *et al.*, 1986, Tournier, 2000; Mosquera *et al.*, 2000, Hilpert y Miller, 2001; Tsakiroglou y Payatakes, 2000; etc.) .

Todas estas propiedades hidráulicas han sido determinadas para cada uno de los 17 testigos de sondeo estudiados a lo largo de la presente Tesis Doctoral, siguiendo el esquema de trabajo que a modo de ejemplo aparece nuevamente reflejado en la figura 4.10. La tabla 4.4 presenta los principales parámetros determinados en estos ensayos hidráulicos, y las respuestas que cada uno de ellos puede aportar.

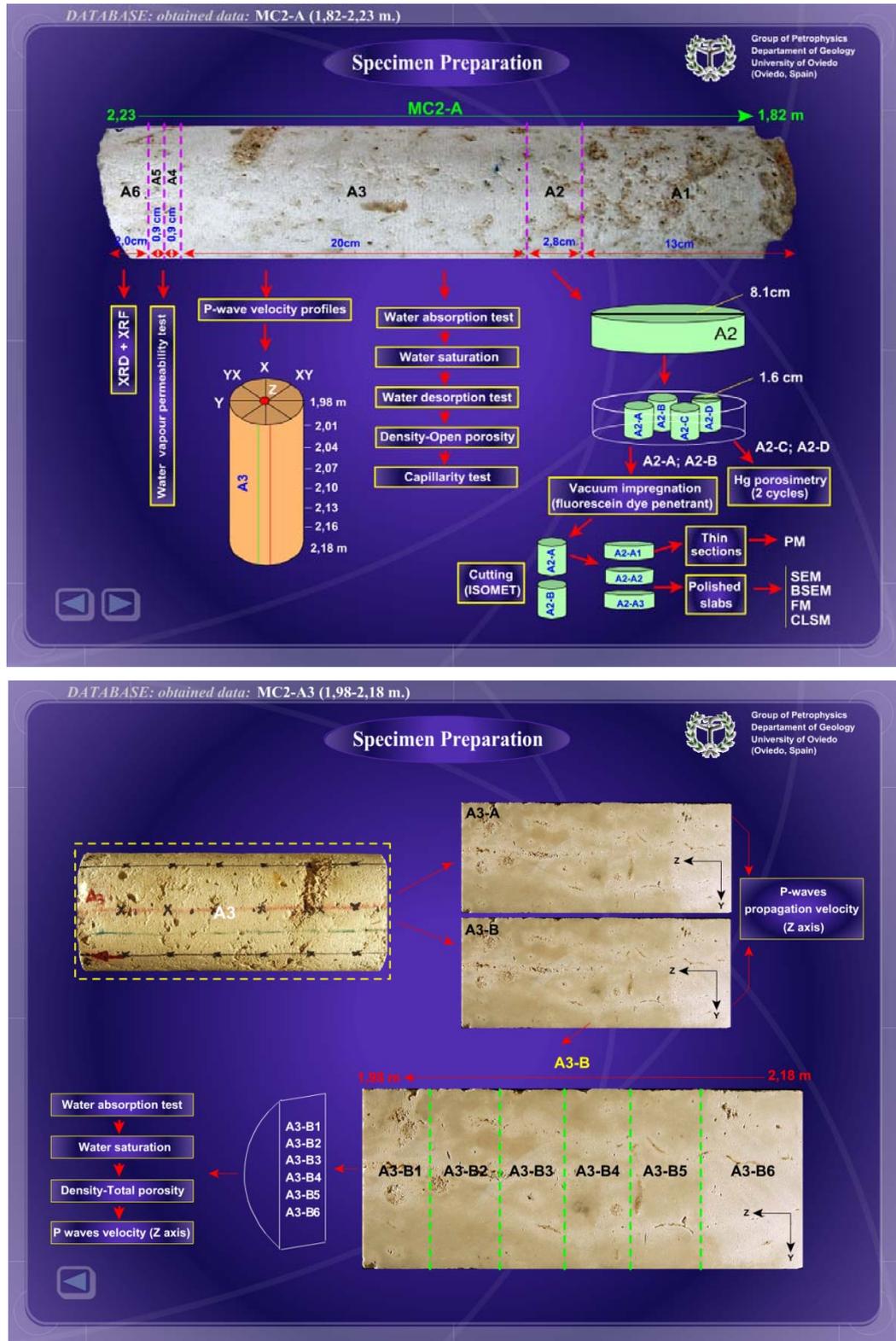


Figura 4.10.- Archivo de datos multimedia recogido en el CD-ROM anexo a la presente tesis. Ejemplo de documentación correspondiente al testigo de sondeo MC2-A; puede observarse los episodios implicados en la realización de los ensayos hidráulicos, zonas del testigo ensayadas, profundidad, especímenes preparados y ensayados, etc.

Tabla 4.4.- Principales cuestiones y propiedades relacionados con el movimiento del agua en el seno de la roca matriz (Montoto *et al.*, 2003, modificado). Las normas de ensayo presentadas corresponden con las utilizadas en los ensayos llevados a cabo en el presente trabajo, aunque existen otras normas susceptibles de ser utilizadas para cada uno de éstos ensayos. * Datos obtenidos indirectamente.

Pregunta	Propiedad	Ensayos	Parámetros	Unidad
¿Cuánto agua puede acceder al interior de una roca matriz?	Porosidad abierta	Determinación de la densidad real y aparente, y de la porosidad total y abierta (EN-1936) Determinación del volumen de poros y distribución del volumen de poros de suelos y rocas mediante porosimetría de inyección de mercurio (ASTM D4404-84)	Porosidad abierta (p_0) Porosidad total (p) Porosidad abierta Porosidad efectiva* Porosidad atrapada*	%
¿Con qué facilidad se mueve el agua en el seno de la roca matriz?	Permeabilidad Capilaridad	Permeabilidad al vapor d'acqua. Normal 21/85 (CNR-ICR, 1985). Permeabilidad al aire (ASTM-D4525-08) Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad (EN-1925)	Coficiente de permeabilidad (K_v) Coficiente de permeabilidad al aire (K) Coficiente absorción capilar (C)	$g/m^2 * 24h$ mD $g/m^2 \cdot s^{0,5}$
¿Con qué rapidez puede entrar y salir el agua en la roca matriz?	Cinética de absorción y evaporación del agua en la roca	Misura dell'indice di asciugamento (Drying Index). Normal 29/88. (CNR-ICR, 1988) Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica (EN-13755)	Índice de secado (DI) Absorción de agua (A_b)	%
¿Cómo son los conductos que unen los poros presentes en la roca?	Tortuosidad del sistema poroso de la roca	Determinación del volumen de poros y distribución del volumen de poros de suelos y rocas mediante porosimetría de inyección de mercurio (ASTM D4404-84)	Histograma de distribución de radios de acceso de poro Superficie específica	radio vs volumen intruido m^2/g

El principio en que se basa la norma europea EN-13755 “Determinación de la absorción libre de agua a presión atmosférica”, ha sido utilizado como punto de partida para la determinación del parámetro denominado “absorción libre de agua” (A_b) en los testigos de sondeo. No obstante, la ejecución de los ensayos ha sido llevada a cabo mediante la utilización de equipos automatizados (AUTOSORC), tal y como se describe a lo largo del subcapítulo 4.2.2., sin variación en los resultados respecto a los ensayos normalizados.

Enlazando con el ensayo anterior, y siguiendo parcialmente la norma europea EN-1936: “Determinación de la densidad real y aparente, y de la porosidad total y abierta”, se han determinado los valores de porosidad abierta (p_o) y densidad aparente (ρ_b) de los testigos de sondeo, que procedentes del ensayo de absorción libre de agua, estaban parcialmente saturados, siendo sometidos éstos a saturación en agua bajo vacío. Esto supone una leve modificación de la norma, que determina que la saturación bajo vacío de las muestras ha de realizarse a partir de muestras completamente secas. En este sentido, y a fin de garantizar que esta modificación no repercutía en los resultados obtenidos, 4 de los testigos fueron nuevamente ensayados siguiendo estrictamente la citada norma EN-1936. Los resultados obtenidos mediante estos dos procedimientos coinciden entre sí.

La saturación de los medios porosos puede ser alcanzada por diferentes metodologías (vacío, presión y ebullición), o más sencillamente, por una prolongada inmersión en agua. A corto plazo, los mejores resultados de saturación se consiguen por medio de vacío (Belikov *et al.*, 1967), por lo que ésta ha sido la técnica utilizada en los ensayos de laboratorio llevados a cabo.

En relación con este ensayo, uno de los parámetros más comúnmente utilizados, es la máxima cantidad de agua que una roca es capaz de absorber cuando ésta es sometida a vacío o presión. Este parámetro no contemplado en las normas EN-1936 y EN-13755, pero recogido bajo diferente terminología por otras normas y autores (Belikov *et al.*, 1967; Esbert *et al.*, 1997; Alonso *et al.*, 1986; etc.), y que en este caso se denominará “saturación en agua” (W_s), está directamente relacionado con el parámetro “absorción libre de agua” (A_b) anteriormente citado, permitiendo obtener un tercer parámetro, que denominaremos “grado de saturación” (S); éste informa sobre el porcentaje de agua que libremente puede rellenar el espacio poroso de una roca, en relación con su máxima capacidad.

Una vez que los testigos de sondeo han sido saturados en agua, mediante vacío, y se han obtenido los parámetros anteriormente descritos (p_o , ρ_b , A_b , W_s y S), se ha realizado un ensayo de evaporación libre de agua o desorción (Normal 29/88, CNR-ICR 1985).

El conjunto de todos estos ensayos, y en especial las curvas de absorción y desorción (en forma de contenido en agua frente al tiempo), junto a los valores de contenido en agua al finalizar el ensayo de absorción “ A_b ” y evaporación “DI”, y el grado de saturación “S”, han contribuido de manera esencial al conocimiento de la capacidad de almacenamiento y el ritmo de ocupación del sistema poroso, es decir, la cinética del movimiento del agua en el seno de la roca.

A su vez, partiendo de los testigos de sondeo utilizados en los ensayos anteriores, y siguiendo el procedimiento de la norma europea EN-1925: “*Determinación del coeficiente de absorción capilar en agua*”, se han llevado a cabo los ensayos de capilaridad, si bien, nuevamente, han sido ejecutados mediante la utilización de equipos automatizados de medición “AUTOSORC”, descritos en el capítulo 4.2.2.

La capilaridad es una importante propiedad hidráulica a escala de roca matriz, que proporciona información sobre la mayor o menor facilidad del agua para moverse en el seno de una roca a través de los conductos capilares de ésta; este movimiento está directamente relacionado con la presión capilar existente “*diferencia de presión a lo largo de la interfase que separa dos fluidos inmiscibles, en el interior de un capilar*”. Como bien es sabido, la mayor o menor succión capilar de un material poroso, viene controlada por el sistema poroso y su estructura capilar (Morel-Seytoux, 1969; Mamillan, 1981; Torraca, 1980, 1982; Guéguen y Palciauskas, 1994; Benavente *et al.*, 2001, 2002; etc.), de tal forma, que en rocas con poros capilares, el ascenso que experimenta el agua a través de éstos, es inversamente proporcional a la apertura de los conductos que unen dichos poros. A fin de cuantificar esta succión capilar, se ha determinado el coeficiente de capilaridad (C), que refleja la cantidad de agua absorbida a través de una superficie específica por unidad de tiempo.

A partir de la información proporcionada por los ensayos hidráulicos (absorción, evaporación y capilaridad), y siguiendo la norma utilizada como punto de partida de estos ensayos hidráulicos (EN-1936: “*Determinación de la densidad real y aparente, y de la porosidad total y abierta*”), se han obtenido los valores de porosidad total (p) y densidad real (ρ_r), íntimamente relacionadas con la porosidad y la mineralogía de la roca respectivamente. De las diferentes alternativas que plantea dicha norma para la obtención de estos parámetros, se ha utilizado el picnómetro de Le Chatelier (Figura

4.11), para lo cual ha sido necesario pulverizar las muestras, y con ello la destrucción parcial de los testigos de sondeo.

No obstante, tal y como aparece esquematizado en las fichas de muestreo recogidas en el archivo de datos multimedia anexo a la presente tesis doctoral, y ejemplarizada en la figuras 3.2 y 4.10, previamente a la realización de este ensayo, los testigos de sondeo han sido cortados longitudinalmente según la dirección de menor velocidad de propagación de ondas P, a fin de poder visualizar óptimamente los espacios vacíos presentes.

De las dos partes obtenidas, una ha sido guardada por si posteriormente fuese necesario realizar alguna comprobación; la otra mitad ha sido subdividida en especímenes más pequeños en función de la heterogeneidad del testigo (deducida de su comportamiento ultrasónico), determinando la porosidad total (p) y la densidad real (ρ_r) de estos nuevos especímenes. El objetivo es obtener una información pormenorizada de estos dos parámetros a lo largo de todo el testigo de sondeo, y una evaluación racional de sus rangos de variación.



Figura 4.11.- Izquierda; Picnómetro de Le Chatelier utilizado para la determinación de la porosidad cerrada de los testigos de sondeo, con la muestra en polvo en su interior y enrasado con agua. Derecha; detalle de varios picnómetros de Le Chatelier dentro de una campana de vacío durante la realización de un ensayo.

Finalizada esta etapa, la última de las propiedades hidráulicas determinada en el presente trabajo ha sido la permeabilidad. La permeabilidad es utilizada para conocer la facilidad de una roca para transmitir fluidos a través de su sistema poroso, cuando éstos se ven sometidos a un gradiente de presión. A escala de la roca matriz, dicha permeabilidad viene controlada fundamentalmente por la estructura y el volumen del sistema poroso de la roca; así, porosidad abierta, distribución de los radios de acceso de poro, tamaño y forma de los poros, rugosidad superficial del sistema poroso, tortuosidad, conectividad, etc., son algunas de las principales características petrofísicas con influencia en la permeabilidad de una roca (Montoto *et al.*, 1999a; Zhang *et al.*, 2002; Flint y Selker, 2003a;).

De manera general, y a esta escala de observación, puede afirmarse que la permeabilidad aumenta al incrementarse tanto la porosidad como el tamaño de grano de la roca, disminuyendo al descender el radio de acceso de poro o al aumentar el grado de compactación o cementación de la misma.

A fin de cuantificar esta permeabilidad, y siguiendo el principio en que se basa la norma italiana Normal 21/85 (CNR-ICR, 1985), “*Determinación de la permeabilidad al vapor de agua*” se ha determinado el coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (K_v'), que refleja el flujo de vapor de agua que atraviesa un volumen específico de roca por unidad de tiempo, al verse sometido a un gradiente de presión en forma de humedad. Como en los casos anteriores, los ensayos han sido ejecutados mediante la utilización de equipos automatizados (AUTOSORC).

Por su parte, la permeabilidad al agua (K) de las distintas litofacies ha sido determinada por el Swiss Federal Institute of Technology de Zürich (ETH) y por el Institut des Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Espace de Montpellier (ISTEEM), socios ambos del proyecto ALIANCE dentro del cual se enmarca el presente trabajo. Los resultados obtenidos han sido cedidos por éstos y aparecen recogidos en el capítulo 4.2.3.

4.2.2.- Equipos automatizados de medición de propiedades hidráulicas

La determinación de las propiedades hidráulicas descritas en el subcapítulo 4.2.1, al igual que el resto de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos,

están basadas en una serie de normas internacionales (EN, CNR-ICR, ASTM, ISRM, etc.). Frecuentemente, la aplicación de todas estas normas, conlleva una continua manipulación de las muestras, que, en rocas poco consistentes pueden conducir a numerosos errores, en ocasiones significativos, causados principalmente por la continua interrupción de los procesos hidráulicos para la toma de datos y por la pérdida de material en muestras poco consistentes.

Con el fin de solucionar las principales fuentes de error derivadas de estos ensayos estandarizados, se vienen desarrollando en los últimos años, una serie de equipos de medición automatizada. Cabe destacar los desarrollados por Colantuono *et al.*, 1997; Janz, 1997, de la Universidad de Cassino (Italia) y Lund (Suecia), que permiten determinar de manera automatizada y continua la absorción de agua por capilaridad. Sin embargo, han sido Martín *et al.*, 1997; 2000; Navas, 2005, de la Universidad de Cádiz (España), los que hasta el momento han conseguido desarrollar un sistema que permite determinar diversas propiedades hidráulicas sin cambiar de dispositivo experimental.

El equipo desarrollado por estos autores, denominado AUTOSORC, permite medir de manera continua la masa de la muestra sin necesidad de extraerla del equipo, lo que posibilita un control eficaz, exhaustivo y continuado del proceso hidráulico que se está estudiando, al tiempo que se ajusta a los requerimientos de las normativas al uso (Figuras 4.12 y 4.13). Además, permite trabajar con muestras irregulares (a excepción de los ensayos de capilaridad y permeabilidad que necesitan al menos muestras con una cara plana), así como la realización de ensayos con diferentes fluidos (agua destilada, disoluciones salinas, disolventes orgánicos, etc.).



Figura 4.12.- Aspecto de uno de los tres equipos computerizados (AUTOSORC) utilizados para la determinación de las propiedades hidráulicas de los testigos procedentes del sondeo MC2.

El equipo está controlado por medio de un sencillo software (Figura 4.13) que permite realizar las modificaciones necesarias para la realización de cada ensayo, así como el control de las condiciones ambientales para su medición.

Todo eso supone un avance sustancial con respecto a la normativa clásica, ya que se dispone de un sistema que presenta un alto grado de automatización al ser controlado por ordenador (Figuras 4.14 y 4.15), que permite medir de forma continua las siguientes propiedades hidráulicas: absorción libre de agua por inmersión total, desorción libre de agua (evaporación), absorción de agua por capilaridad (succión capilar), permeabilidad al vapor de agua, y absorción de vapor de agua (higroscopía), éste último no realizado en el presente trabajo, todas ellas en las condiciones de T (°C) y HR (%) especificadas por las normas aplicadas para cada ensayo y descritas a lo largo del presente subcapítulo.

- ✚ Absorción de agua por inmersión total: masa de agua absorbida por una muestra, libre de humedad, al ser sumergida completamente en agua. El ensayo se realiza a presión ambiente, es decir sin la aplicación de un gradiente de presiones, pero con control de la temperatura. El control de la humedad relativa no es relevante en este caso (Figuras 4.14a y 4.15b).
- ✚ Desorción libre de agua: medida de la cantidad de agua que se evapora, de una muestra porosa previamente saturada de agua, en condiciones externas controladas de humedad y temperatura (Figuras 4.14b y 4.15b).
- ✚ Absorción de agua por capilaridad: se mide la cantidad de agua destilada absorbida por la muestra por unidad de superficie de contacto. El experimento debe realizarse en una atmósfera con temperatura y humedad relativa controladas, en donde al menos la cara inferior en contacto con el agua debe ser perfectamente plana (Figuras 4.14c y 4.15c).
- ✚ Permeabilidad al vapor: consiste en la medida de la cantidad de vapor de agua que atraviesa un material poroso al situar una muestra de éste como único camino de paso entre dos atmósferas, una con una humedad relativa cercana al 100 % y otra lo más seca posible, esta última generada mediante la utilización de gel de sílice (Figuras 4.14d y 4.15d).

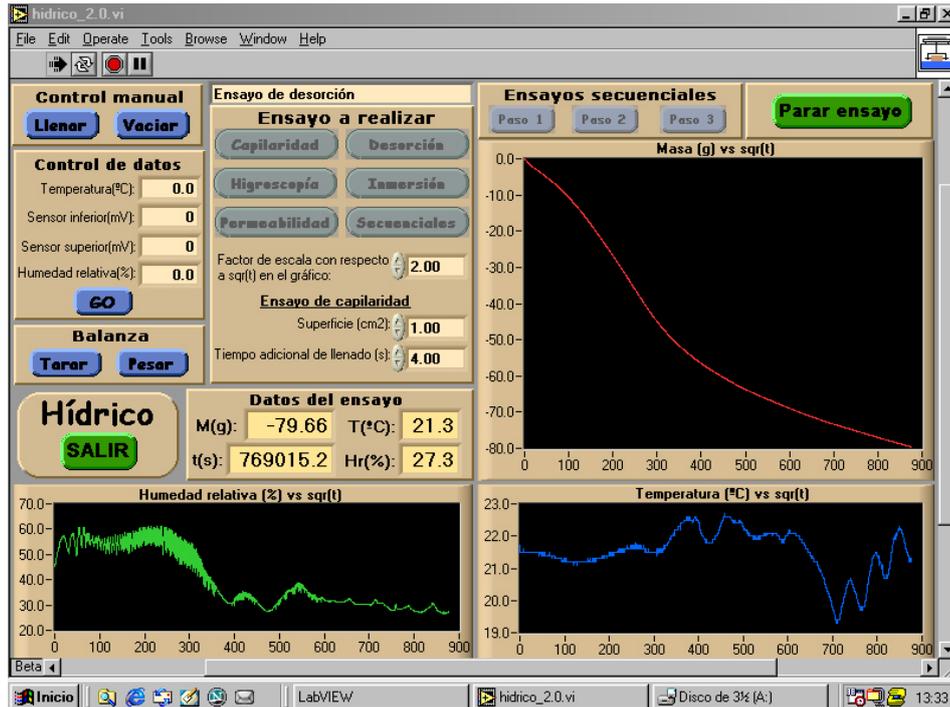
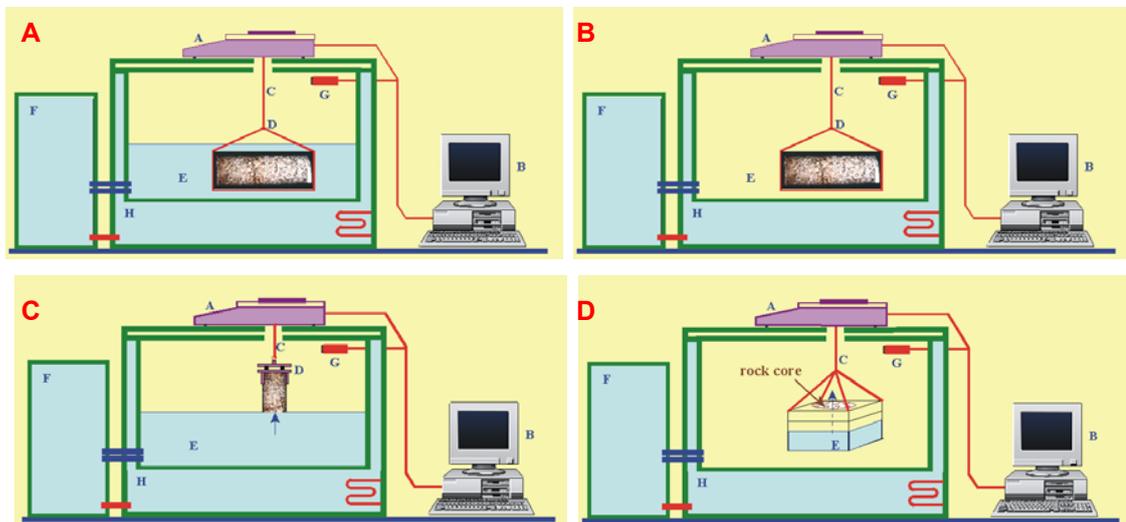


Figura 4.13.- Detalle del menú de visualización del software que controla los equipos AUTOSORC. El equipo se controla mediante un software de sencillo manejo. La fotografía muestra la curva (línea roja) que se va construyendo durante el ensayo de evaporación en ejecución. Las curvas verde y azul muestran en continuo los valores de humedad y temperatura en el interior de la cámara de ensayo.



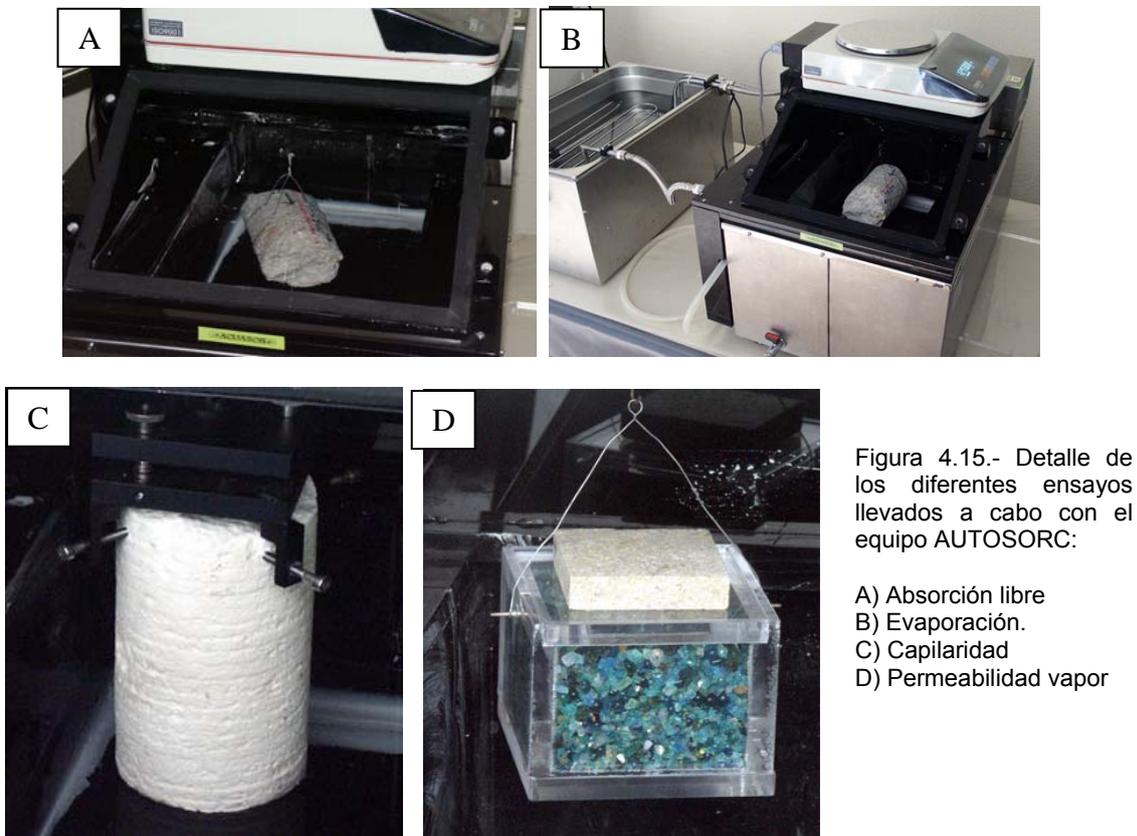
A: Balanza de precisión
 B: Sistema computerizado de medición
 C: Sistema de sujeción a la balanza
 D: Sistema de sujeción de muestras

E: Muestra a estudiar y cámara de ensayo
 F: Depósito de agua con sistema de circulación
 G: Sensores ambientales (Hr % y T °C)
 H: Sistema de calentamiento y recirculación del agua

Figura 4.14.- Detalle del funcionamiento del equipo AUTOSORC para cada uno de las propiedades hidráulicas llevadas a cabo a lo largo de este trabajo. A) Ensayo de absorción libre de agua, B) Ensayo de evaporación, C) Ensayo de absorción capilar y, D) Ensayo de permeabilidad al vapor de agua.

Cuatro son por lo tanto las ventajas que presenta este dispositivo: medición continua del proceso hidráulico estudiado, posibilidad de analizar periodos iniciales de comportamientos cinéticos, un perfecto control del nivel de agua, humedad relativa y temperatura en cada ensayo, y la existencia de un conjunto de portamuestras específicos que permiten sujetar muestras de diferente morfología.

En este sentido, los equipos utilizados para los ensayos referidos a la presente Tesis Doctoral, han sido especialmente diseñados a petición del Grupo de Petrofísica de la Universidad de Oviedo, para poder utilizar testigos de gran tamaño (hasta 30 cm de longitud), lo cual implica poder utilizar mayores volúmenes más representativos de roca (Hubbert, 1956; Hudson, 1989; Bear, 1972; Wei *et al.*, 1995). Pero lo más importante es que permiten utilizar muestras con tamaños y morfologías diferentes, incluyendo incluso, discontinuidades a escala de macizo; siendo posible de esta manera, la evaluación de la influencia hidráulica de dichas discontinuidades en el conjunto de los tramos de testigo caracterizados. El objetivo es poder integrar la información a dos escalas diferentes, roca matriz y escala de macizo (Montoto, 2003), es decir, contemplar la realidad del medio geológico: medios de “doble porosidad”.



4.2.3.- Resultados obtenidos

El análisis de los diferentes parámetros obtenidos a partir de los ensayos hidráulicos, pone de manifiesto importantes diferencias en el comportamiento que las distintas litofacies muestran frente al agua, tanto en lo que a capacidad de almacenamiento se refiere, como en la facilidad de flujo de este fluido a través de los poros y conductos que conforman el sistema poroso de la roca.

De los testigos seleccionados a lo largo del sondeo MC2, son los correspondientes al talud distal y proximal, y al tramo superior y la base del tramo inferior del lagoon externo, los que muestran los mayores valores de porosidad abierta situándose en todos los casos por encima del 30 %, y alcanzando algunas de las muestras estudiadas valores del 40-45 % (Tabla 4.5).

Por el contrario, los menores valores corresponden a los testigos muestreados dentro del tramo inferior del lagoon externo (a excepción de la base), tramo no carstificado de la barrera coralina y el parche arrecifal, con valores de porosidad abierta por debajo del 20 %, que en algunos de los testigos analizados llegan a ser inferiores al 10 %.

Tabla 4.5.- Valores de porosidad abierta al agua (p_o), densidad aparente (ρ_b) y contenido en agua en saturación (Ws), obtenidos en un mismo ensayo sobre testigos de sondeo completos (cm-dm). Los resultados correspondientes a los testigos MC2-B3 y MC2- ρ 3 han sido desestimados debido a los procesos de disgregación que sufren las muestras al ser sumergidas en agua.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Densidad (Kg/m ³)	Porosidad (%)	Saturación en agua
			Aparente (ρ_b)	p_o (%)	Ws (%)
MC2-A3	1,98-2,18	Lagoon interno	2277	8,85	3,89
MC2-B3	5,89-5,96		---	---	---
MC2-D3	14,54-14,66	Lagoon externo	1610	37,35	23,20
MC2-E3	17,35-17,46		1442	45,60	31,61
MC2-F2	19,24-19,43		1586	39,65	25,00
MC2-G2	21,37-21,48		1773	29,03	16,37
MC2-K3	33,35-33,47	Parche arrecifal	2091	19,89	9,51
MC2-L3	34,32-34,49		2219	15,84	7,14
MC2-N2	42,12-42,31	Lagoon externo	2118	18,66	8,81
MC2-O3	48,16-48,29		2161	18,78	8,69
MC2-P2	50,49-50,68		1628	35,26	21,66
MC2-R4	56,60-56,77	Barrera	2383	7,77	3,26
MC2-T2	60,79-60,90	Talud proximal	1716	37,16	21,66
MC2-V3	69,88-70,00		1509	41,51	27,50
MC2- ρ 3	81,05-81,12		---	---	---
MC2-Y4	85,43-85,57		1589	36,87	23,20
MC2-Z3	88,94-89,05	Talud distal	1630	33,08	20,30

En segundo término, la determinación de la porosidad cerrada, ha permitido por un lado, y dada la heterogeneidad que muestran la mayor parte de los testigos, conocer el rango de porosidad presente en cada uno de ellos (Tabla 4.6), y por el otro, determinar el valor de su porosidad total (Figura 4.16).

En este sentido, la obtención de la porosidad cerrada de los testigos de sondeo (Figura 4.18), a partir de la diferencia entre la porosidad total y la porosidad abierta, permitirá ajustar los perfiles de porosidad total deducidos tanto de los estudios ultrasónicos (laboratorio) como de las herramientas geofísicas de campo (logging), ya que tan sólo, la porosidad abierta tiene significado hidráulico.

Tabla 4.6.- Valores de porosidad abierta (p_o) y porosidad total (p) al agua, obtenidos sobre los especímenes obtenidos de una de las dos mitades en que han sido longitudinalmente cortados los testigos de sondeo estudiados. Junto a estos valores de porosidad, se aportan los datos de densidad aparente (ρ_b), densidad real (ρ_r) y contenido en agua en saturación (W_s), valores todos ellos obtenidos en el mismo ensayo. Dada la particularidad de la muestra MC2-O3, no se ha llevado a cabo este ensayo sobre la misma, por haber sido distribuida entre los participantes del proyecto ALIANCE.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Densidad (Kg/m3)		Porosidad (%)		Saturación en agua
			Aparente (ρ_b)	Real (ρ_r)	p_o (%)	p (%)	W_s (%)
MC2 (A3B1a a A3B6)	1,98-2,18	Lagoon interno	2276 ± 22	2703 ± 8	8,86 ± 1,17	15,80 ± 0,83	3,89 ± 0,55
MC2 (B3B1 a B3B2)	5,89-5,96		2158 ± 8	2686 ± 4	21,80 ± 2,3	24,30 ± 1,2	12,20 ± 2,13
MC2 (D3B1 a D3B4)	14,54-14,66	Lagoon externo	1611 ± 65	2661 ± 13	35,74 ± 2,08	39,47 ± 2,31	22,21 ± 2,18
MC2 (E3B1 a E3B4)	17,35-17,46		1519 ± 52	2667 ± 15	42,64 ± 1,92	43,04 ± 2,22	28,12 ± 2,22
MC2 (F2B1 a F2B6)	19,24-19,43		1574 ± 25	2719 ± 15	41,34 ± 0,87	42,11 ± 1,09	26,28 ± 0,96
MC2 (G2B1 a G2B3)	21,37-21,48		1789 ± 231	2639 ± 44	28,33 ± 9,93	32,24 ± 8,13	16,50 ± 7,82
MC2 (K3B1 a K3B3)	33,35-33,47	Parche arrecifal	2092 ± 47	2690 ± 8,98	19,38 ± 1,79	22,22 ± 1,88	9,28 ± 1,06
MC2 (L3B1 a L3B3)	34,32-34,49		2285 ± 83	2703 ± 8	14,17 ± 2,60	15,47 ± 2,82	6,24 ± 1,40
MC2 (N2B1 a N2B6)	42,12-42,31	Lagoon externo	2130 ± 46	2710 ± 8	20,03 ± 1,53	21,37 ± 1,78	9,42 ± 0,91
MC2-O3	48,16-48,29		---	---	---	---	---
MC2 (P2B1 a P2B6)	50,49-50,68		1595 ± 77	2744 ± 104	40,40 ± 2,86	41,75 ± 4,32	25,47 ± 3,05
MC2 (R4B1 a R4B4)	56,60-56,77	Barrera	2388 ± 69	2715 ± 1,06	9,35 ± 3,20	12,04 ± 2,54	3,94 ± 1,48
MC2 (T2B1 a T2B3)	60,79-60,90	Talud proximal	1729 ± 23	2804 ± 3	37,74 ± 0,82	38,30 ± 0,87	21,82 ± 0,76
MC2 (V3B1 a V3B3)	69,88-70,00		1571 ± 138	2704 ± 19	40,51 ± 5,38	41,92 ± 4,72	26,14 ± 6,07
MC2 (ρ_3B1 a ρ_3B2)	81,05-81,12		---	---	---	---	---
MC2 (Y4B1 a Y4B3)	85,43-85,57		1582 ± 53	2737 ± 7	40,04 ± 2,13	42,20 ± 1,90	25,36 ± 2,18
MC2 (Z3B1 a Z3B3)	88,94-89,05	Talud distal	1622 ± 11	2782 ± 6	36,51 ± 0,73	41,70 ± 0,29	22,51 ± 0,60

Del análisis de los datos recopilados en las tablas y gráficos anteriores, se deduce que tan sólo en la parte alta del lagoon interno, coincidiendo con las calizas oolíticas características de este tramo, los valores de porosidad cerrada llegan a ser importantes, representando el 43 % de la porosidad total de la roca, que se sitúa alrededor del 15,8 %. Esta porosidad cerrada se encuentra asociada a los oolitos que forman mayoritariamente la caliza, con su típica porosidad cerrada de tipo intragranular.

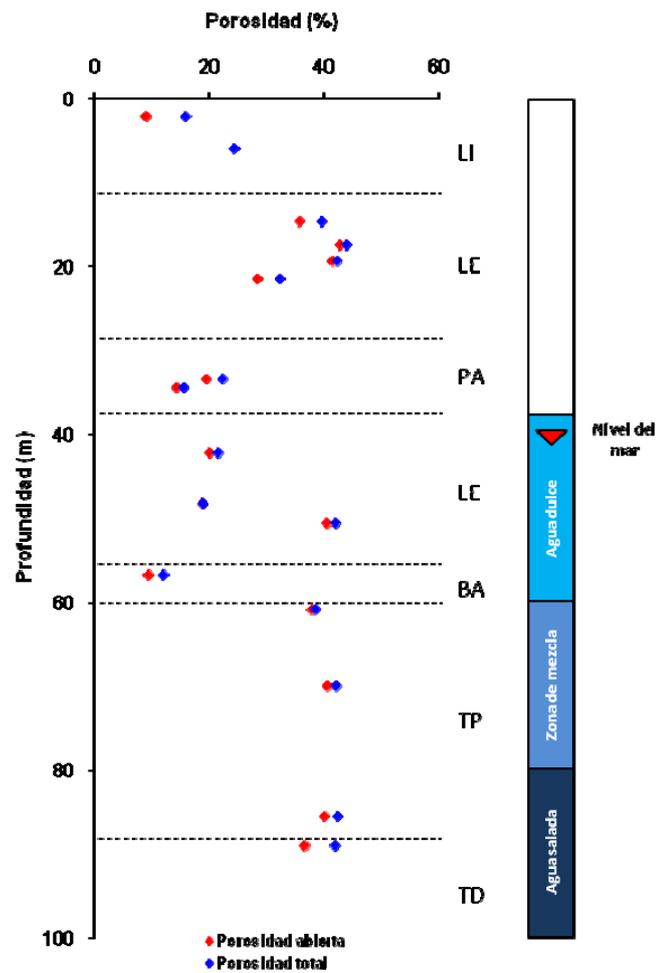


Figura 4.16.- Perfiles donde se recogen los valores medios de porosidad abierta y porosidad total para cada uno de los testigos de sondeo estudiados. Cada punto rojo corresponde con el valor medio de porosidad abierta al agua obtenida cada uno de los especímenes analizados dentro de un mismo testigo de sondeo. Cada punto azul corresponde con el valor de la porosidad cerrada obtenido de la misma manera. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

Destaca también el elevado valor de porosidad cerrada (2,7 %) obtenido para la muestra estudiada dentro de la barrera coralina, que representa un 22 % de la porosidad total de este testigo (MC2-R4), que alcanza valores máximos de porosidad total del 12 %. El resto de los testigos analizados, presentan valores de porosidad cerrada muy dispares, que oscilan entre el 0,4-12,6 % de la porosidad total de la roca, situándose los valores medios de porosidad cerrada para el sondeo MC2 en $9,8 \pm 10,4$ en porcentaje relativo frente a la porosidad total.

Es evidente que la porosidad total carece de funcionalidad hidráulica por tratarse de poros cerrados; por consiguiente, es necesario determinar el volumen de la porosidad abierta a lo largo de la cual el agua circula con facilidad. Esta facilidad viene condicionada por la presencia de poros y conductos bien comunicados y de baja tortuosidad (porosidad efectiva); por el contrario, en parte de la porosidad abierta, el agua entra y se mueve con dificultad, es la denominada porosidad no efectiva o atrapada. Todo esto resulta de gran interés a la hora de conocer el potencial de descarga y recarga del acuífero de cara a su explotación.

La evaluación de la porosidad efectiva y no efectiva asociada de los testigos de sondeo estudiados, junto al exhaustivo estudio de la configuración del sistema poroso de la roca (que será llevada a cabo en el subcapítulo 4.4) puede realizarse a partir de la relación entre la absorción libre y absorción forzada de agua (Tablas 4.7-4.8 y Figura 4.17), y a través de la cinética de los procesos de absorción y evaporación de agua (gráficas de contenido en agua frente al tiempo), información que se incluye en todos los ensayos hidráulicos realizados.

Tabla 4.7.- Valores de porosidad abierta (p_o), porosidad abierta efectiva (p_e) y porosidad abierta no efectiva o atrapada (p_t), obtenidos como resultado de la relación entre el ensayo de absorción libre de agua y absorción forzada de agua. Los resultados correspondientes a los testigos MC2-B3 y MC2-p3 han sido desestimados debido a los procesos de disgregación que sufren las muestras al ser sumergidas en agua.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Porosidad al agua		
			Abierta	Efectiva	No efectiva
			p_o (%)	p_e (%)	p_t (%)
MC2-A3	1,98-2,18	Lagoon interno	8,85	4,60	4,26
MC2-B3	5,89,5,96		—	—	—
MC2-D3	14,54-14,66	Lagoon externo	37,35	13,63	23,72
MC2-E3	17,35-17,46		45,60	19,22	26,38
MC2-F2	19,24-19,43		39,65	24,12	15,53
MC2-G2	21,37-21,48		29,03	17,06	11,96
MC2-K3	33,35-33,47	Parche arrecifal	19,89	5,13	14,75
MC2-L3	34,32-34,49		15,84	5,36	10,47
MC2-N2	42,12-42,31	Lagoon externo	18,66	4,87	13,79
MC2-O3	48,16-48,29		18,78	16,40	2,37
MC2-P2	50,49-50,68		35,26	14,00	21,27
MC2-R4	56,60-56,77	Barrera	7,77	2,39	5,38
MC2-T2	60,79-60,90	Talud proximal	37,16	16,70	20,45
MC2-V3	69,88-70,00		41,51	20,84	20,68
MC2-p3	81,05-81,12		—	—	—
MC2-Y4	85,43-85,57		36,87	17,78	19,09
MC2-Z3	88,94-89,05	Talud distal	33,08	17,50	15,59

Tabla 4.8.- Parámetros obtenidos tras los ensayos de absorción libre y forzada de agua, y tras el ensayos de desorción o evaporación.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Ensayo absorción libre de agua			Ensayo desorción libre de agua	
			Abs. libre (7 días)	Abs. Forzada	Grado de saturación	Des. libre (7 días)	Grado de saturación
			A _b (%)	W _s (%)	S (%)	W _{7d} (%)	S (%)
MC2-A3	1,98-2,18	Lagoon interno	2,02	3,90	51,91	0,80	20,46
MC2-B3	5,89,5,96		—	—	—	—	—
MC2-D3	14,54-14,66	Lagoon externo	8,10	22,20	36,49	0,10	0,42
MC2-E3	17,35-17,46		11,80	28,00	42,14	2,05	6,48
MC2-F2	19,24-19,43		16,00	26,30	60,84	0,37	1,49
MC2-G2	21,37-21,48		9,70	16,50	58,79	1,75	10,67
MC2-K3	33,35-33,47	Parche arrecifal	2,40	9,30	25,81	0,11	1,20
MC2-L3	34,32-34,49		2,10	6,20	33,87	0,64	8,96
MC2-N2	42,12-42,31	Lagoon externo	2,30	8,81	26,11	0,06	0,68
MC2-O3	48,16-48,29		7,60	8,70	87,36	0,02	0,08
MC2-P2	50,49-50,68		10,20	25,70	39,69	1,07	4,92
MC2-R4	56,60-56,77		1,20	3,90	30,77	0,00	0,04
MC2-T2	60,79-60,90	Talud proximal	9,80	21,80	44,95	0,39	1,80
MC2-V3	69,88-70,00		13,10	26,10	50,19	0,20	0,73
MC2-p3	81,05-81,12		—	—	—	—	—
MC2-Y4	85,43-85,57		12,20	25,30	48,22	0,13	0,83
MC2-Z3	88,94-89,05	Talud distal	11,90	22,50	52,89	0,42	2,05

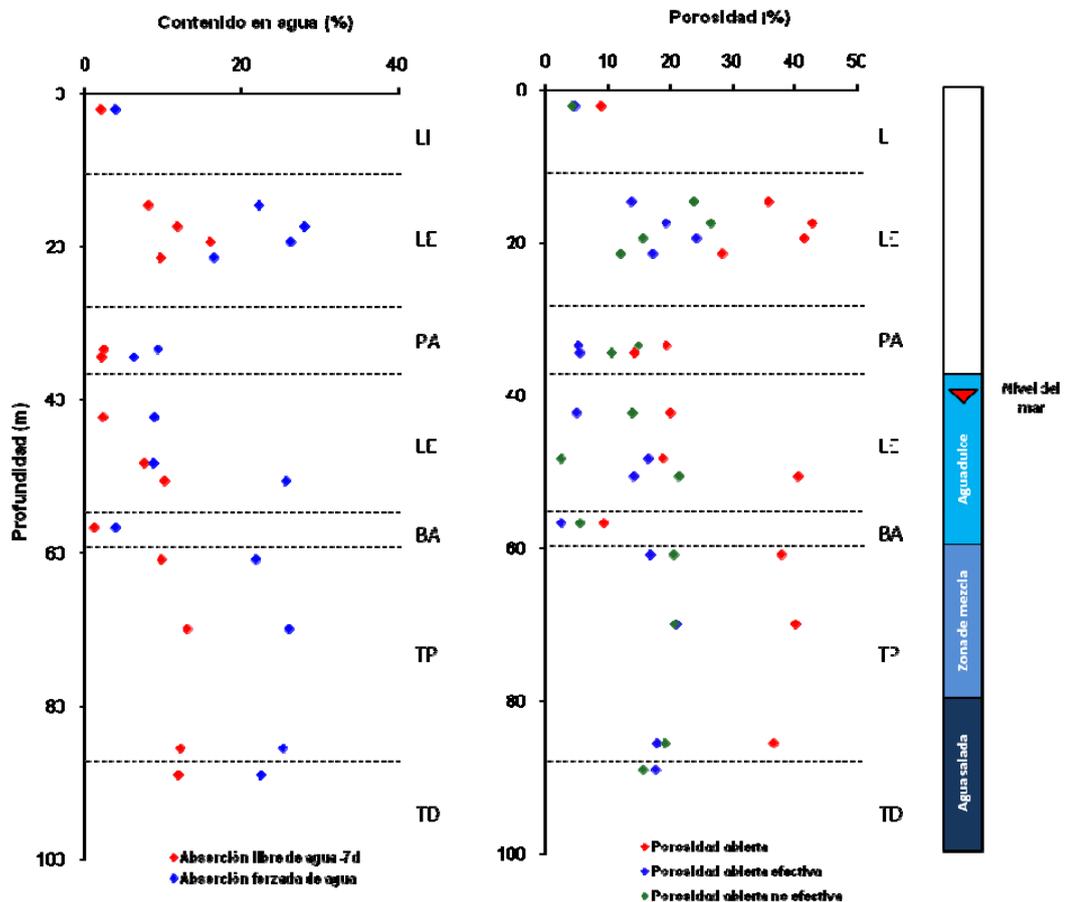


Figura 4.17.- Perfiles donde se recogen los valores obtenidos en los ensayos de absorción libre de agua y absorción forzada de agua (izquierda), y los valores de porosidad; abierta, abierta efectiva y abierta no efectiva o atrapada (derecha), deducidos de los ensayos anteriores, llevados a cabo sobre cada uno de los testigos de sondeo estudiados. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

De las tablas y gráficos anteriores se deduce que, a excepción de la muestra MC2-O3, entre el 25 y el 75 % de la porosidad abierta de los testigos ensayados, está representada por una porosidad no efectiva o atrapada; donde el agua penetra de manera muy lenta, con suma dificultad y en muchos casos, una vez dentro, será difícil de extraer o de provocar su movilización, incluso bajo elevados gradientes de presión.

Así, para todo el sondeo estudiado, de los valores medios de porosidad abierta inicialmente obtenidos ($28,5 \pm 11,5$ %), tan sólo el $13,6 \pm 6,6$ % correspondería a porosidad efectiva, mientras que el $14,62 \pm 6,9$ % restante, estaría en relación con una porosidad no efectiva o atrapada, donde la migración del agua es sumamente costosa.

Este fenómeno, claramente observable en las cinéticas de absorción y evaporación libres de agua (Figuras 4.18 a 4.20), así como, en la diferencia entre los valores del contenido en agua obtenido en los ensayos bajo presión atmosférica (libre) y bajo vacío (forzada), pone de manifiesto complejos sistemas porosos, donde al menos una parte importante del mismo está mal comunicado, debido predominantemente, a la existencia de conductos estrechos y tortuosos que dificulta la circulación del agua.

En términos generales puede afirmarse que la cinética de los procesos de absorción evidencia, en la mayor parte de los casos, un tramo inicial de elevada pendiente que pone de manifiesto una rápida absorción de agua en los momentos iniciales del ensayo (1 h). Correspondería con el llenado de los poros de mayor diámetro y mejor comunicados, donde aproximadamente entra el 80-90 % del agua que toma la roca en todo el ensayo de absorción libre. El tramo siguiente se caracteriza por una pendiente más o menos suave, que indica una absorción muy lenta, lo que pone de manifiesto un sistema poroso más o menos complejo, con conductos tortuosos y/o mal comunicados. Finalizado el ensayo de absorción, tras siete días de ensayo, en la mayor parte de los casos el grado de saturación alcanzado por los testigos se sitúa por debajo del 60% y muy habitualmente por debajo del 50 %.

Partiendo de testigos saturados en agua bajo vacío, la cinética de las curvas de evaporación obtenidas, con pendientes relativamente suaves y, donde tan sólo tras 6-7 días de secado en condiciones de laboratorio (25 °C - 75 % humedad) se alcanzan valores de saturación en agua por debajo del 5 %, confirma la presencia de sistemas porosos complejos en la mayor parte de los testigos.

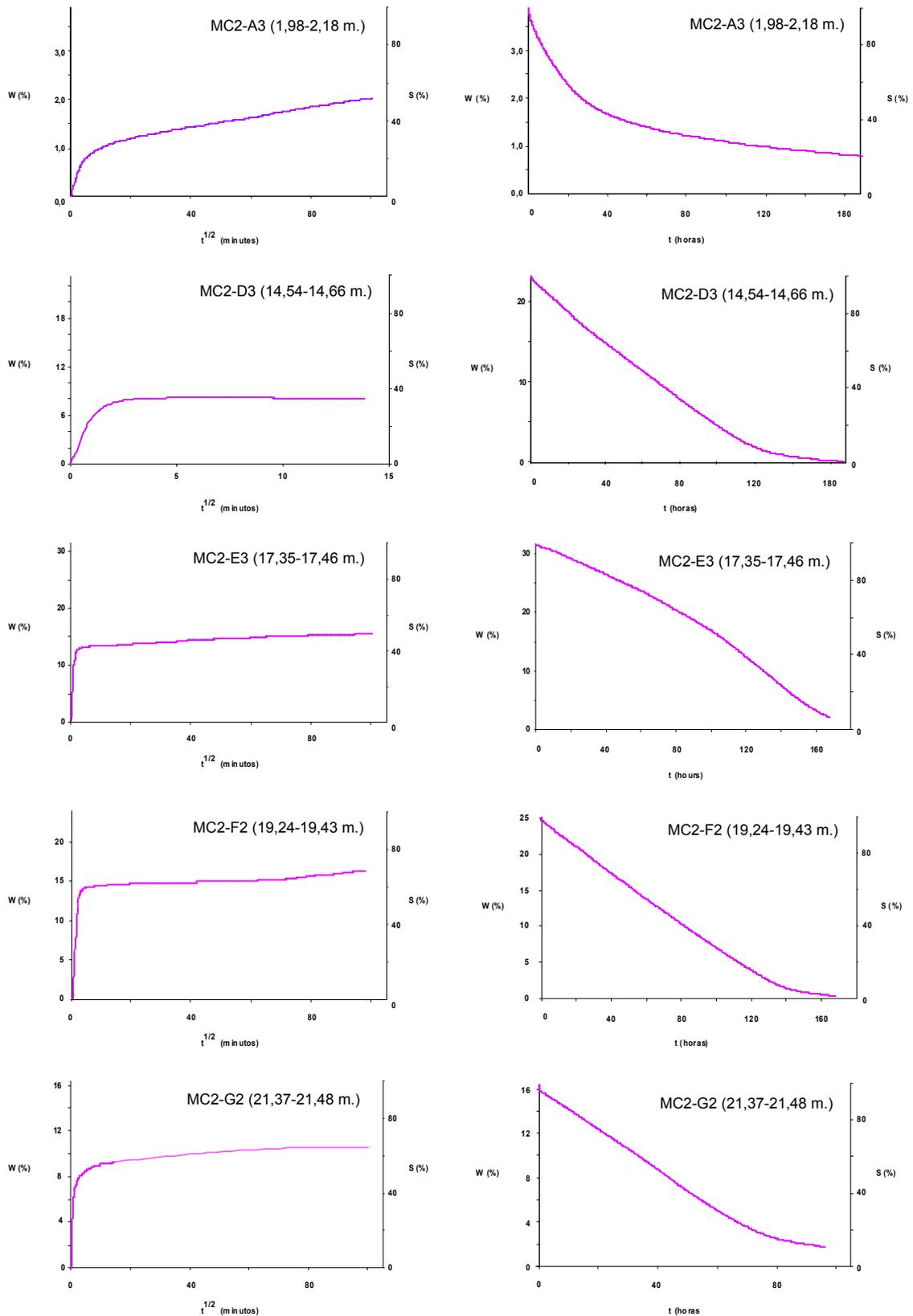


Figura 4.18.- Curvas de absorción libre de agua (izquierda) y evaporación (derecha) obtenidos para algunos de los testigos de sondeo ensayados. Salvo en el primer testigo de sondeo, la cinética de ambos procesos es muy similar, aunque el contenido en agua alcanzado tras el ensayo de absorción y el contenido en agua residente en la roca tras la evaporación, varía notablemente de unos testigos a otros.

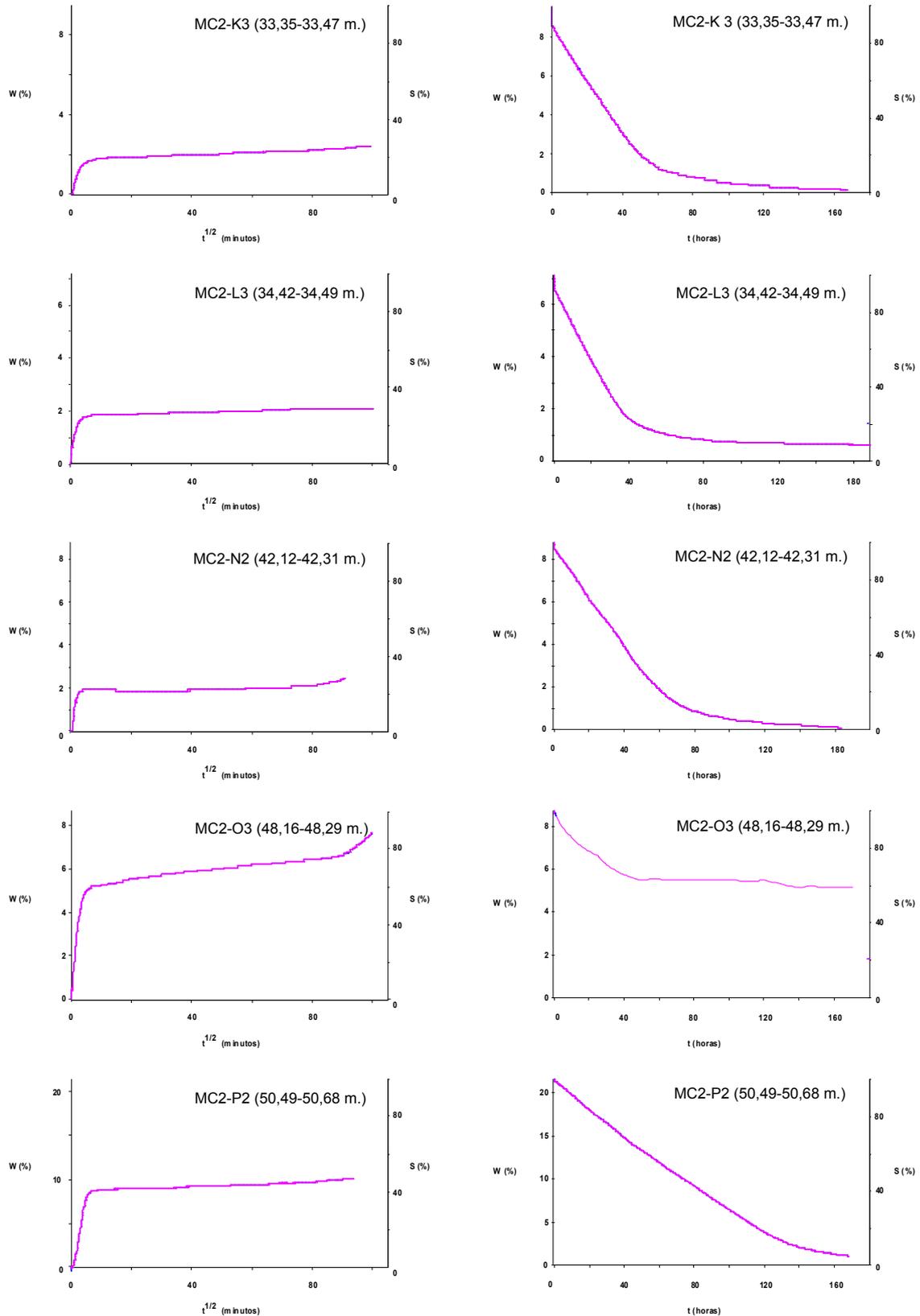


Figura 4.19.- Curvas de absorción libre de agua (izquierda) y evaporación (derecha) obtenidos para algunos de los testigos de sondeo ensayados. Salvo en el cuarto testigo de sondeo, la cinética de ambos procesos es muy similar, aunque el contenido en agua alcanzado tras el ensayo de absorción y el contenido en agua residente en la roca tras la evaporación, varía notablemente de unos testigos a otros.

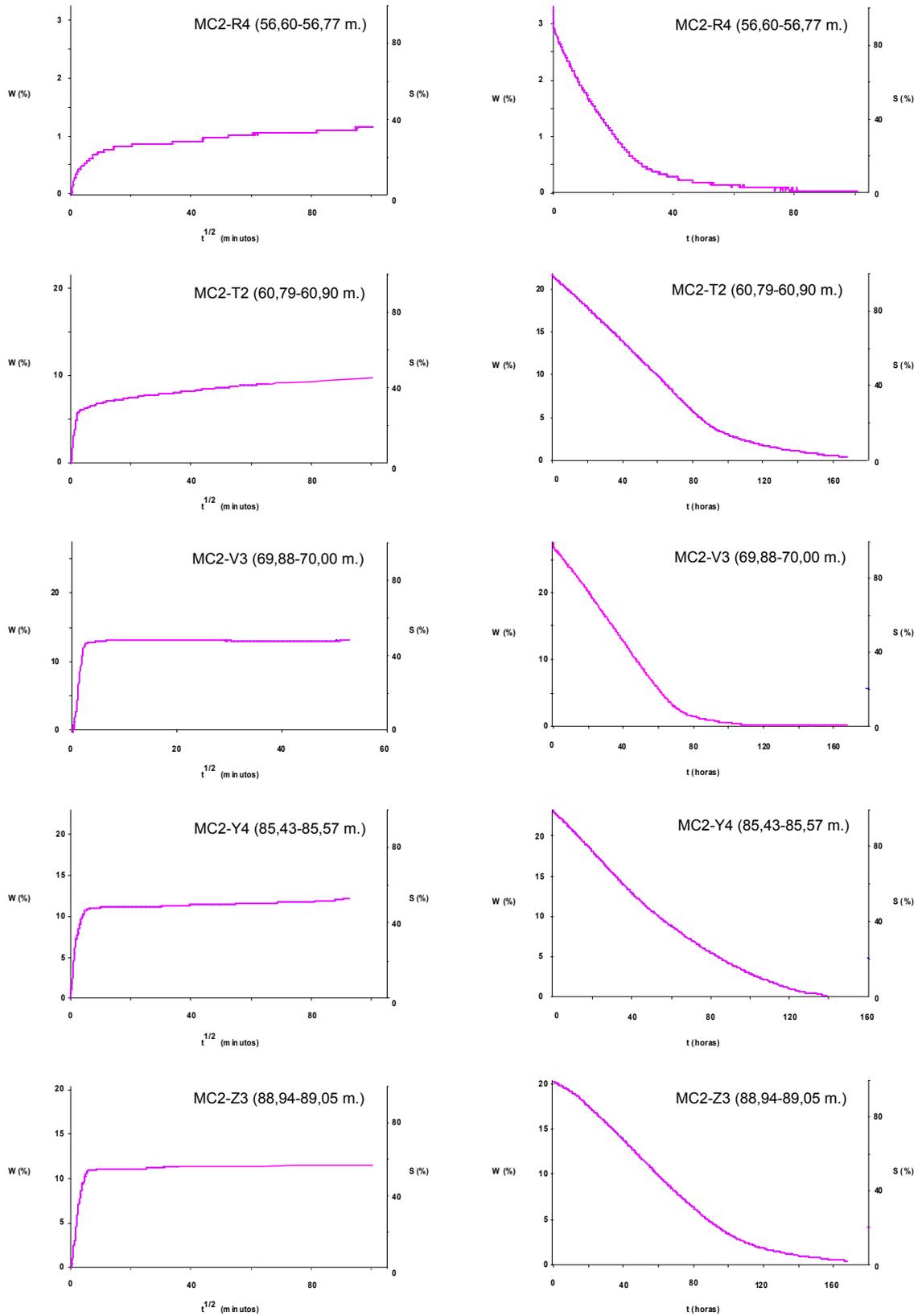


Figura 4.20.- Curvas de absorción libre de agua (izquierda) y evaporación (derecha) obtenidos para algunos de los testigos de sondeo ensayados. Salvo en el primer testigo de sondeo, la cinética de ambos procesos es muy similar, aunque el contenido en agua alcanzado tras el ensayo de absorción y el contenido en agua residente en la roca tras la evaporación, varía notablemente de unos testigos a otros.

En el subcapítulo 4.4 se verificarán todos estos datos mediante la utilización de otras técnicas de observación y cuantificación indirecta. Se analizará con sumo detalle, la configuración del sistema poroso de cada uno de los testigos ensayados, a fin de poder explicar los extremadamente elevados valores de porosidad no efectiva obtenidos mediante las técnicas anteriormente descritas.

Los ensayos de absorción capilar llevados a cabo, ponen de manifiesto coeficientes de capilaridad muy dispares incluso para testigos de sondeo con valores de porosidad abierta similares, lo que evidencia configuraciones de sistemas porosos diferentes, en lo que a distribución de radios de accesos de poro fundamentalmente se refiere. Los resultados obtenidos aparecen recogidos gráficamente en la figura 4.21 y en la tabla 4.9.

Para todo el sondeo estudiado, los valores medios de capilaridad se sitúan alrededor de $7,2 \pm 6,4 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$, aunque su distribución es muy heterogénea en función no sólo de las litofacies establecidas, sino del testigo de sondeo medido dentro de una misma litofacies.

Los valores más bajos ($0,2 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$) corresponden al tramo más superficial del lagoon interno, no habiendo sido analizado el tramo inferior por desmoronamiento de la muestra al ser sumergida en agua o entrar en contacto prolongado con ésta.

Los valores de capilaridad inmediatamente superiores ($1-2,5 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$) corresponden con el parche arrecifal y la barrera coralina, así como, con algunos de los testigos de sondeo correspondientes al lagoon externo tanto en el tramo superior (MC2-G2) como en el tramo inferior del mismo (MC2-N2), ambos inmediatamente próximos al parche arrecifal, y el tramo inferior del talud proximal (MC2-Y4). Corresponden con valores relativamente bajos para los elevados valores de porosidad localizados en algunos de estos testigos.

Valores intermedios han sido obtenidos dentro del lagoon externo, tanto en su tramo superior (MC2-D3) como en su tramo inferior (MC2-O3; MC2-P3), con valores que se sitúan entre $3,9-9 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$, mientras que moderadamente elevados coeficientes de capilaridad han sido obtenidos en algunos de los testigos correspondientes al tramo superior del lagoon externo (MC2-E3 y MC2-F2), testigos más someros dentro del

talud proximal (MC2-T2; MC2-V3) y talud distal, todos ellos situados entre $13-35 \text{ Kg/m}^2 * h^{1/2}$.

Los resultados aquí obtenidos, junto con los datos de los ensayos de porosimetría de inyección de mercurio (subcapítulo 4.4), permitirán definir de manera precisa los conductos que unen los poros (radios de acceso, distribución, etc.), aspecto este de vital importancia a la hora de establecer la funcionalidad hidráulica de las diferentes litofacies, aspecto generalmente obviado en muchos de los estudios de campo.

Tabla 4.9.- Coeficientes de capilaridad (C) obtenidos para los testigos de sondeo estudiados.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Capilaridad
			Coef. Absorción capilar
			$C (\text{Kg/m}^2 * h^{1/2})$
MC2-A3	1,98-2,18	Lagoon interno	0,230
MC2-B3	5,89-5,96		---
MC2-D3	14,54-14,66	Lagoon externo	3,95
MC2-E3	17,35-17,46		35,24
MC2-F2	19,24-19,43		21,78
MC2-G2	21,37-21,48		1,02
MC2-K3	33,35-33,47	Parche arrecifal	2,45
MC2-L3	34,32-34,49		1,39
MC2-N2	42,12-42,31	Lagoon externo	1,56
MC2-O3	48,16-48,29		9,06
MC2-P2	50,49-50,68		6,48
MC2-R4	56,60-56,77	Barrera	1,38
MC2-T2	60,79-60,90	Talud proximal	14,33
MC2-V3	69,88-70,00		20,12
MC2-p3	81,05-81,12		---
MC2-Y4	85,43-85,57		1,13
MC2-Z3	88,94-89,05	Talud distal	13,55

Paralelamente, los ensayos de permeabilidad al vapor llevados a cabo ponen de manifiesto valores muy dispares en los coeficientes obtenidos, incluso para testigos de sondeo con valores de porosidad abierta muy próximos. Como en el caso anterior, se confirma la presencia de sistemas porosos muy diferentes, en lo que a distribución de poros y conductos se refiere. Los resultados obtenidos aparecen recogidos gráficamente en la figura 4.21 y en la tabla 4.10.

Para todo el sondeo estudiado, los coeficientes medios de permeabilidad al vapor se sitúan alrededor de $191 \pm 98 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$, mostrando nuevamente una distribución muy heterogénea en función no sólo de las litofacies establecidas, sino de los diferentes testigo de sondeo muestreados y medidos dentro de cada una de las litofacies.

Los valores más bajos corresponden nuevamente al tramo más superficial del lagoon interno, barrera coralina y uno de los testigos del parche arrecifal (MC2-K4), alcanzando valores medios para un mismo testigo que en todos los casos se sitúan por debajo de $75 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$.

Tabla 4.10.- Coeficientes de permeabilidad (K_v') obtenidos para los testigos de sondeo estudiados.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Permeabilidad
			Coef. permeabilidad
			$K_v' \text{ (g/m}^2 \cdot 24\text{h)}$
MC2-A4; MC2-A5	2,18-2,19; 2,19-2,20	Lagoon interno	48,6; 99,6 (74 ± 36)
MC2-B	5,88-5,99		---
MC2-D4	14,66-14,67	Lagoon externo	225,0
MC2-E2; MC2-E4	17,34-17,35; 17,46-17,47		347,8; 344,0 (345 ± 24)
MC2-F4; MC2-F5	19,46-19,47; 19,47-19,48		309,9; 313,5 (312 ± 3)
MC2-G3; MC2-G4	21,48-21,49; 21,49-21,50		120,3; 89,5 (105 ± 22)
MC2-K4	33,47-33,48		75,1
MC2-L4	34,49-34,50	Parche arrecifal	170,0
MC2-N4; MC2-N5	42,31-42,32; 42,32-42,33	Lagoon externo	142,5; 147,8 (145 ± 4)
MC2-O2; MC2-O5	48,15-48,16; 48,29-48,30		154,0; 102,2 (128 ± 36)
MC2-P3; MC2-P4	50,68-50,69; 50,69-50,70		238,3; 250,2 (244 ± 8)
MC2-R3; MC2-R5	56,59-56,60; 56,77-56,78	Barrera	70,5; 61,8 (66 ± 6)
MC2-T3; MC2-T4	60,90-60,91; 60,91-60,92	Talud proximal	270,4; 238,1 (254 ± 23)
MC2-V4; MC2-V5	70,00-70,01; 70,01-70,02		223,9; 358,3 (291 ± 95)
MC2-p	81,00-81,19		---
MC2-Y3; MC2-Y5	85,42-85,43; 85,57-85,58		338,5; 321,0 (329 ± 12)
MC2-Z2; MC2-Z4	88,93-88,94; 89,05-89,06	Talud distal	315,5; 274,7 (295 ± 29)

A continuación, tal y como se puede observar en la tabla 4.10, aparecen escasos testigos de sondeo donde los coeficientes de permeabilidad medios alcanzados dentro un mismo testigo se sitúan entre $100\text{-}200 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$, correspondiendo éstos con la parte basal del tramo superior del lagoon externo y la parte superior del tramo inferior del lagoon externo.

El resto de los testigos de sondeo analizados, muestran importantes coeficientes de permeabilidad al vapor, situados en todos los casos por encima de $200 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$, superando en algunos casos los $300 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$. Corresponden con algunos de los

Como en el caso anterior, los valores aquí obtenidos, en combinación con los datos obtenidos en los ensayos de porosimetría de inyección de mercurio y el análisis cuantitativo (subcapítulo 4.4), permitirán definir de manera precisa los conductos que unen los poros (radios de acceso, distribución, etc.), aspecto este de vital importancia a la hora de establecer la funcionalidad hidráulica de las diferentes litofacies, aspecto generalmente obviado en muchos de los estudios de campo.

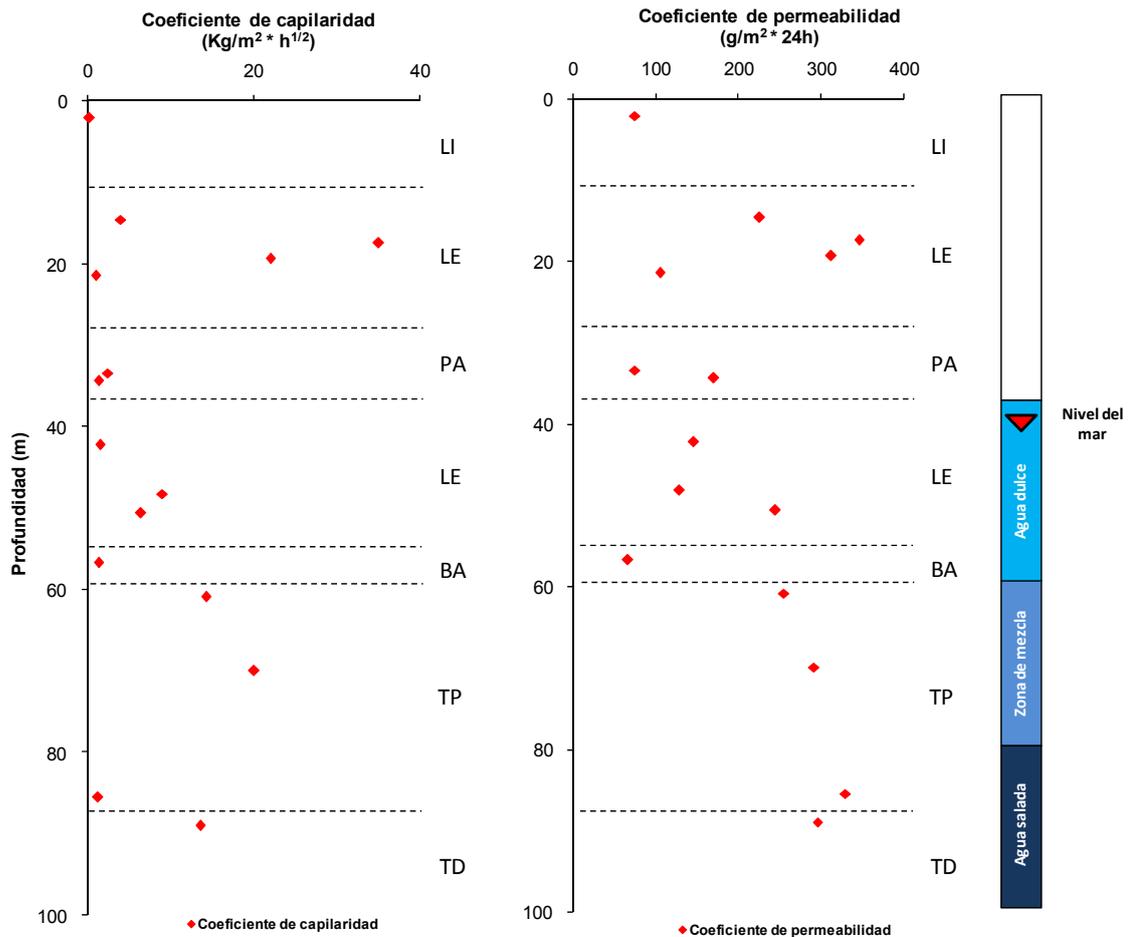


Figura 4.21.- Perfiles donde se recogen los valores obtenidos en los ensayos de capilaridad (izquierda) y permeabilidad al vapor de agua (derecha) llevados a cabo sobre cada uno de los testigos de sondeo estudiados. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

El análisis de los datos de permeabilidad al agua (K) proporcionados por ISTEEM y ETH respectivamente (Tablas 4.11 y 4.12), obtenidos a partir de pequeñas muestras cilíndricas extraídas de testigos del sondeo MC2 (ISTEEM) y MC3 y MC5 (ETH) pone de manifiesto en ambos casos, un rango de valores extraordinariamente grande a lo

largo de los sondeos, dentro de una misma litofacies, e incluso en niveles situados a escasos centímetros dentro de una litofacies. Esto confirma la gran heterogeneidad que de manera general presentan las litofacies estudiadas.

Tabla 4.11.- Valores de permeabilidad (K) obtenidos en el laboratorio sobre pequeñas muestras cilíndricas (plugs) procedentes del sondeo MC2. Datos proporcionados por el ISTEEM.

Profundidad (m)	Facies	Permeabilidad		Profundidad (m)	Facies	Permeabilidad	
		Coef. permeabilidad	K (mD)			Coef. permeabilidad	K (mD)
1,00	Lagoon interno		0,28	48,55	Lagoon externo		10,50
1,30			0,78	48,57			8,58
2,20			18,26	48,60			7,94
2,21			0,87	49,00			1,12
3,80			1,01	49,79			10,01
3,95			3134,24	49,80			20349,32
4,50			8,68	52,02			304,93
5,20			345,26	52,30			0,20
5,30			4,87	52,75			66,97
6,05			7,90	52,80			90,17
6,10			0,89	53,80			1309,45
8,00			0,33	54,40			7,31
9,90		2,19	55,20		36,79		
11,30	Lagoon externo		51,31	55,30		11,85	
11,35			369,01	56,20		0,25	
12,13			30,69	57,2	Barrera	0,24	
12,15			267,13	57,3			1156,91
12,25			82,07	58			136,83
12,27			28,55	59,35			0,53
15,30			649,29	59,4			1,13
16,40			61,69	59,5			8,38
17,68			222,5	59,6		9,08	
17,70			0,14	59,7		17,94	
18,60			9,48	60,50	Talud proximal	0,75	
18,80			16,29	60,60			8,65
21,10		36,29	60,90			5,04	
21,60		21,14	61,00			8,39	
24,86		0,06	64,40			30,87	
24,88		0,82	68,10			150,18	
24,90		2,89	69,70			47,63	
24,95		0,13	70,50			11,12	
25,00		50,36	70,60			6,85	
26,80		0,30	71,53			188,20	
27,00		82,33	71,55			15,25	
28,50	Parche arrecifal		1042,34	71,65			31,02
28,60			355,54	71,67		495,34	
30,90			112,26	75,20		141,66	
31,05			1613,33	75,30		0,67	
32,40			2,51	77,40		0,32	
32,50			4109,36	81,30		2043,93	
33,80			2,54	83,15		23,67	
34,60			11235,13	85,20		0,22	
34,70			0,86	88,10		26410,41	
34,80			25,14	89,9	Talud distal	102,74	
35,90			152,11	90,78			9,47
36,00			0,22	90,8			34,85
36,90		0,88	90,9			18,33	
37,05	Lagoon externo		0,74	90,92			23,11
39,70			2503,96	93,4			24,8
41,60			8,21	95,7			30,81
41,70			553,39	97,6			104,59
43,48			83,85	98,33			34,27
43,50			1401,62	98,35			31,89
46,30			0,55	98,45			58,39
46,31			133,65	98,47			8,21
46,40			11,17	100,91		39,79	
48,50			39,64				

Profundidad (m)	Facies	Permeabilidad
		Coef. permeabilidad
		K (mD)
2,60	Lagoon interno	26,41
15,13	Lagoon externo	224,35
17,15		1369,27
22,56		282,51
31,18		252,6
34,23		10,73
41,29		7741,98
41,77		1518,08
55,29	Barrera	0,39
57,69		60,41
60,44		577,18
63,58		10,32
59,62	Talud proximal	0,50
60,94		192,26
65,42		562,69
69,85		1163,06
74,92		0,15
78,85		161,34
80,31		17,42
84,66		1416,59
85,65		704,23
87,75	Talud distal	19,04
91,53		14,63
98,66		107,93
99,68		190,97

Tabla 4.12.- Valores de permeabilidad (K) obtenidos en el laboratorio sobre pequeñas muestras cilíndricas (plugs) procedentes de los sondeos MC3 y MC5. Datos proporcionados por el ETH.

En el caso del sondeo MC2, en el cual se centra este trabajo, para un total de 112 muestras analizadas, los valores mínimos y máximos de permeabilidad se sitúan en 0,06 y 26.410 mD respectivamente. La media alcanza valores de 724 ± 3293 mD, situándose la mediana en 22,12 mD. Dada la elevada repercusión que tiene en la media los elevados valores de permeabilidad que puntualmente aparecen dentro de la serie, la mediana parece un valor mucho más real a la hora de tener un valor aproximado de la permeabilidad inherente a una determinada litofacies.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los aspectos descritos dentro del presente subcapítulo, y para cada una de las litofacies establecidas dentro del área de estudio de Ses Sitjoles desarrolladas a lo largo del trabajo, se puede sintetizar que:

- ✚ Lagoon interno (LI): El análisis del tramo superior (lagoon oolítico MC2-A3) ha puesto de manifiesto notables diferencias respecto al tramo inferior (lagoon fangoso - MC2-B3), en lo que se refiere tanto a los valores obtenidos como a la cinética de los procesos hidráulicos.

El tramo superior, correspondiente con la caliza oolítica, se caracteriza por la presencia de una porosidad total de $15,8 \pm 0,8 \%$, de la cual, algo menos de la mitad ($6,94 \%$), ha sido identificada con una porosidad cerrada en relación con los poros intragranulares presentes en los núcleos de los oolitos. Por su parte, dentro de la porosidad abierta determinada ($8,85 \pm 1,17 \%$), casi la mitad corresponde con una porosidad efectiva ($4,60 \%$), asociándose el $4,26 \%$ restante como una porosidad no efectiva o atrapada, a través de la cual la circulación de los fluidos es lenta y dificultosa. En concordancia con estos valores de porosidad, el coeficiente de absorción libre de agua obtenido es relativamente bajo ($2,02 \%$), lo que representa algo más de la mitad de la cantidad total de agua que es capaz de absorber la roca ($W_s = 3,89 \pm 0,55 \%$). La cinética de dicho proceso, al igual que la puesta de manifiesto por la evaporación, muestra pendientes constantes, sin marcados puntos de inflexión, lo que podría asociarse a sistemas porosos complejos y mal comunicados donde el agua circula lentamente en el seno de la roca matriz. En este sentido, tras una semana de evaporación la roca todavía muestra una saturación próxima al 20% ($W = 0,80 \%$), lo que reforzaría esta afirmación. Los procesos de absorción capilar y permeabilidad al vapor de agua, con coeficientes extremadamente bajos en el primero de los casos ($0,23 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) y bajos en el segundo ($74 \pm 36 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$), evidencian la presencia de espacios porosos mal comunicados.

Por su parte, la caliza fosilífera localizada en el tramo inferior del lagoon interno (MC2-B), muestra una respuesta frente al agua ligeramente diferente, comenzando por la disgregación del testigo al ser sumergido en agua, razón por la cual, tan sólo algunos de los ensayos hidráulicos han podido ser llevados a cabo sobre este testigo. La porosidad abierta estimada se sitúa alrededor del $21,8 \%$, siendo algo mayor la porosidad total de la roca ($24,3 \%$). La porosidad efectiva, ligeramente superior a la mitad de la porosidad abierta, alcanza valores próximos al $11,6 \%$. El coeficiente de absorción libre con un valor del $6,5 \%$, representa un 53% de la saturación de la roca ($W_s = 12,20 \%$).

Para el conjunto del lagoon interno los valores de permeabilidad al agua (K) medidos alcanzan valores que oscilan entre 3.134 y $0,28$ mD. La media se sitúa en valores de 271 mD con valores de desviación típica que superan los

muy superiores al valor de la media (± 865 mD), por lo que la mediana, que toma valores de 3,53 mD, parece más indicativa de la permeabilidad asociada a esta litofacies.

✚ Lagoon externo (LE): Coincidiendo con la respuesta ultrasónica de estos materiales, en términos generales se puede decir que el tramo superior del lagoon externo (MC2-D3, MC2-E3, MC2-F2 y MC2-G2), muestra mayor porosidad que el tramo inferior del mismo (MC2-N2, MC2-O3 y MC2-P2), situado por debajo del parche arrecifal.

Este tramo superior, presenta valores de porosidad total que oscilan entre el 32-43 %, con valores medios de $39,22 \pm 5$ %, correspondiendo los menores valores detectados a las intercalaciones de calizas rudstone (MC2-G2) detectadas dentro de este nivel. Para las otras tres muestras analizadas (MC2-D3, MC2-E3, MC2-F2), correspondientes con calizas grainstone, los valores obtenidos son relativamente uniformes.

La porosidad abierta media obtenida para este tramo se sitúa en $37,9 \pm 7$ %, con valores máximos que llegan a alcanzar un 45 %, mientras que los mínimos, relacionados nuevamente con las intercalaciones de calizas rudstone, no superan el 30 %. Se puede hablar por lo tanto de una porosidad cerrada relativamente baja en la mayor parte del tramo (2-3 % en términos relativos), a excepción una vez más de la muestra MC2-G (rudstone) donde este valor se dispara hasta alcanzar el 12-13 %. Las porosidades efectivas y atrapadas medidas en este tramo (tabla 4.7), ponen de manifiesto valores muy dispares, cuyas medias se sitúan en $18,51 \pm 4,40$ y $19,40 \pm 6,78$ respectivamente. En términos relativos, la porosidad no efectiva de este tramo varía entre el 40 % y el 63 % de la porosidad abierta medida.

En consonancia con los elevados valores de porosidad abierta estimada para el tramo superior del lagoon externo, la absorción forzada de agua es extraordinariamente elevada, con valores medios de $24,05 \pm 6$ %, alcanzando en algunas de las muestras ensayadas (MC2-E3) valores superiores al 30 %. Una vez más los menores valores corresponden con las calizas rudstone, que escasamente alcanzan el 16 % de contenido en agua en saturación. Esta

elevada capacidad de almacenamiento medida en este nivel, choca frontalmente con los coeficientes de absorción libre de agua obtenidos, que con valores medios de $11,40 \pm 3,42 \%$, reflejan grados de saturación que rondan el $49,56 \pm 12 \%$.

La cinética de los procesos de absorción libre de agua de estas muestras, pone de manifiesto que tras la entrada de un importante volumen de agua durante la primera hora de ensayo, se produce un pequeño pero constante aporte de agua al interior de la roca, proceso que continuaría de no interrumpirse el ensayo a los siete días. Este fenómeno, junto a la cinética de los procesos de evaporación observados, hace pensar en sistemas de alta porosidad, donde un volumen importante del mismo se encuentra mal comunicado, circulando el agua muy lentamente a su través.

Los coeficientes medios de absorción capilar y permeabilidad al vapor de agua medidos en este tramo, alcanzan valores de $15,51 \pm 15,96 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ y $246,75 \pm 107,20 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ respectivamente. Estos elevados valores medios obtenidos, contrastan con los bajos coeficientes de capilaridad de dos de las muestras ensayadas (MC2-D y MC2-G), y en menor medida con los bajos coeficientes de permeabilidad al vapor de las mismas, lo que claramente evidencian sistemas porosos con volúmenes parecidos, pero configuraciones muy diferentes.

Por su parte, el tramo inferior del lagoon externo, muestra menores valores medios de porosidad abierta que el tramo anterior ($24,23 \pm 9,55 \%$). Con valores próximos al 35 %, se puede separar claramente la parte basal de dicho tramo (MC2-P2) del resto (MC2-N2; MC2-O3), cuyos valores no superan el 20 %. La porosidad cerrada estimada es poco importante tanto en términos relativos (3-5 %) como absolutos (1-1,5 %).

La bajísima porosidad efectiva dominante en este tramo (27-40 % en términos relativos), muestra su excepción en un pequeño nivel dolomitizado (MC2-O3), asociado al cual aparece una importante porosidad secundaria (mm-cm), lo que se traduce en una porosidad efectiva superior al 90 % en términos relativos.

Esto sitúa la porosidad efectiva media de este nivel en $11,76 \pm 6,8 \%$, lo que representa algo menos de 50 % de la porosidad abierta.

Los contenidos en agua en saturación son acordes con los datos de porosidad abierta anteriormente citados. Los valores medios se sitúan en $13,05 \pm 7,46 \%$, si bien, nuevamente, es el tramo basal (MC2-P2) el que muestra los mayores porcentajes (21,66 %), frente a las otras dos muestras estudiadas dentro de este nivel, en ambos casos por debajo del 9%.

Es sin embargo el coeficiente de imbibición (absorción libre de agua), el que pone de manifiesto resultados más dispares, que evidencian sistemas porosos muy diferentes. Los valores medios se sitúan en $6,70 \pm 4,03 \%$, mostrando de techo a muro las muestras analizadas valores de 2,30, 7,60 y 10,20 % respectivamente. Tal y como cabría esperar, el grado de saturación de la muestra dolomitizada (MC2-03) es la más elevada (87 %) en relación con las otras dos muestras estudiadas (MC2-N2; MC2-P2), que alcanzan saturaciones del 26 y 40 % respectivamente. Como en el tramo superior, el grado de saturación media para todo el tramo se sitúa próximo al 50 %. La cinética de estos procesos muestra un comportamiento similar a todas las rocas anteriormente descritas.

Los coeficientes medios de absorción capilar alcanzan valores de $5,69 \pm 3,79 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$ con valores que oscilan entre $1,56 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$ para la muestra MC2-N2 y $9 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$ para la caliza dolomitizada (MC2-O3), situándose la muestra MC2-P2 un valor intermedio entre ambos ($6,5 \text{ Kg/m}^2 * \text{h}^{1/2}$). Por su parte, la permeabilidad al vapor de agua alcanza coeficientes medios de $172,33 \pm 62,64 \text{ g/m}^2 * 24 \text{ h}$ respectivamente, correspondiendo una vez más los mayores valores a la parte basal de dicho tramo (MC2-P2).

Para el conjunto del lagoon externo la permeabilidad medida oscila entre 0,06 y 20.349 mD. La media para todo el conjunto se sitúa en valores de $629 \pm 3007 \text{ mD}$, situándose la mediana en 29,62 mD, nuevamente más indicativa está última de la permeabilidad de esta litofacies. El tramo superior del lagoon externo (por encima del parche arrecifal) presenta en conjunto menor

permeabilidad (media: 34 ± 61 mD; mediana: 12,89 mD) que el tramo inferior del mismo (media: 1707 ± 5612 mD; mediana: 24,32 mD).

✚ Parche arrecifal (PR): en concordancia con las velocidades de propagación descritas en el capítulo 4.1.2, junto a la barrera coralina propiamente dicha y el tramo superior del lagoon interno, es la litofacies que presenta menores valores de porosidad, mostrando los dos testigos analizados en esta litofacies (MC2-K3 Y MC2-L3), un comportamiento muy similar frente al agua.

La porosidad total determinada para estas calizas bioconstruidas (framestones) alcanza valores de $18,85 \pm 4,77$ %, siendo aproximadamente un 25 % mayor en la primera de ellas. Asociada a esta porosidad total, ha sido identificada una porosidad cerrada (2,07 %), que representa aproximadamente un 10 % de la porosidad total, estando ésta principalmente relacionada con poros intragranulares asociados mayoritariamente a las cámaras de los organismos.

Dentro de la porosidad abierta determinada ($16,78 \pm 3,68$ %), tan sólo una tercera parte aparece asociada a una porosidad efectiva, estando relacionados los 2/3 restantes a una porosidad mal comunicada; porosidad atrapada o no efectiva, a través de la cual la circulación de los fluidos es lenta y dificultosa.

El coeficiente de absorción libre de agua obtenido para esta litofacies es muy bajo ($2,25 \pm 0,21$ %) para el valor de porosidad abierta obtenida, lo que representa poco más de un 30 % de la cantidad total de agua que es capaz de absorber la roca ($W_s = 8,32 \pm 1,68$ %). La cinética de dicho proceso, al igual que la puesta de manifiesto por la evaporación, muestra pendientes constantes, sin marcados puntos de inflexión, lo que podría asociarse a sistemas porosos complejos y mal comunicados donde el agua, a excepción de un tramo inicial, circula lentamente en el seno de la roca matriz.

Los procesos de absorción capilar y permeabilidad al vapor de agua, con coeficientes relativamente bajos en el primero de los casos ($1,95 \pm 0,78$ Kg/m² * h^{1/2}) y moderados en el segundo ($122,6 \pm 66,1$ g/m² * 24 h), evidencian la presencia de espacios porosos mal comunicados.

En lo relativo a la permeabilidad, el parche arrecifal muestra valores que oscilan entre 11.235 y 0,22 mD. La media se sitúa en valores de 1.434 ± 3.164 mD, situándose la mediana, más representativo una vez más, en 132,19 mD. Destacan los bajísimos valores de permeabilidad (0,22 y 0,88 mD) medidos en la base del parche arrecifal (-36,00 a -37,00 m).

 Barrera coralina (BC): las calizas framestone presentes en esta litofacies (MC2-R4) muestran un comportamiento petrofísico y, particularmente una respuesta frente al agua, muy similar a las calizas framestone que de manera mayoritaria constituyen el parche arrecifal anteriormente descrito.

El valor de porosidad total alcanzado por esta litofacies se sitúa alrededor del 12 %, estando representada algo menos del 30 % de la misma por una porosidad cerrada, que no entra en juego en la circulación del agua dentro de la roca.

Dentro de la porosidad abierta obtenida para esta litofacies, y tal y como ocurría en el parche arrecifal, el 70 % de la misma está relacionada con una porosidad no efectiva o atrapada, donde la circulación de agua es restringida.

Ante esta casuística, con una baja porosidad efectiva, el coeficiente de absorción libre obtenido se sitúa próximo al 1,20 %, lo que representa tan sólo un 30 % de la saturación máxima que puede alcanzar la roca ($W_s = 3,90$ %), coincidiendo una vez más con los valores obtenidos en las calizas framestone anteriormente descritas. La cinética de los procesos de absorción libre de agua de éstas muestras, que evidencian sistemas porosos mal comunicados, justifican claramente las bajas porosidad efectivas obtenidas, es decir, las bajas saturaciones alcanzadas por la caliza tras una semana sometidas al ensayo de absorción libre de agua.

Los coeficientes medios de absorción capilar y permeabilidad al vapor de agua medidos en esta litofacies son extremadamente bajos en ambos casos, alcanzan valores de $1,40 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ y $66 \pm 6 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ respectivamente. Estos elevados valores medios obtenidos, contrastarían la complejidad del sistema poroso de esta caliza.

La permeabilidad al agua determinada en este nivel alcanza valores medios de 166 ± 402 mD, con valores que oscilan entre 1.156 y 0,24 mD. La mediana, nuevamente más indicativa de la permeabilidad del conjunto, se sitúa en 8,73 mD, coincidiendo con los valores estimados en la base de esta litofacies (-59,00 m).

Talud proximal (TP): aunque esta litofacies aparece representada por calizas, dolomías y dolomías calcáreas con texturas grainstone (MC2-V3 y MC2-Y4), wackstone (MC2-T2) y rudstone (MC2-ρ), la mayor parte de las propiedades hidráulicas determinadas muestran valores y cinéticas muy similares, siendo quizás, junto con el talud distal, la litofacies más homogénea desde un punto de vista hidráulico.

La porosidad total de esta litofacies alcanza valores medios de $40,8 \pm 2,2$ %, correspondiendo el $39,4 \pm 1,5$ % con una porosidad abierta. La porosidad cerrada media representaría algo menos del 3,5 % de su porosidad total. Por su parte, dentro de la porosidad abierta determinada, algo menos de la mitad corresponde con una porosidad efectiva (48 %), asociándose el 52 % restante como una porosidad no efectiva o atrapada, a través de la cual la circulación de los fluidos es lenta y dificultosa.

En consonancia con la relación porosidad efectiva/atrapada, el coeficiente de absorción libre de agua obtenido para esta litofacies ($11,7 \pm 1,7$ %), alcanza grados de saturación ligeramente inferiores al 50 % respecto a la absorción forzada obtenida ($24,4 \pm 2,3$ %). La cinética de dicho proceso, al igual que la puesta de manifiesto por la evaporación, es una vez más, similar a las curvas anteriormente descritas, donde tras una importante entrada de agua durante la primera hora, se produce un pequeño pero constante aporte de agua al interior de la roca, proceso que continuaría de no interrumpirse el ensayo a los siete días. Una vez más, se refleja así la presencia de elevadas capacidades de almacenamiento (alta porosidad abierta), donde un volumen importante del mismo se encuentra mal comunicado (porosidad atrapada), circulando el agua muy lentamente a su través.

La marcada homogeneidad que las muestras estudiadas dentro de esta litofacies han mostrado en las propiedades hidráulicas hasta ahora descritas, se rompe claramente en el ensayo de absorción capilar. Mientras el tramo superior de la litofacies (MC2-T2; MC2-V3) muestra coeficientes de absorción capilar relativamente elevados ($14,3$ y $20,2 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ respectivamente), el tramo basal de dicha litofacies, representado por la muestra MC2-Y4, muestra valores extraordinariamente pequeños dado los valores elevados de porosidad abierta obtenidos ($1,3 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$), reflejando un sistema poroso muy diferente a las anteriores. Los valores de permeabilidad al vapor de agua, menos sensibles a la distribución de accesos de poros de la roca, refleja menores diferencias en los coeficientes obtenidos, ligeramente mayores en el tramo basal de esta litofacies, y con valores medios que se sitúan en $291 \pm 38 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$.

Al igual que en las litofacies anteriores, los valores de permeabilidad medidos son muy heterogéneos, oscilando entre $0,22$ y 26.410 mD , valor este último medido en la base del talud proximal. La media para todo el conjunto se sitúa en $1.481 \pm 5885 \text{ mD}$, situándose la mediana, como valor característico de este tramo en $19,46 \text{ mD}$.

- ✚ Talud distal (TD): destaca por la homogeneidad, que macroscópicamente hablando, muestran los testigos de sondeo, por lo que sólo se ha estudiado un testigo. Los resultados obtenidos son muy similares a los valores medios establecidos para el talud proximal anteriormente descrito, y más similares aún a los resultados evidenciados por las muestras MC2-T2 y MC2-V3, por lo que cabe esperar un comportamiento muy similar frente al agua.

Así, la porosidad total determinada para estas caliza packstone alcanza valores de $41,7 \pm 0,3 \%$. Dentro de esta porosidad total, ha sido posible establecer un valor de porosidad cerrada próxima al 5% , que representa aproximadamente un 12% de la porosidad total, estando ésta principalmente relacionada con poros intragranulares asociados mayoritariamente a las cámaras de los organismos.

Dentro de la porosidad abierta determinada ($36,5 \pm 0,7 \%$), algo más de la mitad (53%) ha sido identificada como porosidad efectiva, circulando el agua con facilidad a través de sus poros y conductos, estando relacionado el 47% restante con una porosidad mal comunicada; atrapada o no efectiva, a través de la cual la circulación de los fluidos es lenta y dificultosa.

El coeficiente de absorción libre de agua obtenido para esta litofacies, al igual que el grado de saturación, es muy similar a los puestos de manifiesto por la litofacies anterior (talud proximal), alcanzando valores del $11,9 \%$ y $52,9 \%$ respectivamente. Una vez más, la cantidad de agua que la roca es capaz de absorber libremente, es prácticamente la mitad de la máxima cantidad de agua que la roca es capaz de absorber cuando se utiliza una bomba de vacío ($W_s = 22,50 \%$). La cinética de los procesos de absorción y evaporación, muestra un comportamiento muy similar a la mayor parte de los testigos estudiados, reflejando una vez más, una parte importante de la porosidad en relación con poros mal comunicados donde el agua, a excepción de un tramo inicial, circula lentamente en el seno de la roca matriz.

Los procesos de absorción capilar y permeabilidad al vapor de agua, con coeficientes muy similares a la litofacies anterior, se sitúan en $13,6 \pm 1,2 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ y $295,0 \pm 29 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ respectivamente.

En lo referente a la permeabilidad al agua, el talud distal muestra un comportamiento mucho más homogéneo que el resto de las litofacies estudiadas, a la vez que, corresponde con el nivel más permeable en su conjunto. Los valores determinados oscilan entre $9,47$ y $104,59 \text{ mD}$, alcanzando la media ($40 \pm 31 \text{ mD}$) y la mediana ($31,89 \text{ mD}$) valores próximos.

4.3.- Estudio petrográfico

Conocidas las propiedades dinámicas e hidráulicas de las distintas litofacies presentes en la plataforma carbonatada de Lluçmajor y el campo de ensayos de Ses Sitjoles, mediante la determinación de la velocidad ultrasónica y diferentes test hidráulicos de algunos de los testigos seleccionados dentro del sondeo MC2, el siguiente paso ha

sido la cuantificación de los componentes petrográficos de estas rocas carbonatadas, atendiendo a su posible variabilidad textural y composicional y, prestando especial interés a los espacios vacíos detectables a esta escala de observación (cm- μ m).

4.3.1.- Introducción y metodología

La microscopía óptica de polarización (POL), en combinación con otras técnicas de observación microscópica (electrónica de barrido con electrones secundarios y/o retrodispersados -SEM; BSEM-) es ya un método clásico en los estudios petrográficos con aplicación petrofísica (Serra y Kolomenski, 1976; Montoto, L. *et al.*, 1978; Montoto, 1978a; Montoto *et al.*, 1978b, 1980, Montoto y Ben-Lan, 1981b; Montoto *et al.*, 1981c, d; Goodchild y Fueten, 1998; etc.). Esta metodología permite evaluar y cartografiar la textura de la roca, su mineralogía y grado de alteración de las fases minerales presentes, relaciones con la fractografía de la roca matriz, etc.

Sin embargo, el análisis de la configuración del sistema poroso de una roca, que representa el componente con mayor significancia desde un punto de vista petrofísico, y vital de cara a la interpretación de sus propiedades mecánicas e hidráulicas, exige una mayor especialización y combinación instrumental y microscópica. Es la combinación de toda una serie de técnicas microscópicas (óptica, electrónica de barrido, láser confocal), de cuantificación (estereología, análisis digital de imagen) y analíticas (porosimetría de inyección de mercurio, absorción de gases, picnometría), más allá de la mera observación bajo microscopía óptica de polarización y/o electrónica de barrido, la que ha permitido entender, en esta Tesis Doctoral, el funcionamiento hidráulico pormenorizado del sistema poroso de las rocas estudiadas.

Todos estos aspectos serán tratados detalladamente en el subcapítulo 4.4, limitándose el presente capítulo a describir textural, mineralógica y químicamente las litofacies establecidas dentro del acuífero de Campos, prestando especial atención a algunos aspectos relacionados con la porosidad, en lo que a los tipos descriptivos de poro se refiere (intergranular, intragranular, móldica, etc.); éstos son claramente distinguibles bajo las técnicas microscópicas utilizadas, sin perder de vista la información genética que de ellos se deduce.

En este sentido, y de forma similar a lo que ocurre para otros parámetros petrográficos, existen clasificaciones de la porosidad que atienden a aspectos meramente descriptivos y otras que pueden considerarse eminentemente genéticas. Dados los objetivos que aquí se persiguen, con una marcada connotación petrofísica, se ha utilizado la clasificación descriptiva propuesta por Choquette y Pray (1970).

El sistema de obtención de las láminas delgadas utilizadas para los estudios petrográficos ha sido ligeramente diferente al habitual, persiguiendo un doble objetivo; reducir al máximo el número de artefactos durante la preparación de las láminas delgadas y tacos (Allman y Lawrence, 1972; Hutchison, 1974; Humphries, 1992, etc.), y que las mismas láminas o tacos puedan ser observadas secuencialmente bajo diferentes técnicas microscópicas (Figura 4.22); es lo que se ha dado en conocer como “multi-imagen” (Montoto, L., 1982; Montoto, 1983; Ben-lan, A., 1984).

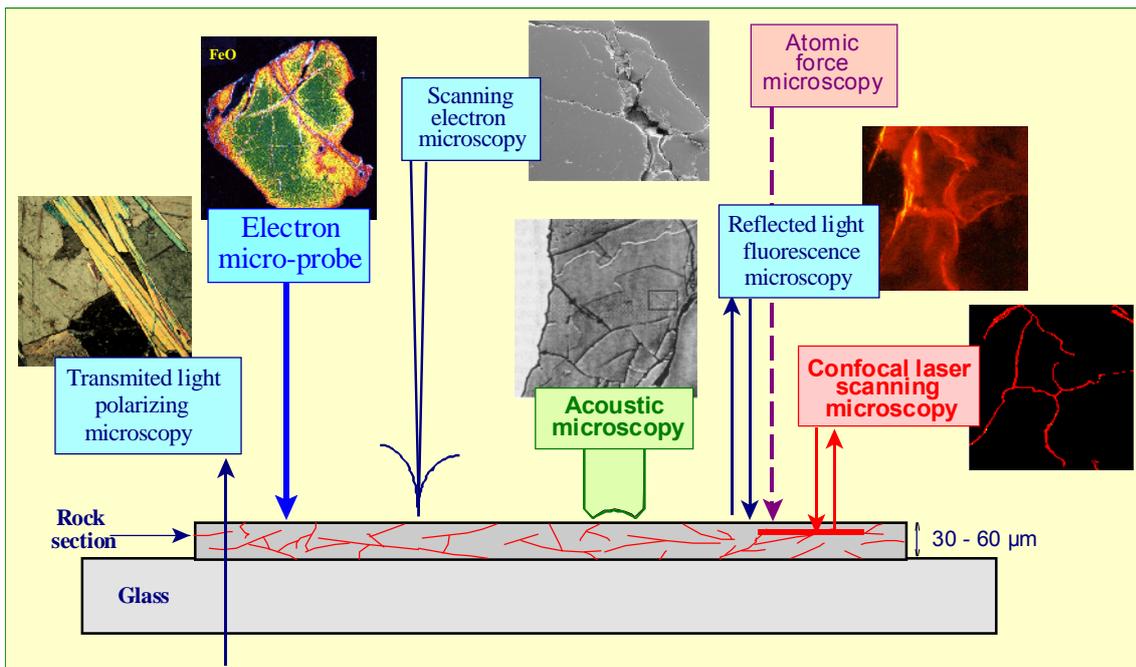


Figura 4.22.- Lámina delgada, pulida y metalizada de una roca impregnada con una fluoresceína, que permite obtener multi-imágenes, cuando se estudian bajo diferentes técnicas microscópicas (Montoto, 2003).

Así, utilizando un sistema de corte de baja deformación (Figura 4.23), consistente en un disco continuo de borde diamantado con un espesor de 0,1 a 0,3 mm, sometido a baja velocidad de rotación se consiguen muestras más o menos rectangulares (5 x 3 x 2 cm) exentas de artefactos morfológicos. También mediante perforación con broca

diamantada, se obtienen especímenes cilíndricos (2,6 Ø x 3,5 h cm) de zonas seleccionadas del testigo de sondeo.

Posteriormente se dejan secar las muestras durante 24 horas en una estufa a 60 °C y, finalmente se impregnan bajo vacío más presión, mediante un procedimiento similar al desarrollado por el Grupo de Petrofísica de la Universidad de Oviedo, y ampliamente descrito por Suárez del Río (1982) ó Menéndez (1992), pero que se ha modificado ligeramente a fin de aumentar el grado de penetración de la resina.

Este procedimiento se puede sintetizar de la siguiente manera (Figura 4.23): se introducen las muestras (2-3) en una cámara de impregnación de acero inoxidable, constituido por un cilindro y un émbolo con tóricas de goma que permiten cerrar herméticamente el sistema de impregnación. Se procede a la evacuación del aire presente en el interior de la cámara y en el seno de los espacios vacíos de la muestras; al cabo de aproximadamente 24 horas, y comprobado mediante la utilización de un vacuómetro que la presión de vacío ha alcanzado los 1×10^{-4} bares, se introduce empujada por la succión de vacío existente en el interior de la cámara, una resina epoxídica (100 ml resina epoxi + 25 ml estireno + 1 cm³ de catalizador) a la que se le ha añadido 0,15 g de colorante fluorescente (rodamina B).

Tras eliminar mediante vacío (5 minutos) el posible aire introducido en el interior del pistón por el burbujeo de la resina, y mediante la utilización de una prensa de compresión uniaxial, se ejerce sobre el pistón una presión de 100 Kg/cm², manteniéndola durante aproximadamente 15 minutos, facilitando así la penetración de la resina en todos los espacios vacíos presentes en las muestras. En ningún caso la presión de confinamiento triaxial que se genera en el interior de la cámara provoca daño alguno sobre la muestras, siendo esta presión ejercida muy inferior a técnicas como la porosimetría de inyección de mercurio donde se superan valores de 2000 Kg/cm². A continuación se rompe el vacío, extrayendo las muestras del interior del pistón, que son colocadas en pequeños recipientes, cubriéndose las muestras con la resina sobrante en el interior del pistón. Se dejan secar en estufa a 60 °C durante 48 horas.

Una vez seca la resina, la superficie de la muestra (obtenida mediante sierra de baja deformación) se desbasta y se pega en un portaobjetos, procediendo a la obtención

estándar de una lámina delgada: doble corte con sierra de baja deformación, nuevo desbaste de la muestra hasta alcanzar el espesor deseado, y pulido de la superficie de observación. En relación al espesor de las láminas, se han utilizado preparaciones de 30 μm para su observación al microscopio óptico de polarización (POL), y 100-150 μm para su observación conjunta al POL y bajo microscopía electrónica de barrido (SEM) o microscopía láser confocal (CLSM).

Cuando las muestras tan sólo han sido observadas bajo SEM y/o CLSM, en la mayor parte de los casos se han utilizado probetas cilíndricas de 2,6 Ø x 1h cm, procedentes del corte con sierra de baja deformación, desbaste y pulido de las muestras cilíndricas (2,6 Ø x 3,5h cm.) previamente impregnadas.

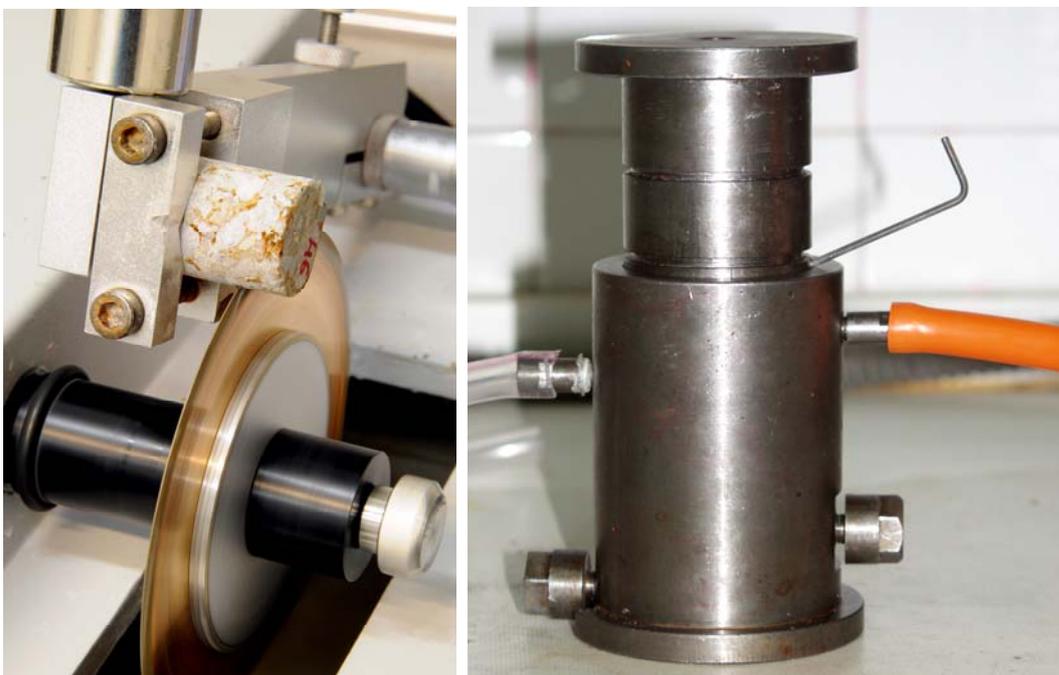


Figura 4.23.- Izquierda; sierra de baja deformación utilizada en la preparación de muestras libres de artefactos morfológicos, para su posterior observación bajo diferentes técnicas microscópicas. Derecha; cámara de acero inoxidable utilizado en la impregnación de muestras de roca bajo vacío y presión.

La localización exacta de cada una de las láminas delgadas, tacos, muestras para análisis químicos (FRX) y mineralógicos (DRX) obtenidas aparecen recogidas en el archivo de datos multimedia que acompaña a esta Tesis, dentro del capítulo titulado "Specimen preparation". A modo de ejemplo véase la figura 4.12.

4.3.2.- Petrografía de las rocas carbonatadas

Las diferencias texturales observadas en las rocas carbonatadas atravesadas por el sondeo MC2 se han clasificado siguiendo la ampliamente utilizada clasificación de rocas carbonatadas de Dunham, 1962 y la modificación de ésta para calizas arrecifales (Embry y Klovan, 1971; James, 1984), que de manera sintética aparece recogida en el gráfico de la figura 4.24.

Tal y como se puede observar en la columna sintética de la figura 4.25, a lo largo de los 100 metros de sondeo, entre un 65-75 % de las rocas estudiadas corresponden con calizas con textura grainstone, que en menor o mayor medida aparecen representadas dentro de todas las litofacies establecidas, a excepción del parche arrecifal (PA) y barrera coralina (BC), constituidas exclusivamente por calizas framestone y bindstone. Con un porcentaje mucho menor se ha identificado calizas packstone, wackstone, rudstone y floatstone heterogéneamente distribuidas a lo largo del sondeo.

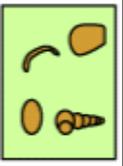
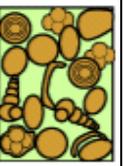
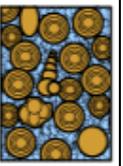
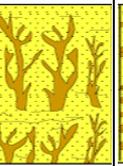
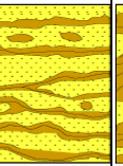
Allocthonous limestone original components not organically bound during deposition				Autochthonous limestone original components organically bound during deposition				
Less than 10% >2 mm components		Greater than 10% >2 mm components		Boundstone				
Contains lime mud (< 0.02 mm)		No lime mud		Matrix supported	< 2 mm component supported	By organisms which act as barriers	By organisms which encrust and bind	By organisms which build a rigid framework
Mud supported	Grain supported	Less than 10% grains (>2 mm components)	Greater than 10% grains					
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone
								

Figura 4.24.- Clasificación textural de las rocas carbonatadas según Dunham, 1962, modificada por Embry y Klovan (1971) y James (1984), para incluir la clasificación textural de las calizas arrecifales.

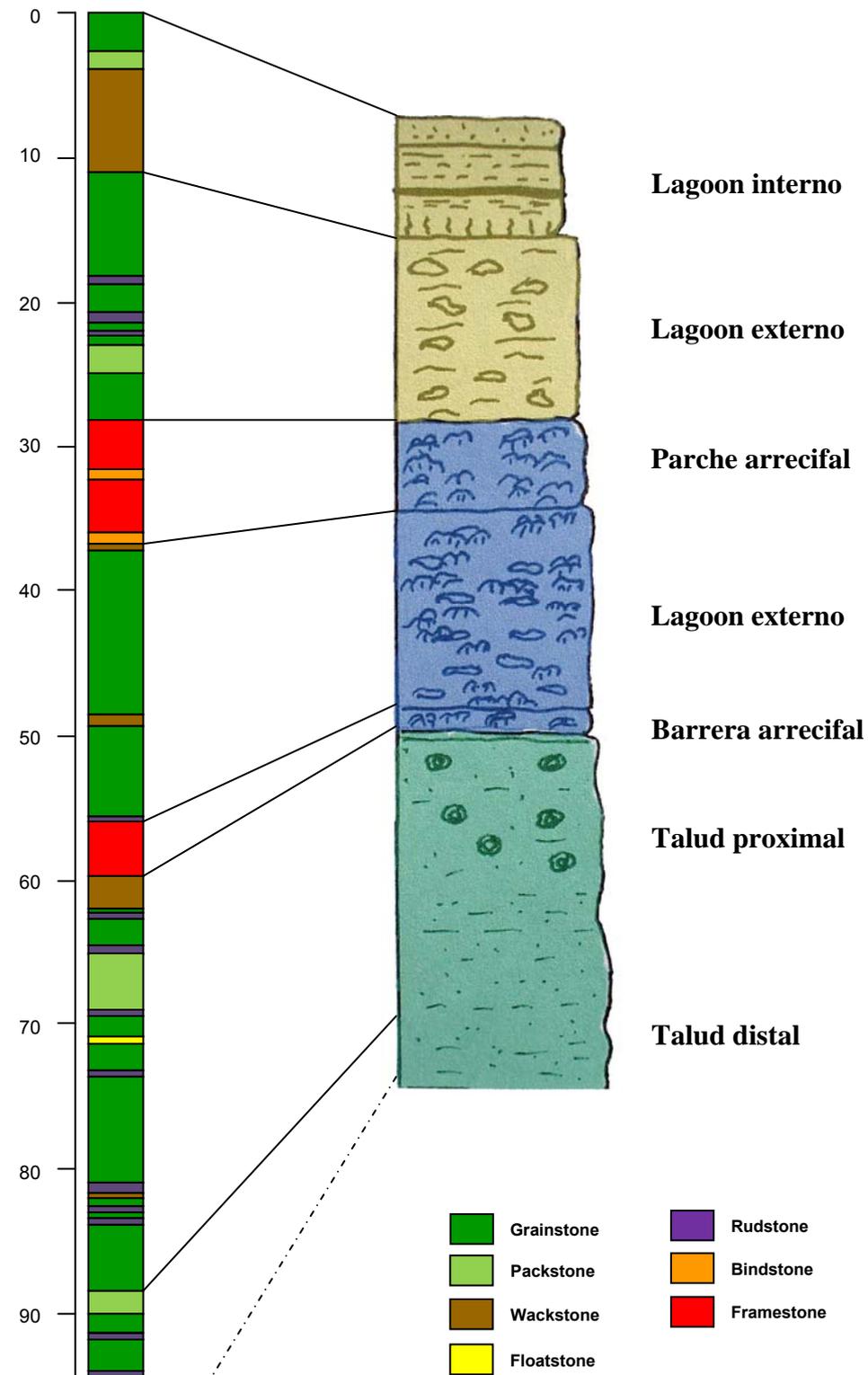


Figura 4.25.- Columna estratigráfica del sondeo MC2, donde se han identificado, a partir de las muestras de visu y de las láminas delgadas, las texturas presentes en las rocas carbonatadas.

Si se analizan *sintéticamente* cada una de las litofacies establecidas a lo largo del presente trabajo, desde un punto petrográfico, cabe destacar los siguientes aspectos:

✚ Lagoon interno (LI): de techo a muro, y en secuencia granodecreciente, el lagoon interno está representado por 2,5 m de calizas grainstone en relación al lagoon oolítico, seguidos de 1,5 m de calizas packstone (transición lagoon oolítico-lagoon lodoso), estando constituido el muro de esta litofacies por unos 7 m de calizas wackstone en relación al lagoon lodoso. Han sido estudiadas dos muestras; las calizas grainstone del techo (MC2-A) y a las calizas wackstone del muro (MC2-B), correspondientes con el lagoon oolítico y lagoon lodoso respectivamente. El aspecto macroscópico de sendas calizas aparece recogido en la figura 4.26.

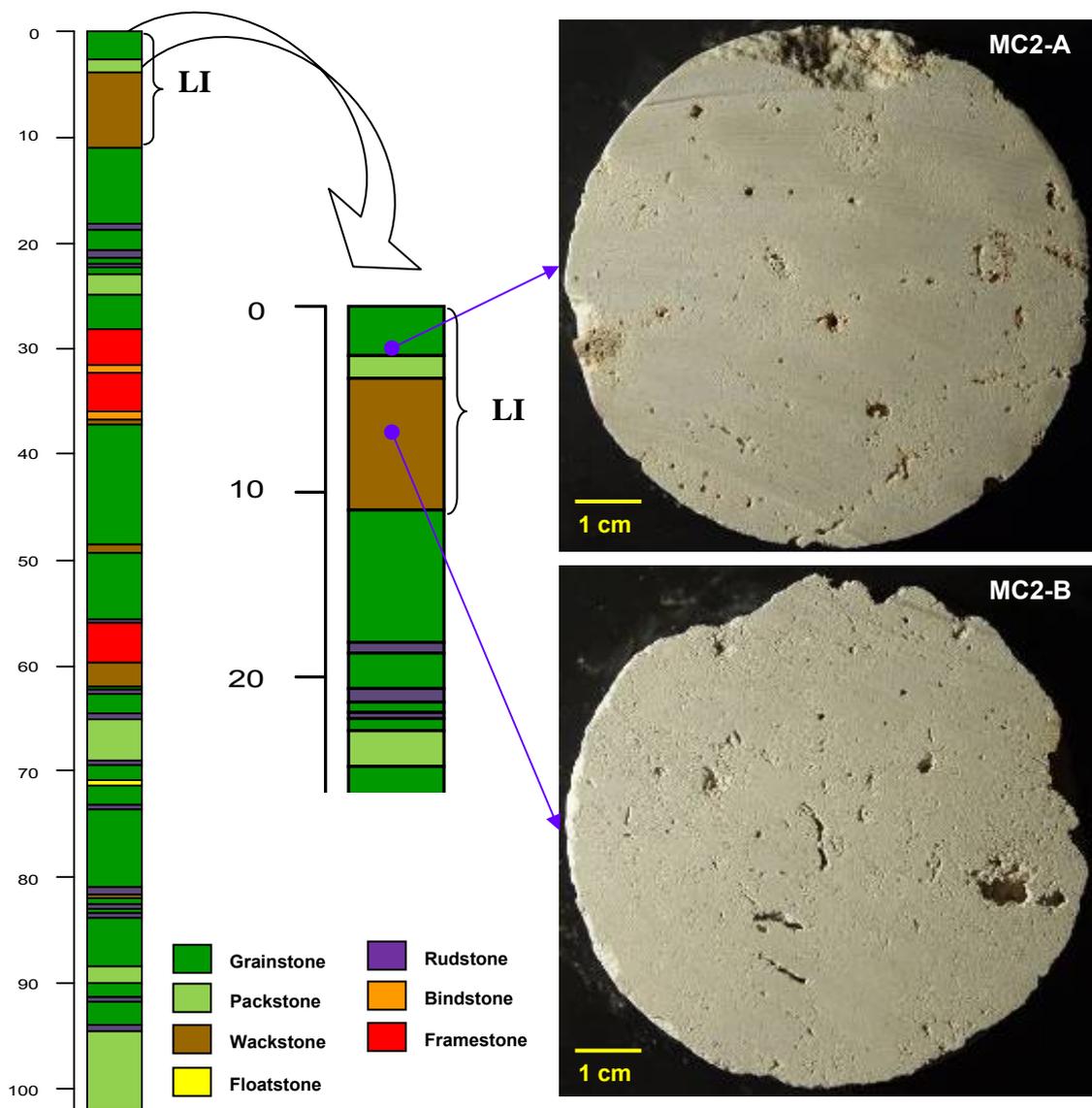


Figura 4.26.- Aspecto macroscópico de las dos calizas muestreadas dentro del tramo correspondiente con el lagoon interno (LI) localizado dentro del sondeo MC2. Secciones macroscópicas pertenecientes a las muestras MC2-A (arriba) y MC2-B (abajo) respectivamente. En ambos casos, las imágenes corresponden a superficies en corte de sierra de los testigos, realizadas perpendiculares al eje del sondeo.

La muestra MC2-A corresponde con una caliza oolítica con textura granosoportada (4.27), constituida por abundantes oolitos, con morfologías esféricas a subesféricas y tamaños homométricos próximos a las 100 μm , junto a escasos fragmentos de conchas, con morfologías elongadas y tamaños milimétricos (Figura 4.28). Se puede clasificar como una caliza grainstone (Dunham, 1962) o una ooesparita (Folk, 1962).

Los intersticios entre estos granos esqueléticos y no esqueléticos aparecen representados por cristales de calcita esparítica ($> 20 \mu\text{m}$) que actúa a modo de fase de unión (cemento) y por espacios vacíos tipo poro (intergranular). Destaca además la presencia de una importante porosidad intragranular, asociada al núcleo de los oolitos, parte de la cual corresponde con porosidad cerrada (Figura 4.28).

La composición mineralógica de ambas muestras, al igual que la de todas las descritas a lo largo del presente subcapítulo, aparecen sintetizadas en la tabla 4.13, mientras que los difractogramas obtenidos se recogen en el archivo de datos multimedia adjunto a la presente Tesis Doctoral.

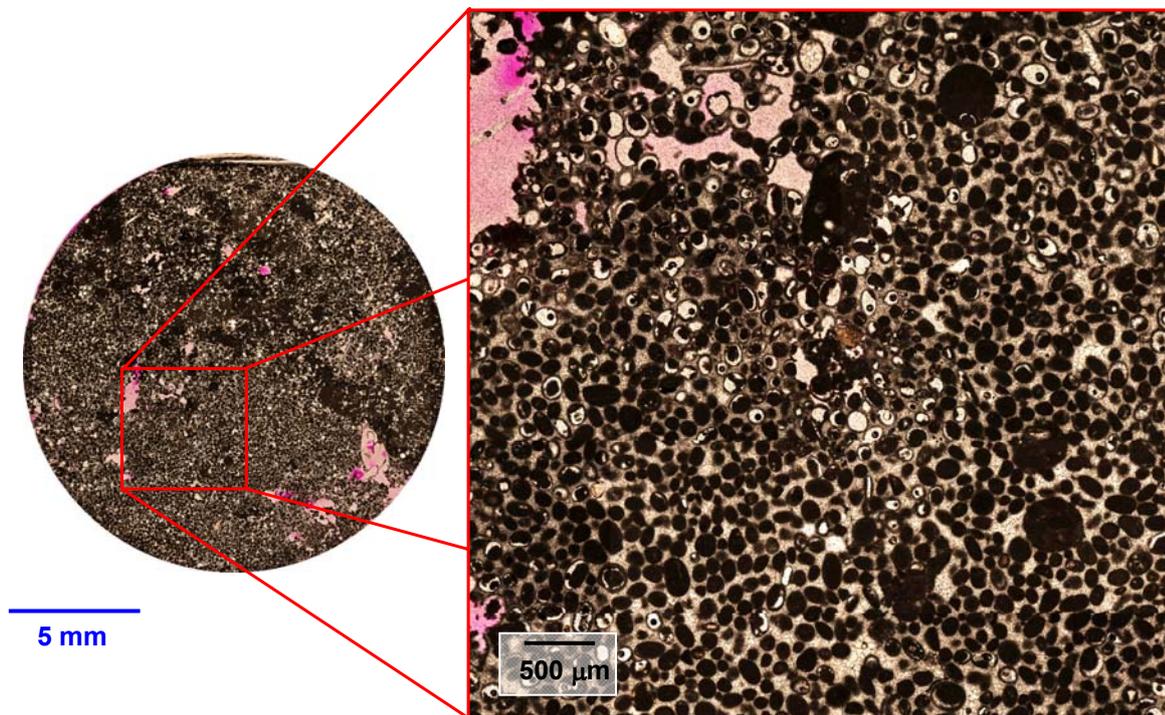


Figura 4.27.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-A, correspondiente al tramo superior del lagoon interno (LI). A esta escala de observación es posible apreciar la presencia de los pequeños oolitos esféricos. Se pueden observar algunos poros de orden milimétrico, de tonos rosados, ya que las láminas delgadas han sido preparadas sobre especímenes impregnadas en resinas fluorescentes tal y como se describe en el subcapítulo anterior.

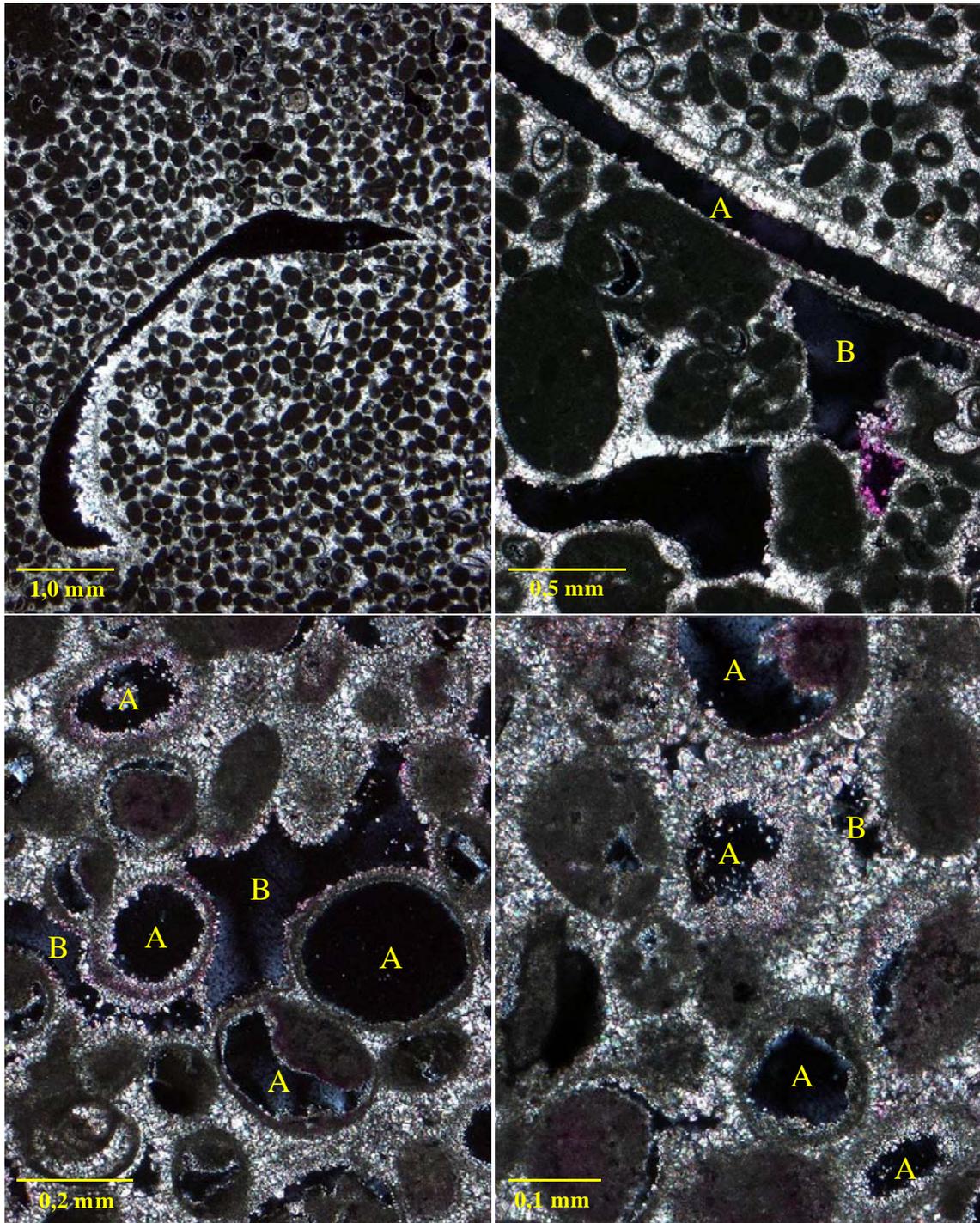


Figura 4.28.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-A correspondiente al tramo superior del lagoon interno (LI). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza oolítica; poros intragranulares asociados a núcleos de los oolitos y otros organismos fósiles (A), algunos de los cuales se encuentran cerrados, y poros intergranulares (B), localizados dentro de la masa esparítica que actúa a modo de cemento.

La muestra MC2-B corresponde con una caliza fosilífera con textura lodosoportada (4.29), constituida por restos de foraminíferos, con morfologías subredondeadas y tamaños homométricos próximos a las 100-200 μm , junto a escasos fragmentos de conchas, con morfologías elongadas y tamaños micrométricos (Figura 4.30), todos ellos flotando dentro de un lodo carbonatado con tamaño micrita ($< 4 \mu\text{m}$). Correspondería con una caliza wackstone (Dunham, 1962) o una biomicrita (Folk, 1962).

Dentro del lodo carbonatado destaca la presencia de una importante porosidad secundaria de tipo vuggy, así como, escasos canales de recorridos centimétricos y aperturas micrométricas. Sin embargo, es la porosidad intramatricial la que parece mostrar mayor desarrollo dentro de esta roca carbonatada. Igualmente, es destacable la presencia de poros intragranulares en relación con las cámaras de los foraminíferos, algunos de ellos probablemente ocluidos (porosidad cerrada), así como escasos poros móldicos (Figura 4.30).

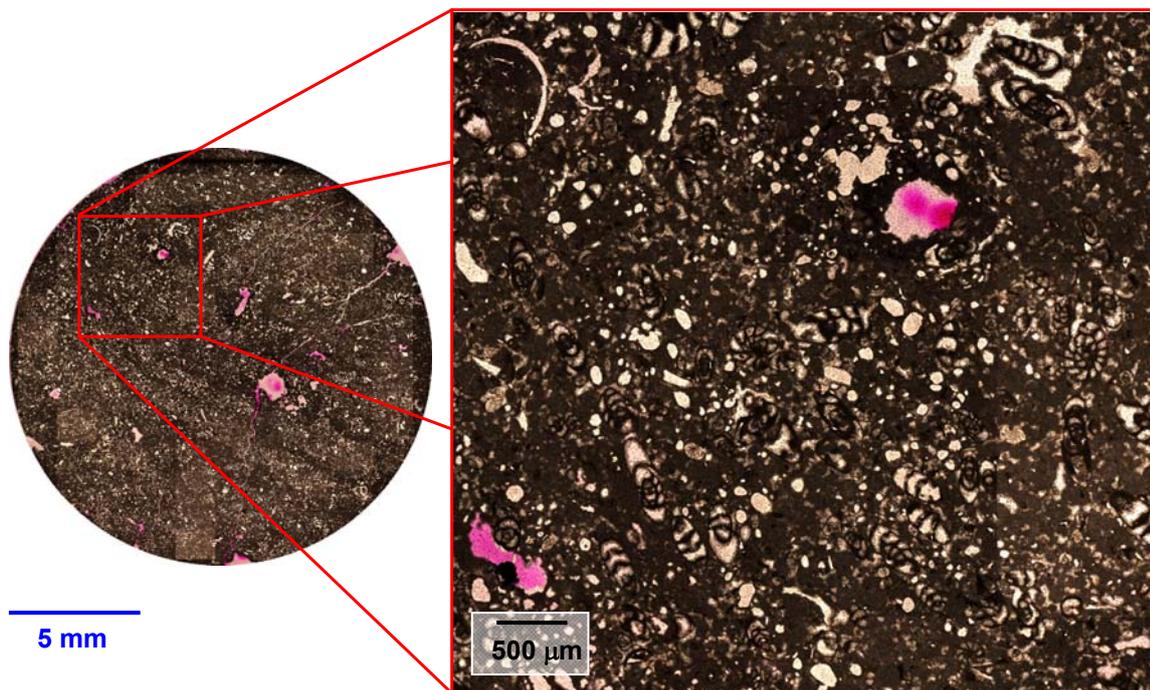


Figura 4.29.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-B, correspondiente al tramo inferior del lagoón interno (LI). A esta escala de observación destaca la presencia de huecos de tamaño milimétrico (vug) y pequeños canales (porosidad secundaria), así como, el resto de porosidad primaria asociada a esta caliza (intragranular e intramatricial). Se pueden observar algunos poros de orden milimétrico, de tonos rosados, ya que las láminas delgadas han sido preparadas sobre especímenes impregnadas en resinas fluorescentes tal y como se describe en el subcapítulo anterior.

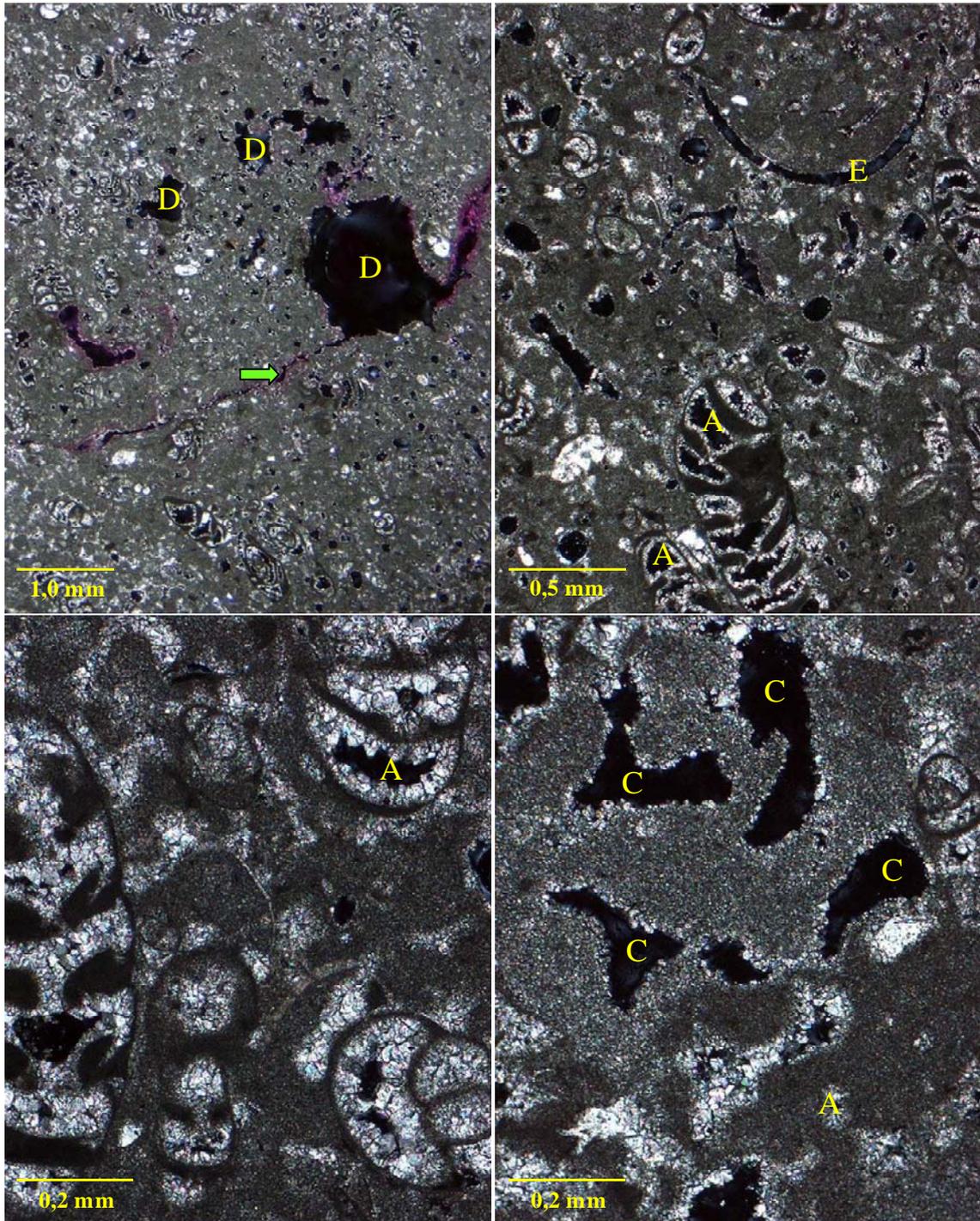


Figura 4.30.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-B correspondiente al tramo inferior del lagoón interno (LI). Observaciones llevadas a cabo bajo nicoles cruzados con diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza micrítica, entre los que caben destacar los poros intragranulares localizados en las cámaras de algunos organismos (A) y los poros intramatriciales, situados éstos dentro de la masa micrítica (C). Igualmente, destaca la presencia de porosidad secundaria de tipo vuggy (D), móldica (E) y la presencia de pequeños canales (flecha verde).

Tabla 4.13.- Composición mineralógica deducida de los diagramas de difracción de rayos X llevadas a cabo para todos los testigos de sondeo estudiados.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Composición mineralógica (%)									Σ	
			Cuarzo	Calcita	Dolomita	Ankerita	Moscovita	Montmorillonita	Dickita	Halita	Fase amorfa		
MC2-A6	2,23	Lagoon interno	0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0
MC2-B1	5,88		2,9	96,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-D1	14,50	Lagoon externo	0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-E6	17,51		1,6	97,2	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-F6	19,54		0,0	98,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,1	100,0	
MC2-G6	21,52		0,0	99,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	100,0	
MC2-K1	33,31	Parche arrecifal	0,0	99,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	100,0	
MC2-L5	34,53		0,0	98,9	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,1	100,0	
MC2-N1	42,08	Lagoon externo	0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-O1	48,12		0,0	98,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	100,0	
MC2-O5	48,32		1,0	3,8	0,0	94,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	100,0	
MC2-P6	50,78		0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-R6	56,83	Barrera	0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-T6	60,96	Talud proximal	0,0	3,9	0,0	95,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-V6	70,03		0,9	98,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-X6	81,14		0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	100,0	
MC2-Y6	85,60		0,0	61,7	19,1	19,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	100,0	
MC2-Z1	88,92	Talud distal	0,8	40,1	0,0	57,7	0,6	0,0	0,0	0,6	0,2	100,0	

✚ Lagoon externo (LE): aparece representado por dos tramos separados entre sí por un parche arrecifal (PA).

El tramo superior del lagoon externo, con una potencia de unos 17 m, se caracteriza por la dominante presencia de calizas grainstone (MC2-D; MC2-E; MC2-F), dentro de las cuales es posible observar escasas intercalaciones decimétricas de calizas con texturas rudstone (MC2-G). Próximo al techo de este nivel superior del lagoon, es posible localizar un tramo de calizas packstone de unos 2 metros de potencia. El aspecto macroscópico de estas cuatro calizas aparece recogido en la figura 4.31.

Igualmente, el tramo inferior del lagoon externo, localizado por debajo del parche arrecifal, se caracteriza por una continuada presencia de calizas grainstone (MC2-N; MC2-P), solamente interrumpida por dos pequeños niveles de orden decimétrico de calizas wackstone, uno inmediatamente por debajo del parche arrecifal, y el segundo, dentro del cual es posible apreciar la presencia de procesos de dolomitización y un importante desarrollo de porosidad secundaria asociada (MC2-O), alrededor de la cota de -48,00 m. El aspecto macroscópico de estas aparece recogido en la figura 4.32.

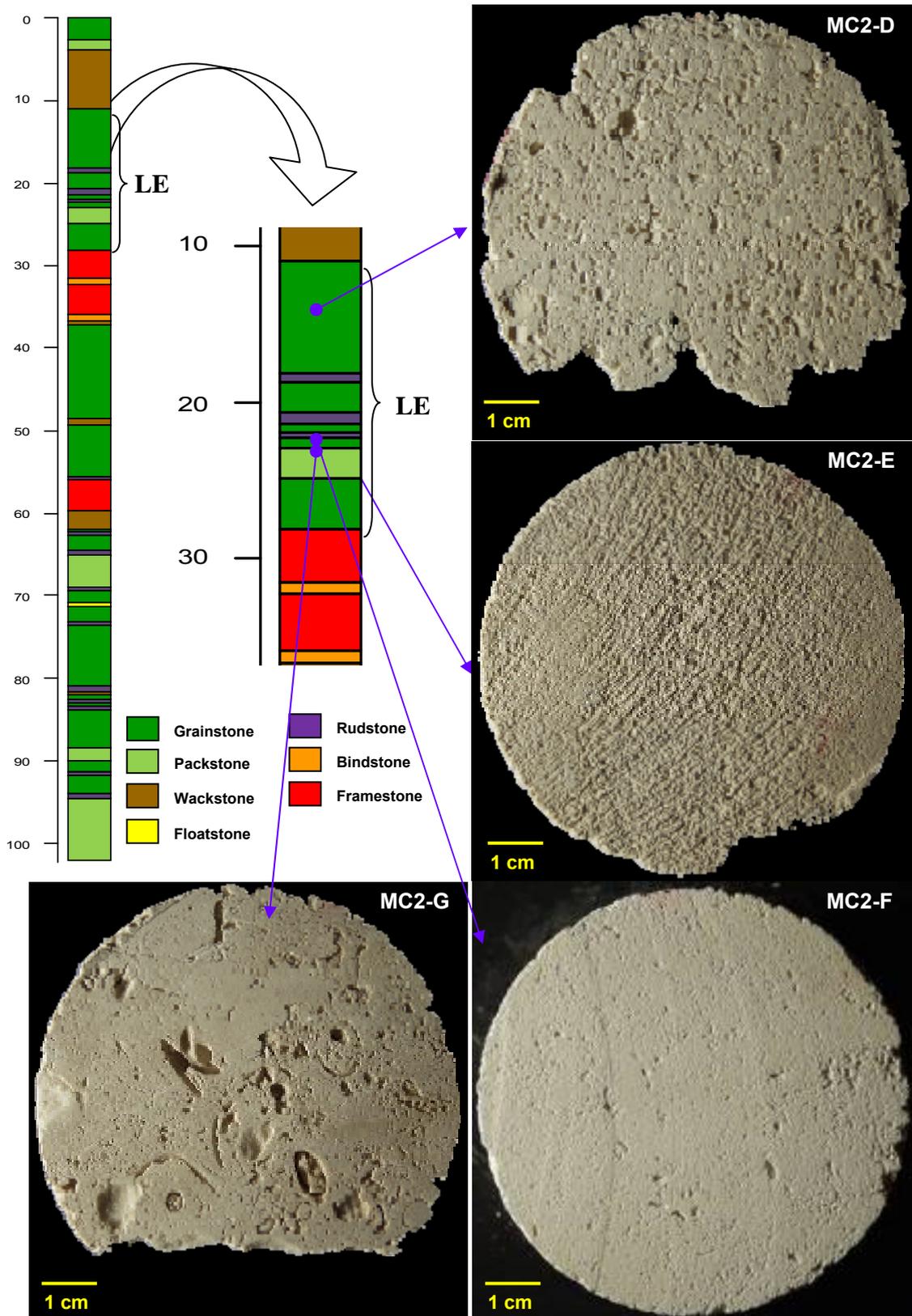


Figura 4.31.- Aspecto macroscópico de las cuatro calizas muestreadas dentro del tramo superior del lagoon externo (LE) localizado dentro del sondeo MC2. Secciones macroscópicas pertenecientes a las muestras MC2-D; MC2-E; MC2-F y MC2-G respectivamente. En todos los casos, las imágenes corresponden a superficies en corte de sierra de los testigos, realizadas perpendiculares al eje del sondeo.

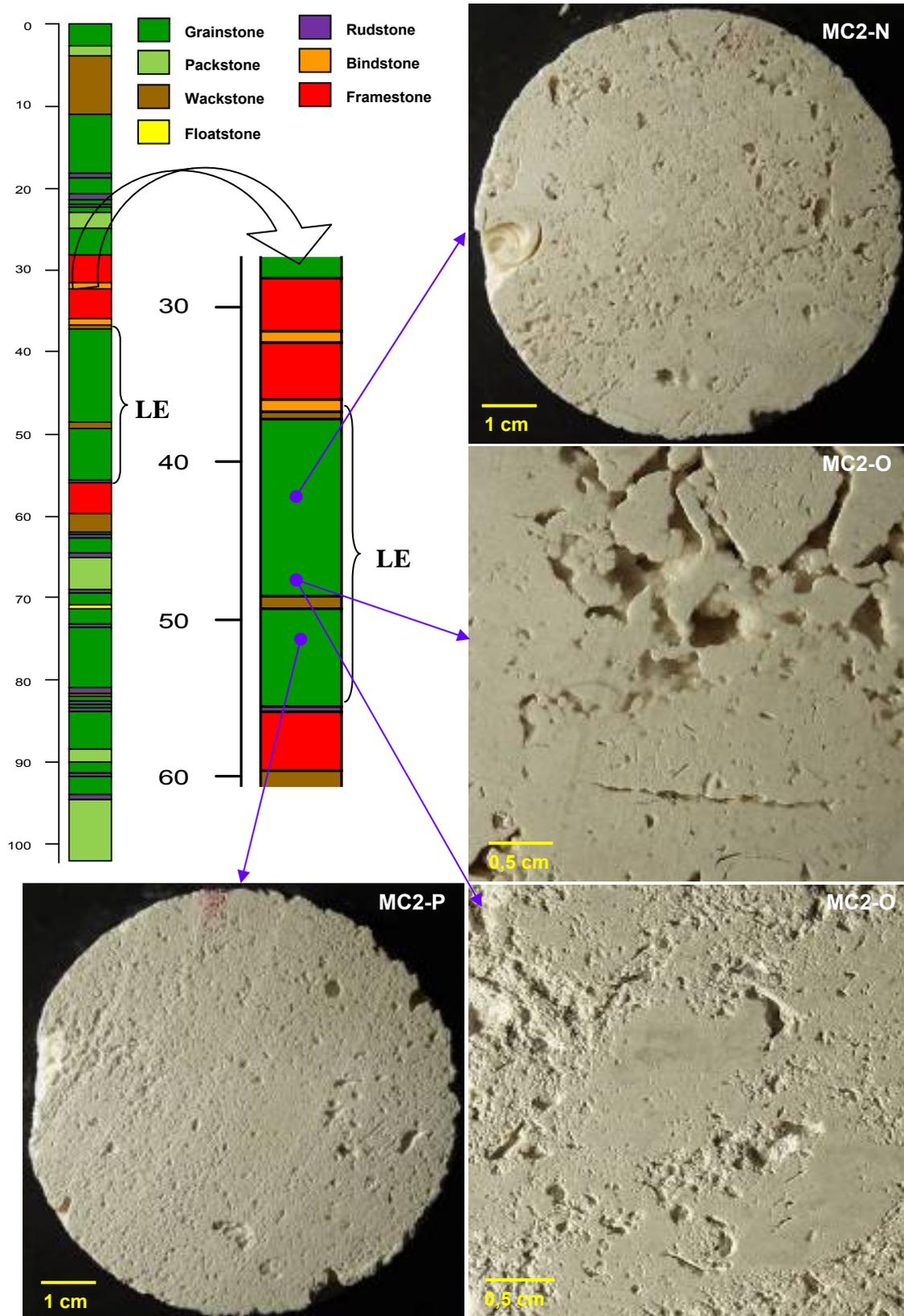


Figura 4.32.- Aspecto macroscópico de las tres calizas muestreadas dentro del tramo inferior del lagoón externo (LE) localizado dentro del sondeo MC2. Secciones macroscópicas pertenecientes a las muestras MC2-N; MC2-P y MC2-O. Se presentan dos fotografías del testigo MC2-O, en su tramo dolomitizado (arriba) y en su tramo no dolomitizado (debajo) respectivamente.

Las muestras MC2-D, MC2-E y MC2-F corresponden con tres calizas fosilíferas con texturas granosoportadas (Figuras 4.33 y 4.34), aunque tanto macroscópica como microscópicamente presentan importantes diferencias en cuanto a tipo, tamaño, porcentaje y distribución tanto de los granos esqueléticos como de su porosidad.

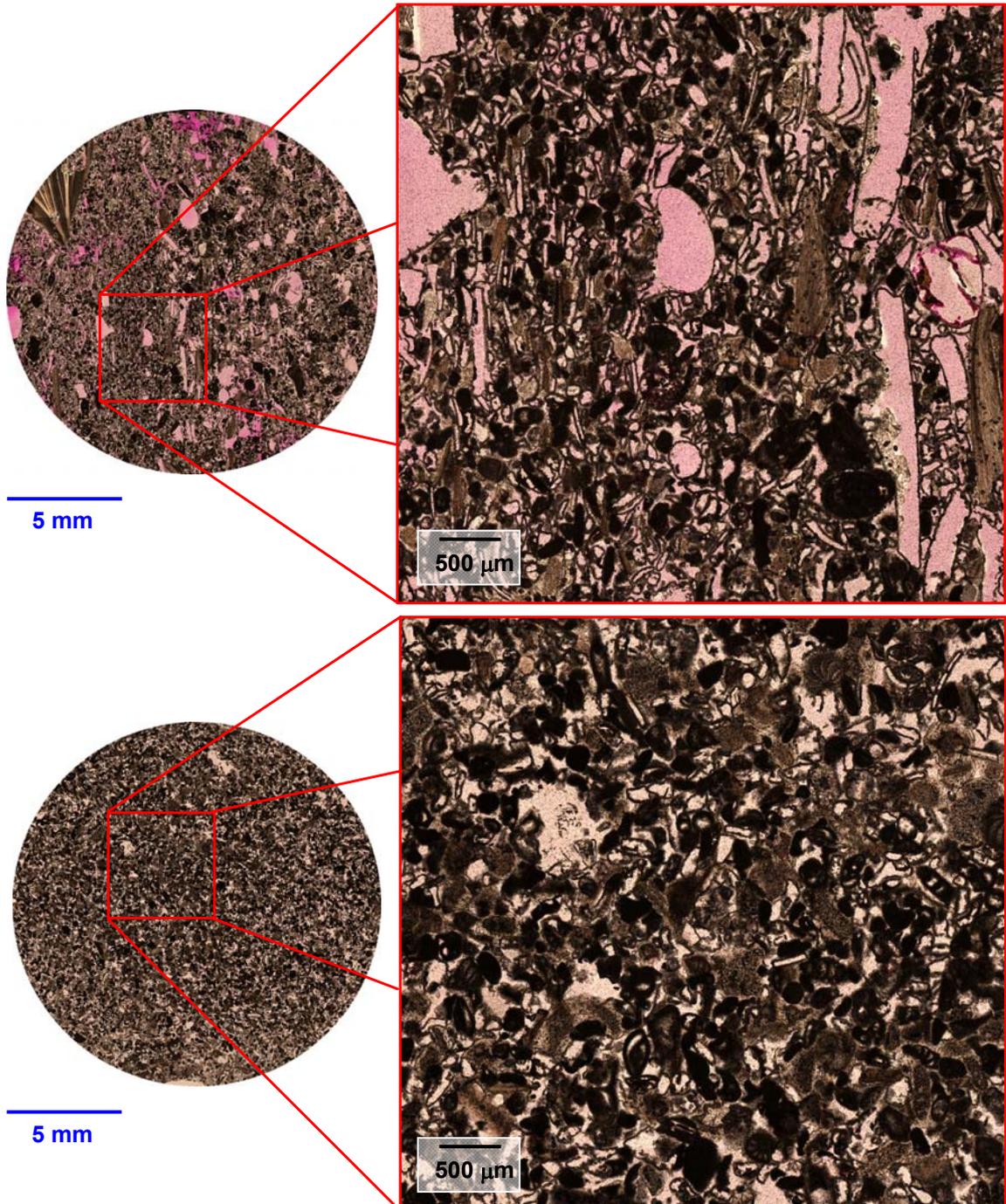


Figura 4.33.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de dos de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas de los testigos de sondeo MC2-D (arriba) y MC2-E (abajo). A esta escala de observación destaca la presencia de una importante porosidad móldica en la imagen superior, y la notoria porosidad intergranular presente en ambas rocas. Los poros intragranulares asociados a las cámaras de los organismos son difícilmente observables a esta escala.

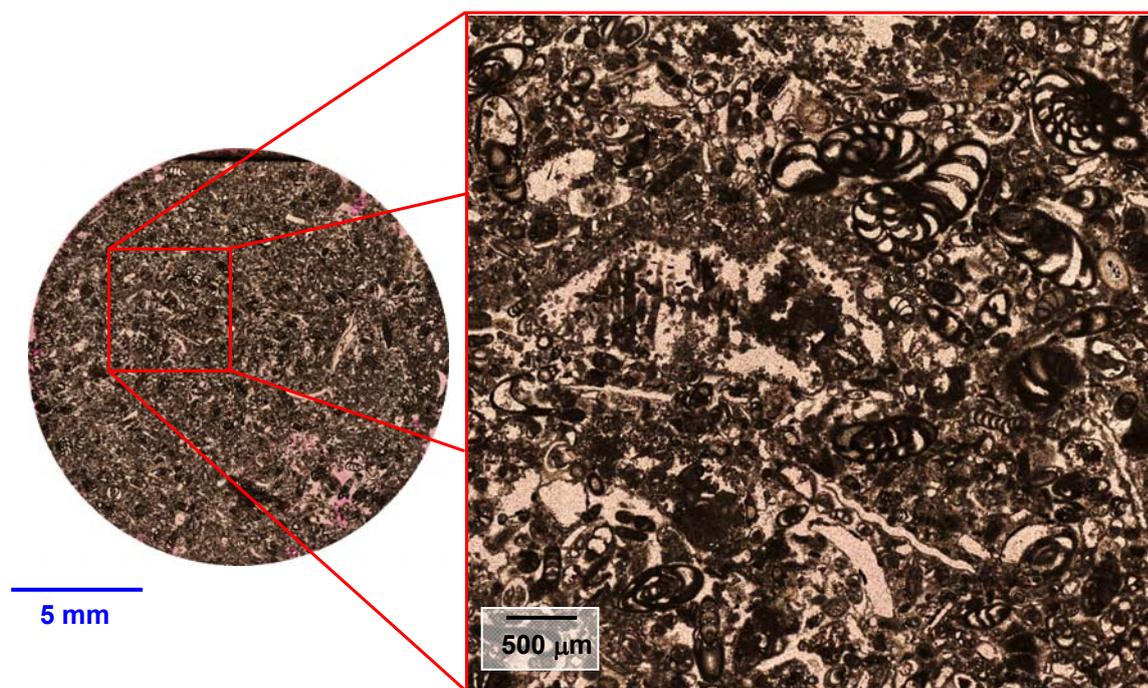


Figura 4.34.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para la observación petrográfica del testigo de sondeo MC2-F. A esta escala de observación destaca la presencia de una importante porosidad intragranular en relación a las cámaras de los abundantes foraminíferos, pudiendo también identificarse una importante porosidad intergranular, y escasos poros móldicos.

Los foraminíferos se encuentran presentes en las tres calizas estudiadas (Figuras 4.35 a 4.37), representando el grano esquelético más abundante de la muestra MC2-F, mientras que los peloides, localizados en las otras dos calizas, constituyen el mejor representado en la MC2-E. Los fragmentos de conchas son abundantes en el testigo de sondeo MC2-D. La fase que aglomera estos organismos corresponde con un lodo carbonatado recristalizado (microesparita). Foraminíferos y peloides, con morfologías subredondeadas a globulares, muestran tamaños que oscilan entre 1-0,01 mm, con valores medios próximos a 100-200 μm . Por su parte, los fragmentos de conchas, con morfologías elongadas, con tamaños máximos situados alrededor de 2-3 mm, con tamaños medios inferiores a las 250 μm .

Dentro de estas calizas fosilíferas destaca la presencia de una importante porosidad intragranular, relevante en la muestra MC2-F, en relación con las cámaras de los foraminíferos, algunos de ellos probablemente ocluidos. Igualmente, muchos de los intersticios entre los granos esqueléticos, aparecen ocupados por espacios vacíos (poros intergranulares). Destaca también la presencia de una importante porosidad móldica (porosidad secundaria) ligada a la muestra MC2-D, que en menor medida también ha podido ser observada en la muestra MC2-F (Figura 4.35 a 4.37).

Estas calizas se pueden clasificar como calizas packstone-grainstone (Dunham, 1962) o como biopelmicrita, pelmicrita y biomicrita (Folk, 1962) para las muestras MC2-D, MC2-E y MC2-F respectivamente.

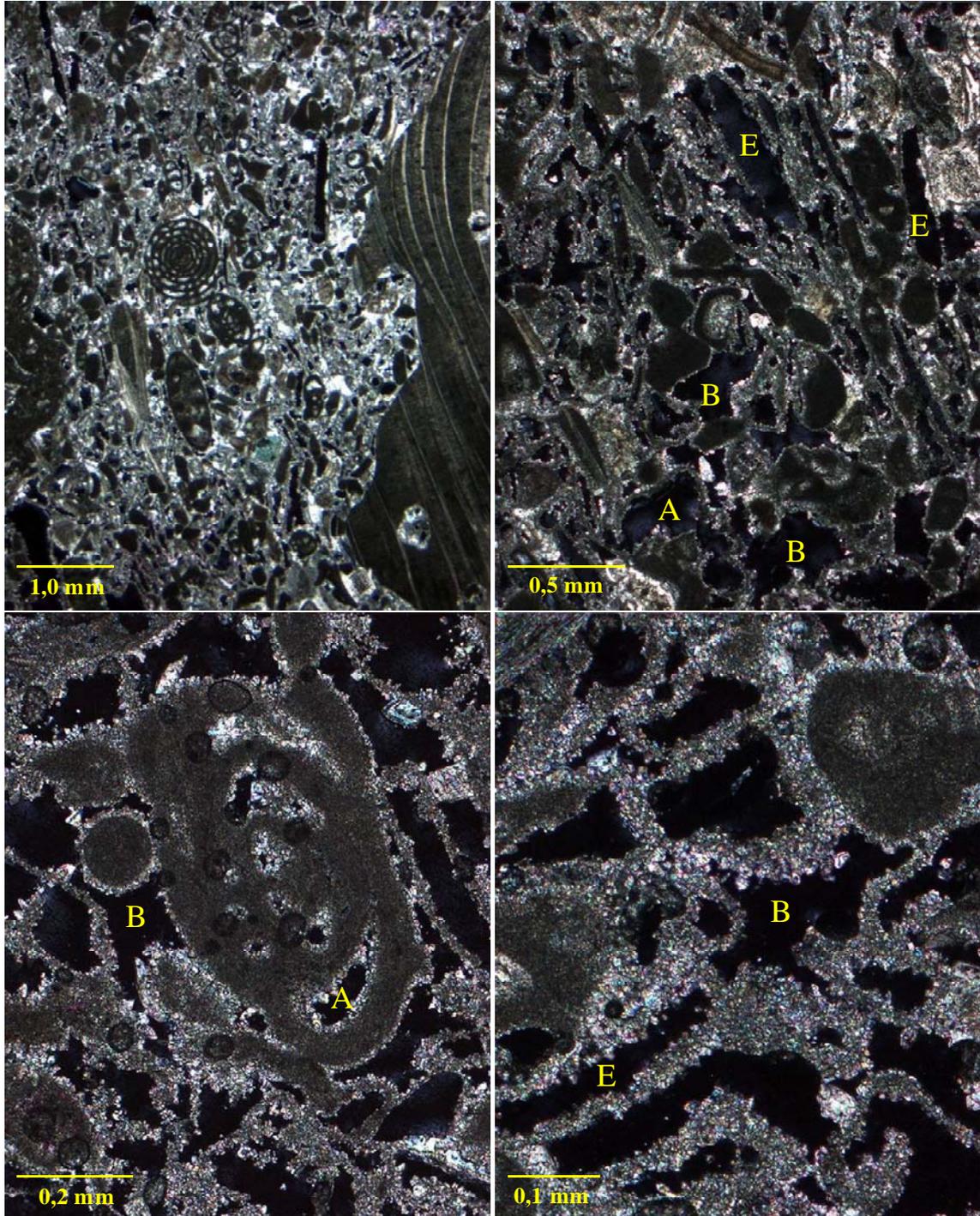


Figura 4.35.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) y nicols cruzados, de la muestra MC2-D (tramo superior lagoón externo – LE). Se puede observar con total claridad los diferentes tipos de poros presentes; Intragranulares, localizados en las cámaras de algunos organismos (A) e intergranulares, situados entre éstos (B). Igualmente, destaca la presencia de una importante porosidad secundaria a modo de porosidad móldica (E).

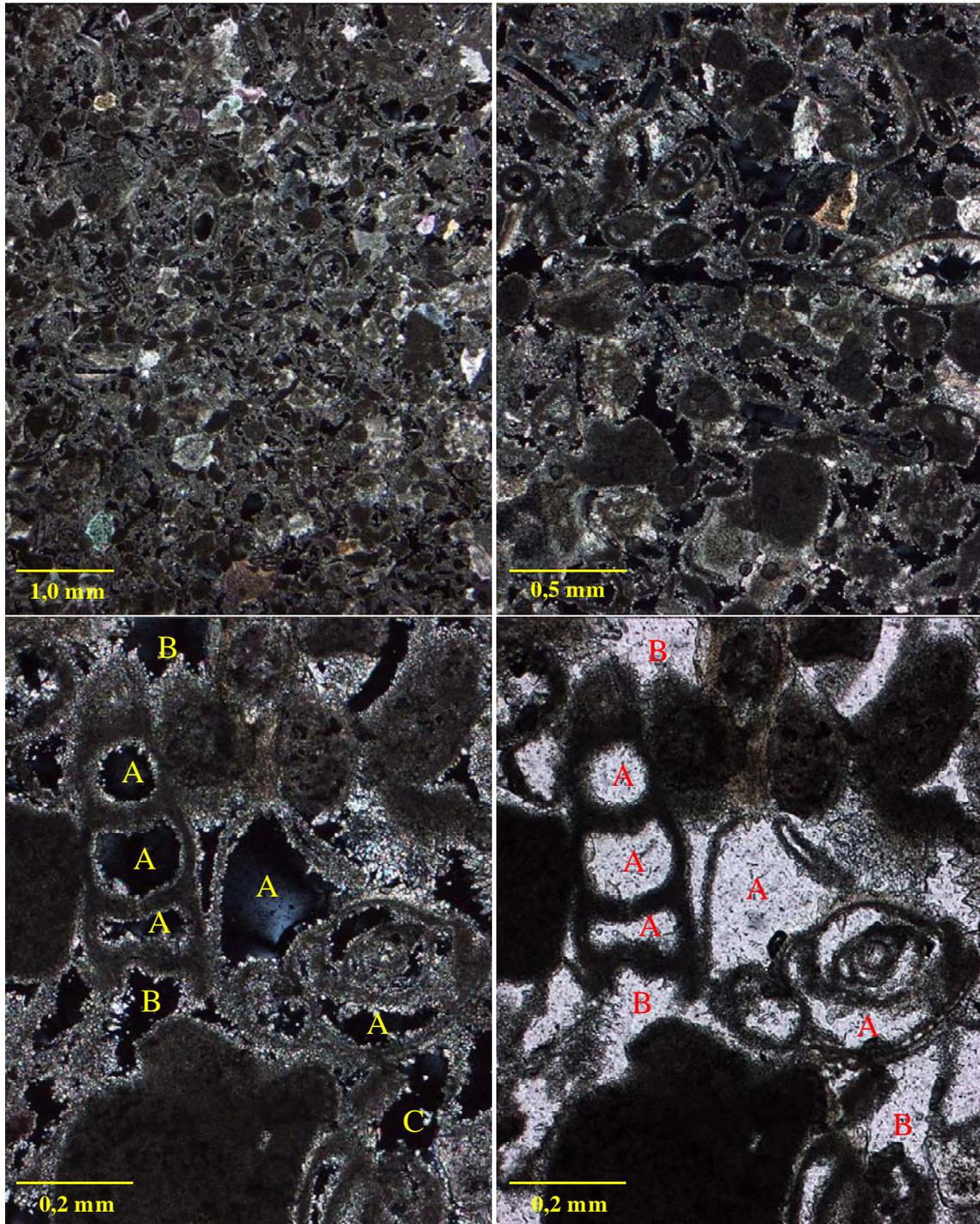


Figura 4.36.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-E correspondiente al tramo superior del lagoon externo (LE). Observaciones llevadas a cabo con nicóles cruzados (a excepción de la micrografía inferior, tomada con luz paralela) bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera, donde porosidad intergranular (B) y porosidad intragranular (A), representan la mayor parte de los espacios vacíos localizados dentro de esta caliza.

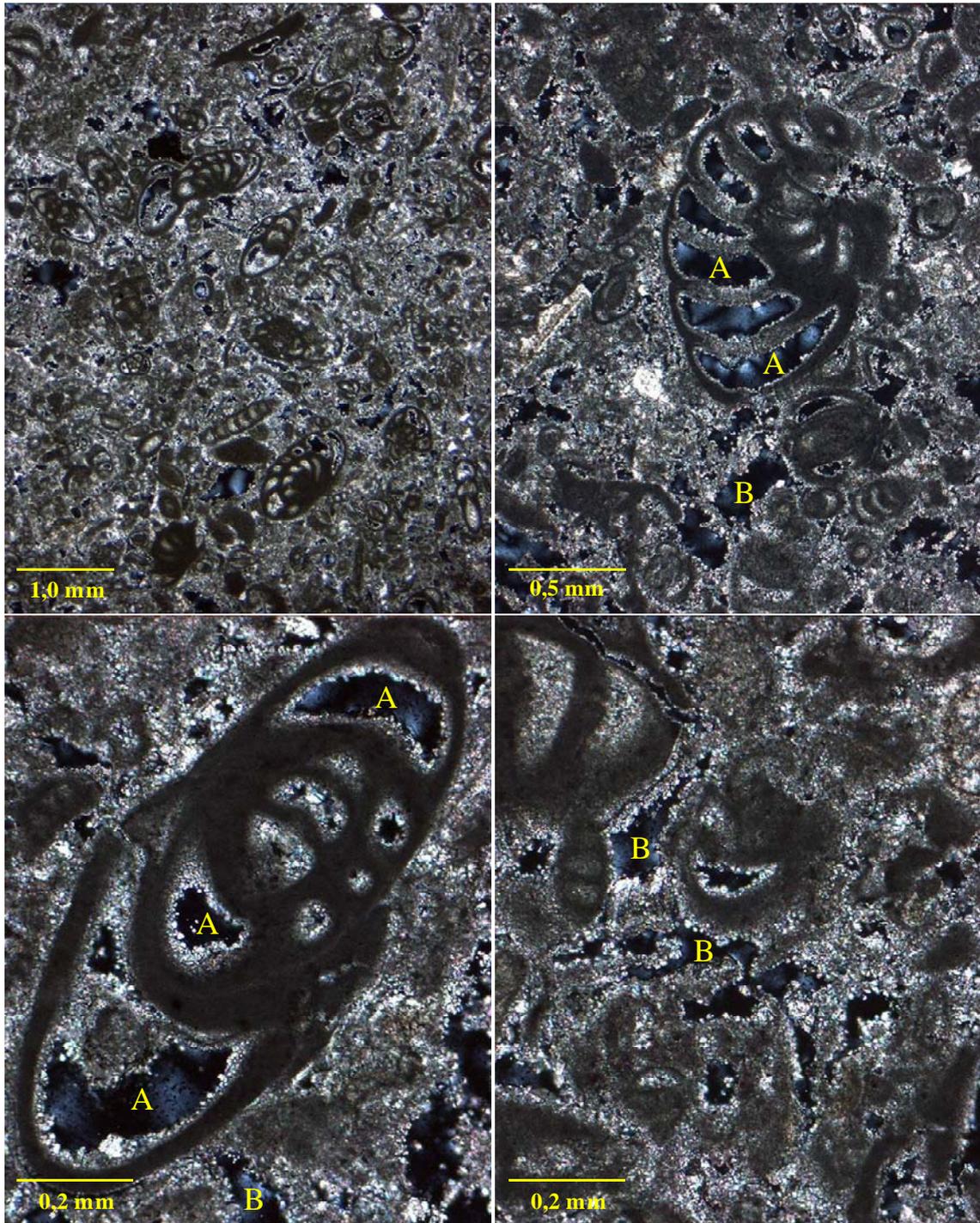


Figura 4.37.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-F correspondiente al tramo superior del lagoon externo (LE). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera. Así, porosidad intragranular (A) y porosidad intergranular (B) son nuevamente identificados a esta escala de observación.

La muestra MC2-G corresponde con una caliza fosilífera con textura rudstone (Figura 4.38), donde fragmentos de gasterópodos y bivalvos milimétricos a centimétricos aparecen englobados por otros de menor tamaño y escaso fango carbonatado. Estos últimos, que actúan como soporte de los de mayor tamaño, están representados por restos heterométricos (2-0,1 mm) de foraminíferos, bivalvos gasterópodos y peloides, con morfologías predominantemente subredondeadas, a excepción de los fragmentos de conchas que muestran morfologías más elongadas (Figura 4.39). Correspondería con una caliza rudstone (James, 1984) o una biomicrita (Folk, 1962).

Se aprecia una importante porosidad primaria asociada fundamentalmente a las cámaras de los organismos (intragranular), a los intersticios entre granos (intergranular y/o de protección “shelter”) y al lodo carbonatado (intramatricial). Parte de esta porosidad primaria, fundamentalmente la intragranular, podría estar ocluida (porosidad cerrada). Igualmente, destaca la importante porosidad secundaria ligada a los fragmentos fósiles (porosidad móldica), en relación a por disolución selectiva de los granos en etapas más o menos tempranas de la diagénesis (Figura 4.39).

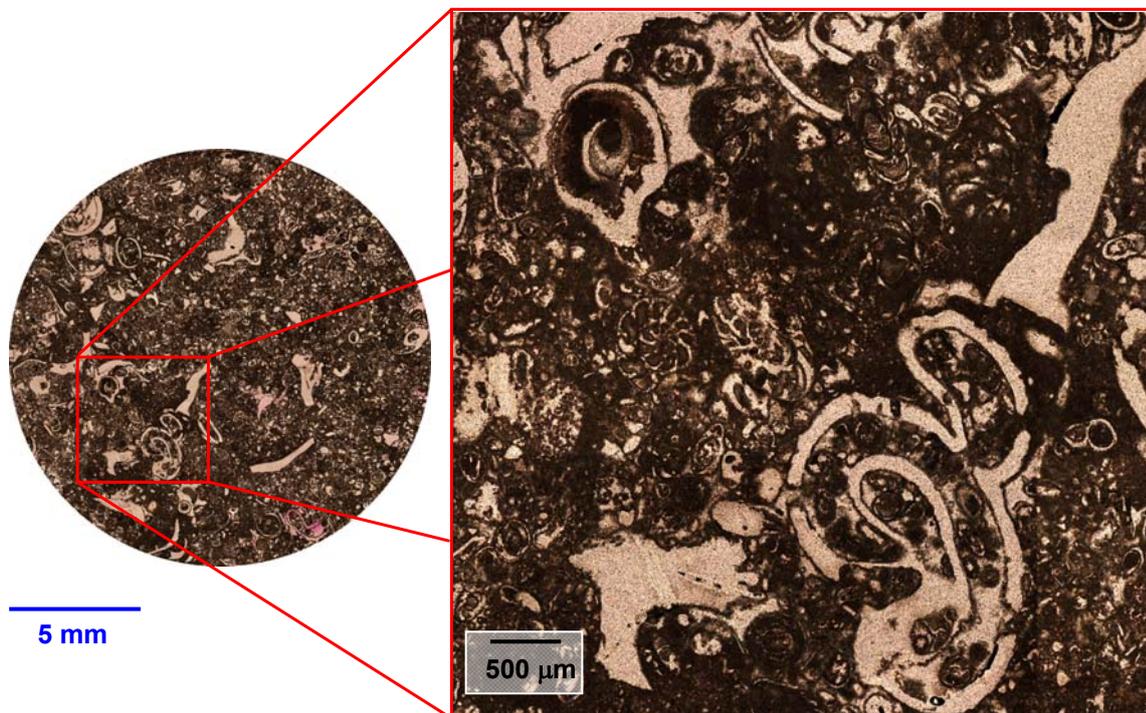


Figura 4.38.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-G. A esta escala de observación, junto a la presencia de restos de organismos milimétricos, destaca la presencia de huecos de tamaño milimétrico asociados a porosidad móldica, así como, el resto de porosidad primaria asociada a huecos intragranulares e intramatriciales.

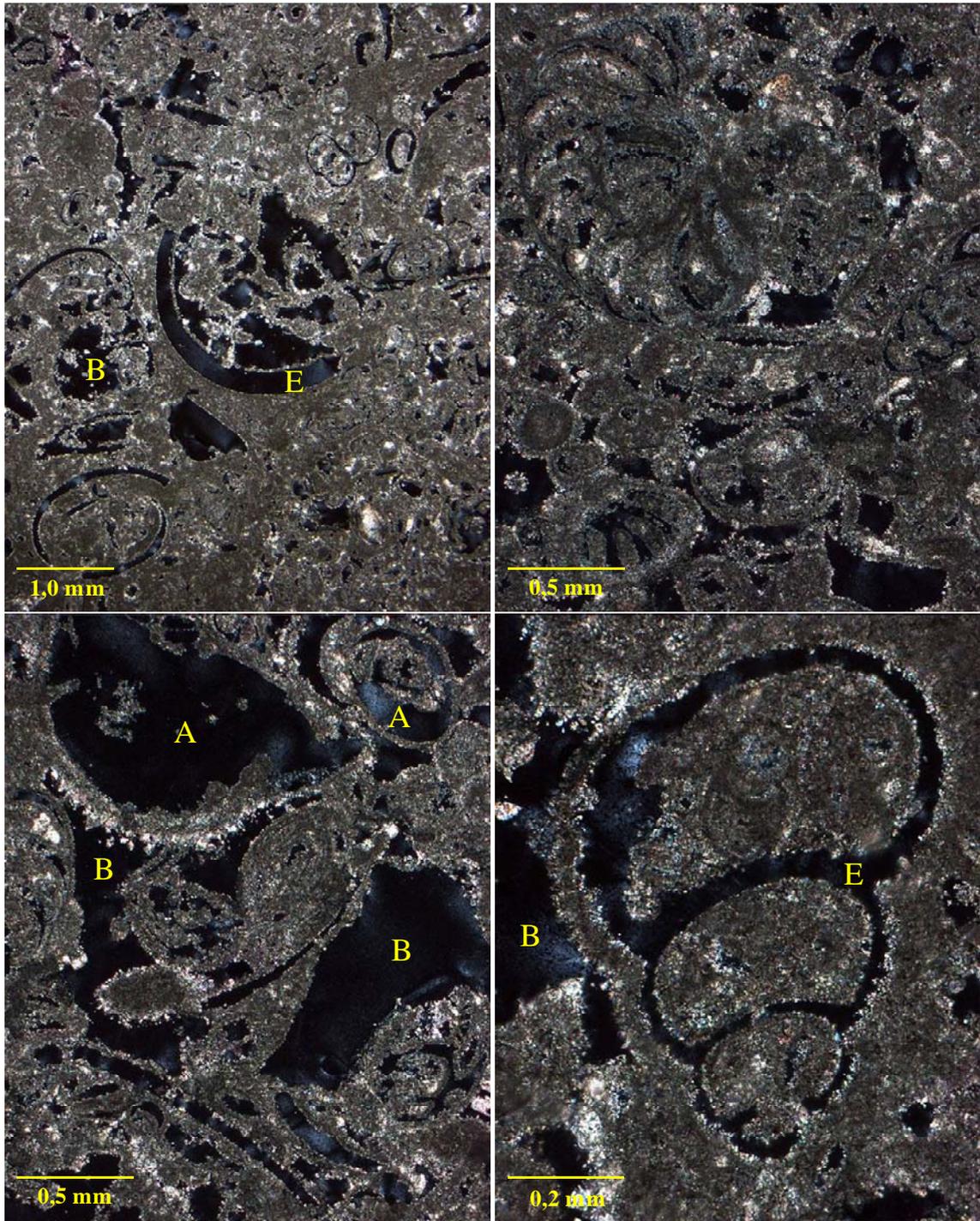


Figura 4.39.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-G correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (LE). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera. La porosidad primaria de tipo intragranular (A) e intergranular (B) son fácilmente identificados a esta escala de observación. Igualmente, destaca la presencia de una importante porosidad secundaria a modo de porosidad móldica (E).

La muestra MC2-N corresponde con una caliza fosilífera con textura entre granosoportada y rudstone, según las secciones delgadas estudiadas (Figura 4.40). Escasos fragmentos centimétricos (1-3 cm) de braquiópodos y gasterópodos, aparecen heterogéneamente soportados por numerosos restos de gasterópodos, bivalvos, corales, algas, foraminíferos y peloides, con tamaños micrométricos (500-50 μm) y morfologías de subredondeadas a elongadas. Los intersticios entre los granos son ocupados por poros y cristales desde micrita (<4 μm) a esparita (<20 μm) a modo de matriz y cemento carbonatados respectivamente (Figura 4.43). Correspondería con una caliza grainstone (Dunham, 1962) o una bioesparita (Folk, 1962).

Se observa un importante volumen de intersticios ocupados por poros irregulares parcialmente rellenos de esparita (porosidad primaria de tipo intergranular) así como porosidad intramatricial. Igualmente es abundante la porosidad primaria de tipo intragranular (cámaras de organismos), y en menor medida poros de perforación asociados a los esqueletos carbonatados de las conchas. En lo referente a la porosidad secundaria destaca la presencia de algunos poros móldicos, asociados fundamentalmente a procesos de disolución de fragmentos de conchas (Figura 4.41).

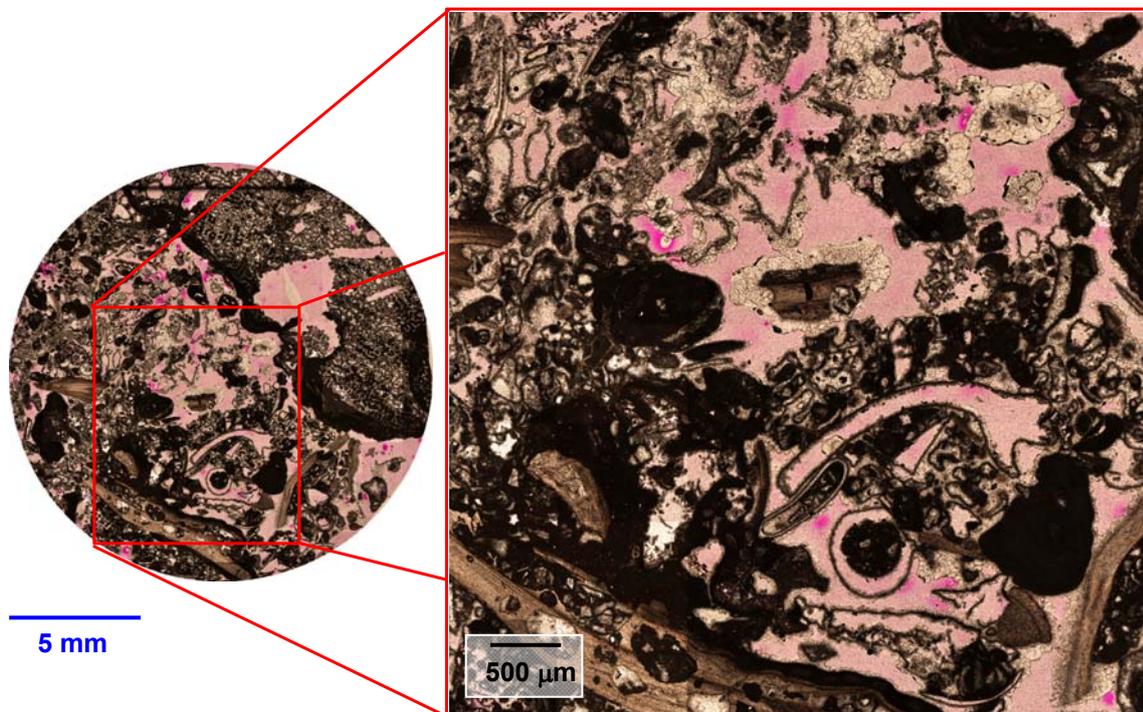


Figura 4.40.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-N. A esta escala de observación, junto a la presencia de los restos de organismos, destaca la presencia de huecos de tamaño milimétrico ocupando los intersticios entre los granos (porosidad intergranular) y la porosidad móldica.

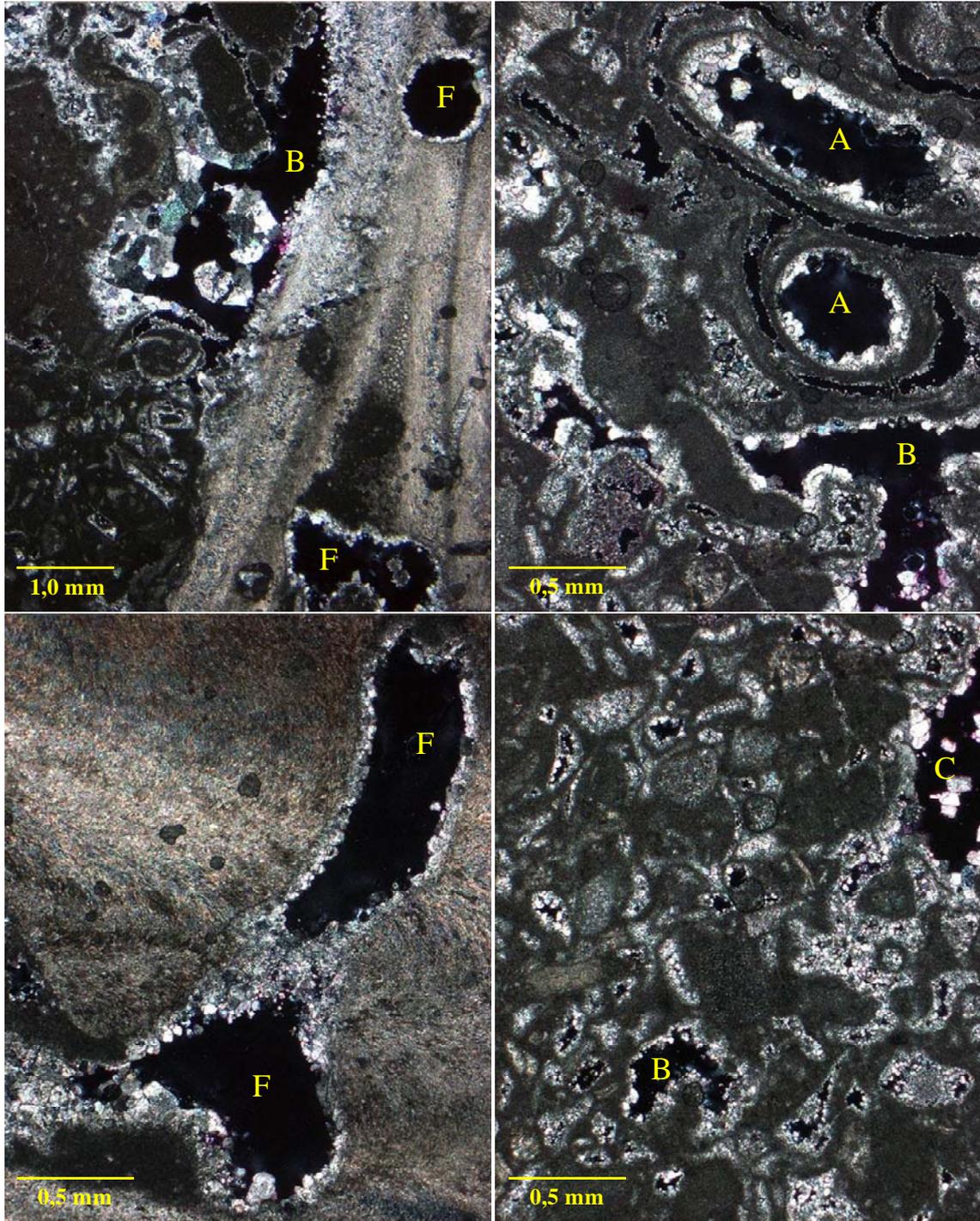


Figura 4.41.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-N correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (LE). Observaciones llevadas a cabo con nicóles cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intragranular (A) e intergranular (B) son fácilmente identificados a esta escala de observación, así como, la escasa porosidad de perforación “boring” (F). Aunque no se refleja en las micrografías la porosidad móldica de esta roca llega a ser importante.

Las muestras MC2-O (Figuras 4.42 y 4.43) y MC2-P (Figura 4.44) corresponden con dos calizas fosilíferas con texturas fundamentalmente granosoportadas, que tanto macroscópica como microscópicamente presentan importantes diferencias en cuanto a tipo, tamaño, porcentaje y distribución de los granos esqueléticos y de su porosidad.

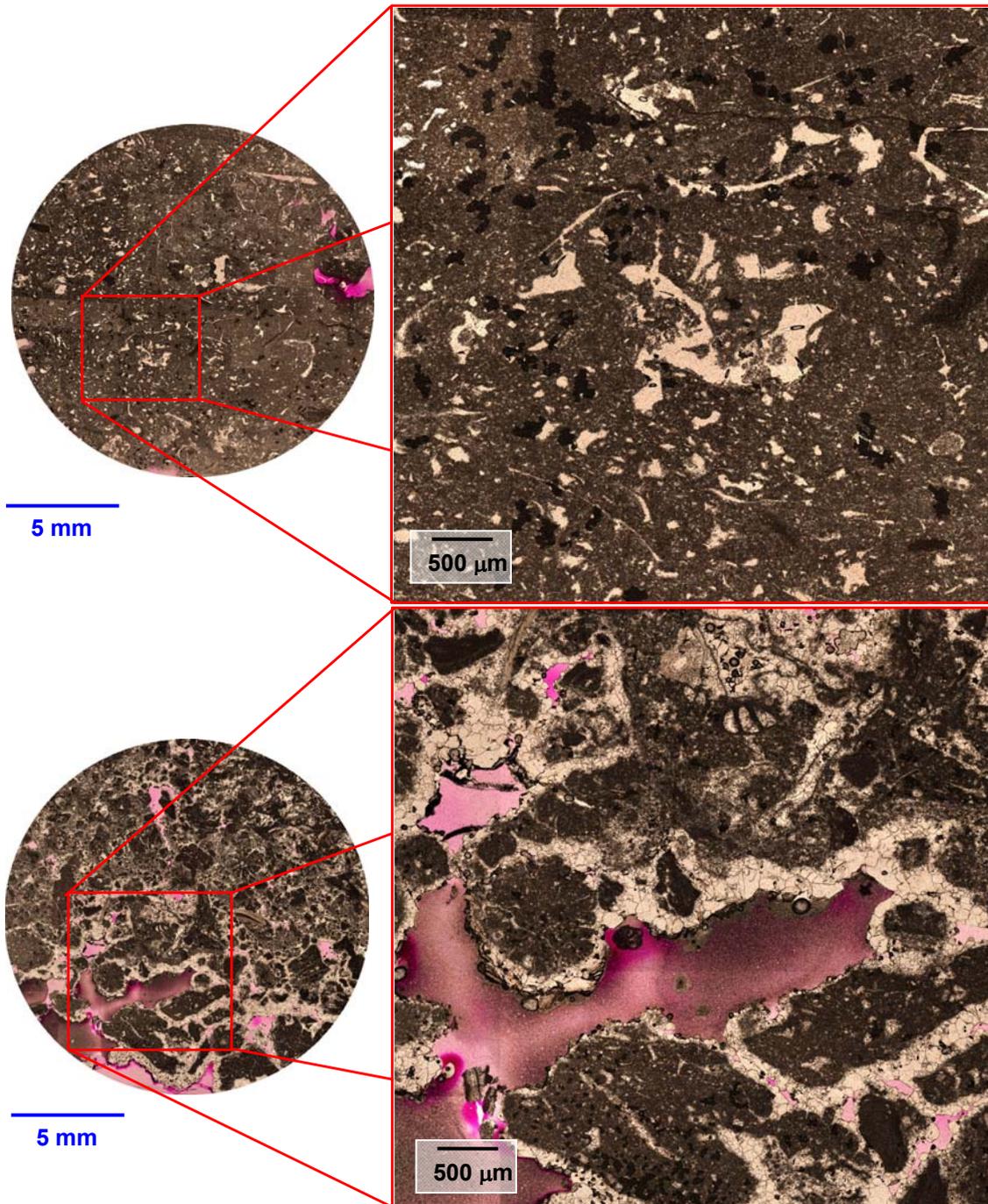


Figura 4.42.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de dos láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-O, correspondientes al tramo no dolomitizado del testigo MC2-O (48,12-48,20 m) y al tramo dolomitizado del testigo MC2O (48,20-48,32 m.), arriba y abajo respectivamente. Destaca el notable incremento en el tamaño y volumen de los poros en el tramo inferior del testigo tras su dolomitización (abajo).



Figura 4.43.- Imagen macroscópica del testigo de sondeo MC2-O, correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (LE), cuya cota se sitúa entre 48,12-48,32 m. El brusco incremento en el volumen y tamaño de los poros, marca claramente la zona del testigo afectada por el proceso de dolomitización (derecha) de la no afectada.

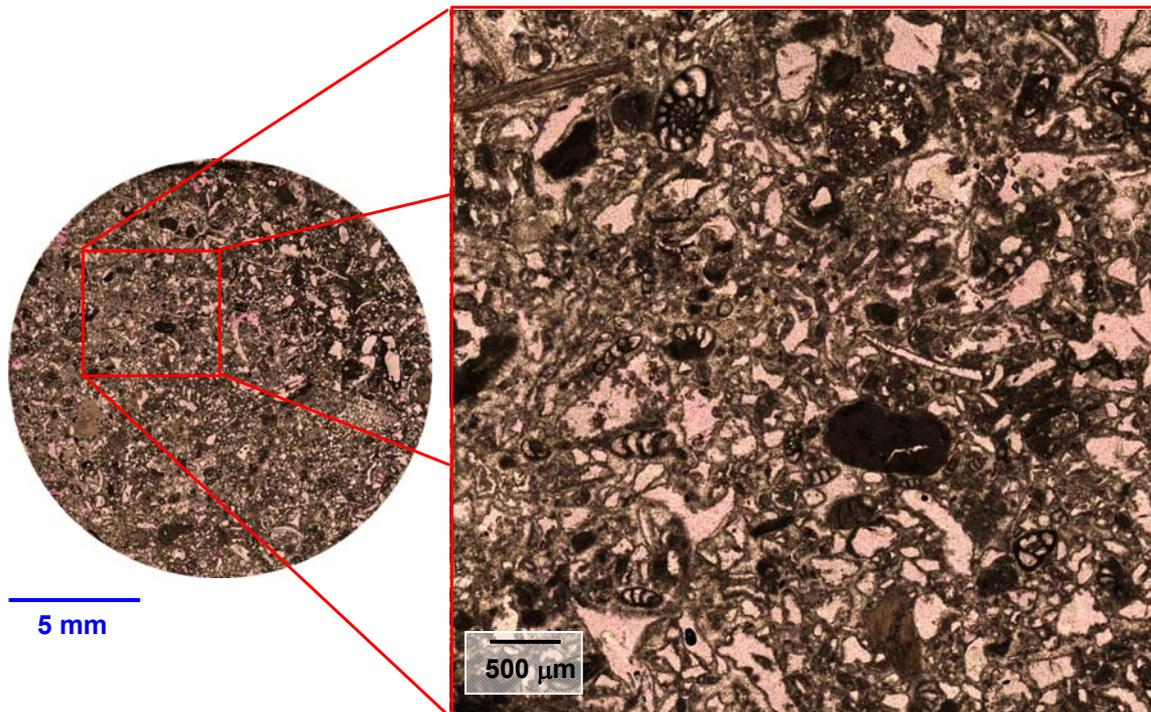


Figura 4.44.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-P. A esta escala de observación, junto a la presencia de restos de organismos milimétricos, destaca la presencia de huecos de tamaño milimétrico asociados a porosidad primaria de tipo intragranular e intergranular

Los fragmentos de granos esqueléticos (foraminíferos, gasterópodos, bivalvos, briozoos, corales y algas) se encuentran presentes en las dos calizas estudiadas (Figuras 4.45 a 4.47), si bien en la muestra MC2-O los procesos de recristalización (zona no dolomitizada) y recristalización-reemplazamiento (zona dolomitizada) hacen que en muchas zonas sea compleja la observación de la textura original de la caliza.

En la muestra MC2-P, junto a los organismos anteriormente citados se pueden observar con claridad la presencia de peloides, intraclastos y granos de cuarzo. En todos los casos, los tamaños de grano son inferiores a las 600-700 μm para los granos esqueléticos, peloides e intraclastos, y situados alrededor de 150-100 μm para los terrígenos localizados en la muestra MC2-P. Por su parte, las morfologías son las habituales en este tipo de componentes; subredondeadas para organismos con cámaras, peloides e intraclastos, elongadas para los restos de organismos con concha e irregulares para los terrígenos que en forma de cuarzo entraron en el sistema.

En ambas calizas la fase que aglomera estos organismos corresponde con un lodo carbonatado parcialmente recristalizado (microesparita), a lo que hay que sumar, en la muestra MC2-O la presencia de cemento de tipo drusa, tapizando parcialmente las paredes de algunos de los granos que delimitan los poros, y/o un cemento en mosaico a modo de grandes cristales de calcita que ocasionalmente rellena completamente dichos poros.

Estas calizas se pueden clasificar como calizas grainstone (Dunham, 1962) o como biomicritas (Folk, 1962).

En lo referente a la porosidad, ambas calizas muestran configuraciones completamente diferentes. La muestra MC2-O se caracteriza por la presencia de una porosidad fundamentalmente de tipo intramatricial, con morfologías muy irregulares, y con tamaños milimétricos a micrométricos en la zona no dolomitizada, que se incrementan notablemente en la zona dolomitizada, pasando a observarse poros de hasta varios centímetros (porosidad secundaria). Aunque con mucho menor desarrollo es posible apreciar también una porosidad secundaria de tipo móldica (Figuras 4.45 y 4.46).

En la muestra MC2-P, asociada al lodo microesparítico destaca la presencia de una importante porosidad intramatricial, dando lugar a una porosidad primaria importante (Figura 4.47). Sin embargo, aunque con tamaños de poro mucho menores, destaca igualmente la presencia de poros intragranulares en relación con las cámaras de los abundantes foraminíferos observados en esta caliza, algunos de ellos probablemente ocluidos (porosidad cerrada), así como frecuentes poros móldicos, una vez más asociados fundamentalmente a la disolución de las conchas de algunos moluscos.

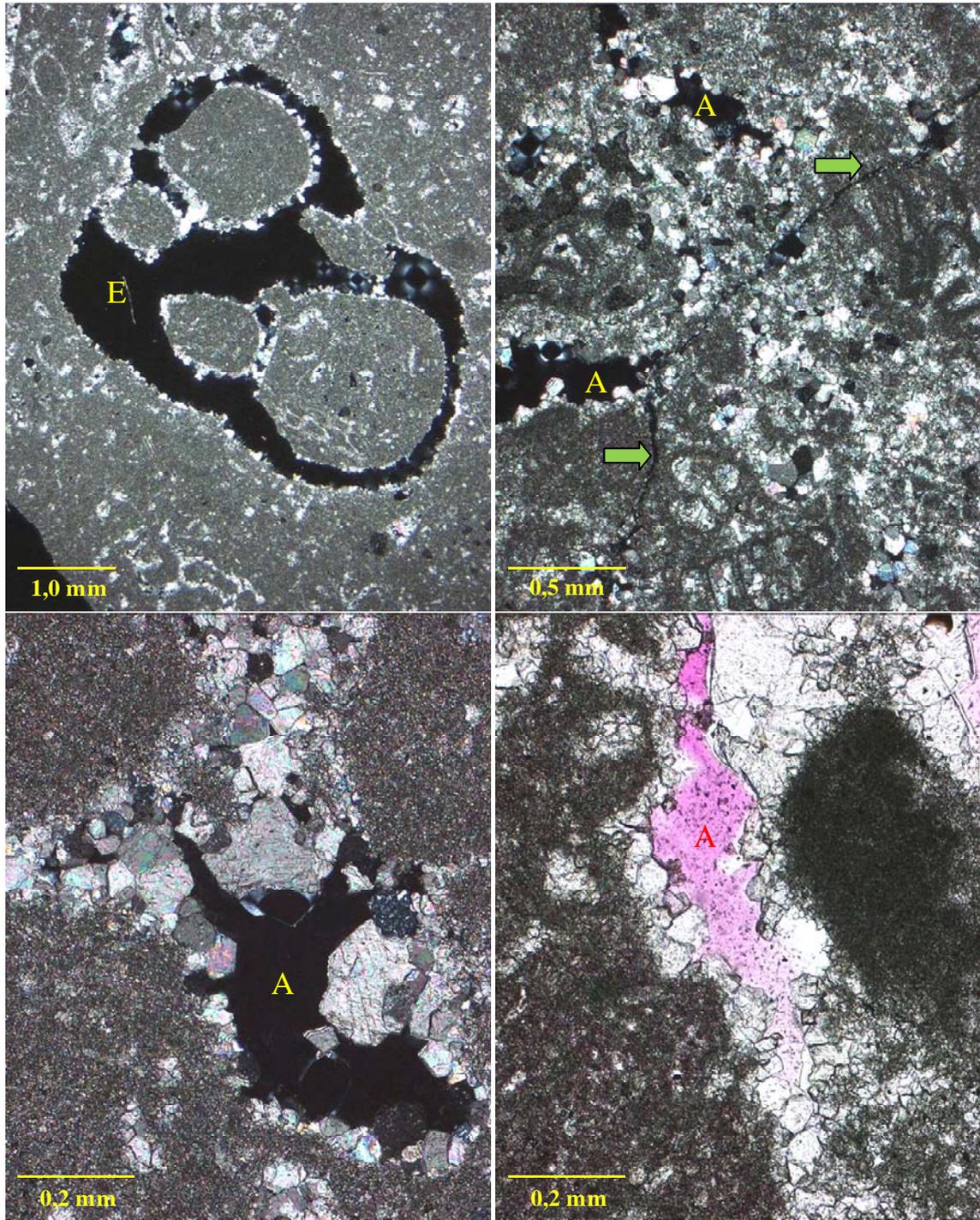


Figura 4.45.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la zona no dolomitizada del testigo de sondeo MC2-O correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (LE). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados y paralelos (micrografía inferior derecha) bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los 2 tipos de poros que de manera dominante aparecen en esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intramatricial (A) y porosidad secundaria de tipo móldica (E). Aunque de manera muy escasa es posible observar la presencia de pequeños canales (flecha verde).

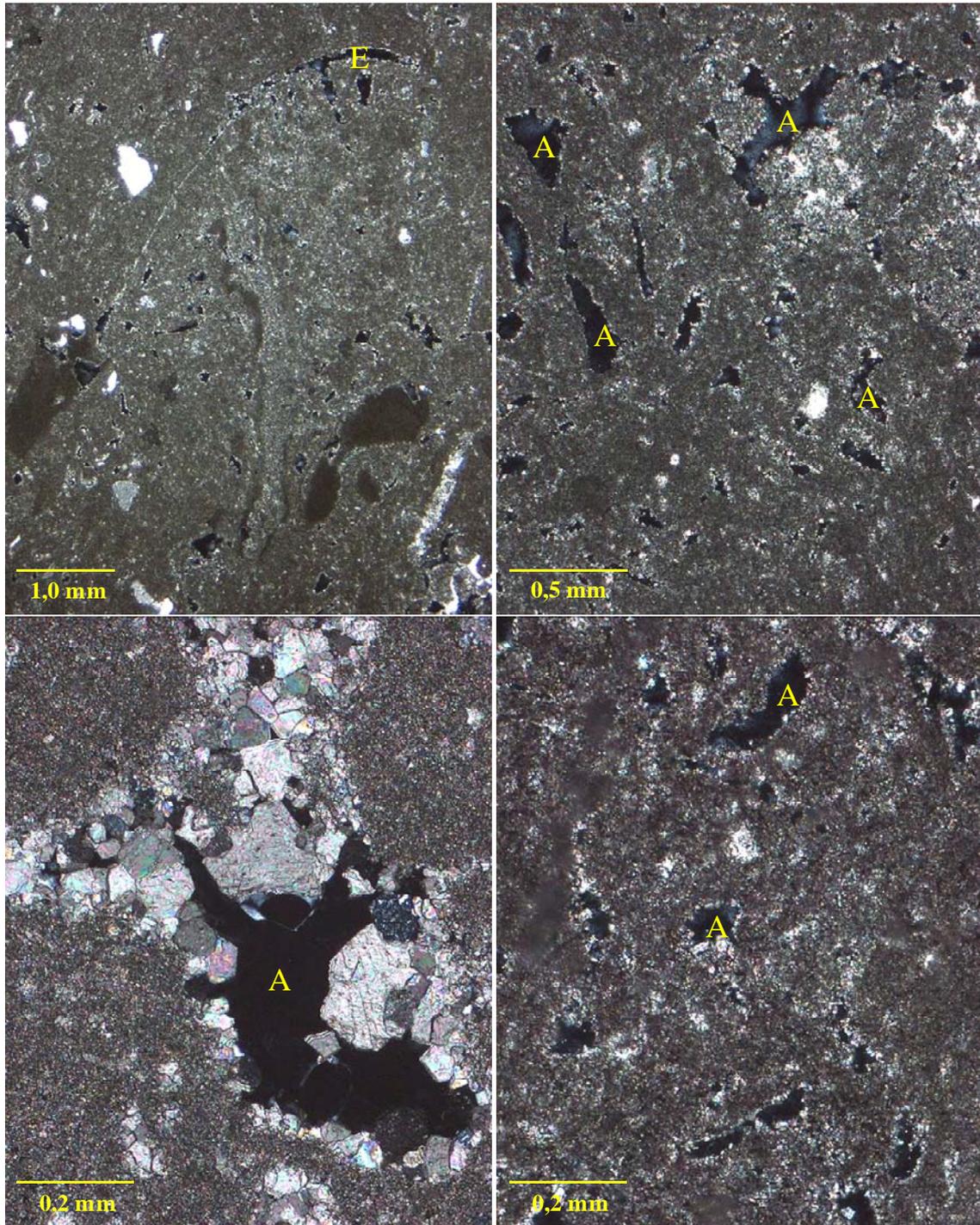


Figura 4.46.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la zona dolomitizada del testigo de sondeo MC2-O correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (LE). Observaciones llevadas a cabo con nicules cruzados bajo diferentes aumentos. Como en el caso anterior, las micrografías permiten observar con total claridad los 2 tipos de poros que de manera dominante aparecen es esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intramatricial (A) y porosidad secundaria de tipo móldica (E).

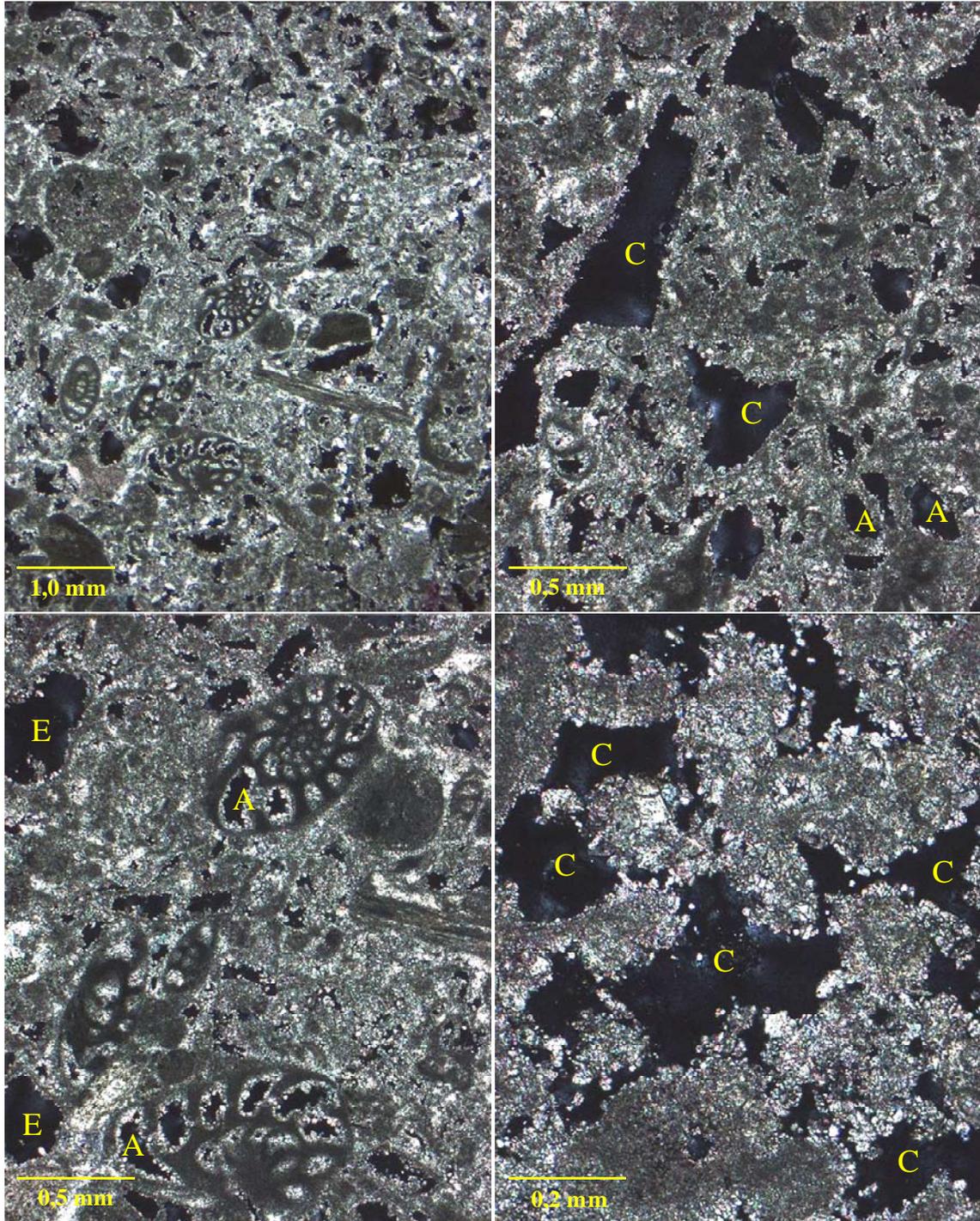


Figura 4.47.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-P correspondiente al tramo inferior del lagoon externo (LE). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intragranular (A) e intramatricial (C), y porosidad secundaria de tipo móldica (E).

✚ Parche arrecifal (PA): interrumpiendo el lagoon externo de la plataforma carbonatada, este parche arrecifal, de una potencia próxima a los 9 m, aparece representado mayoritariamente por calizas bioconstruidas con texturas framestone (MC2-K; MC2-L), dentro de las cuales es posible apreciar la presencia de 2 pequeñas intercalaciones decimétricas de calizas con texturas bindstone. El aspecto macroscópico de las dos calizas muestreadas aparece recogido en la figura 4.48.

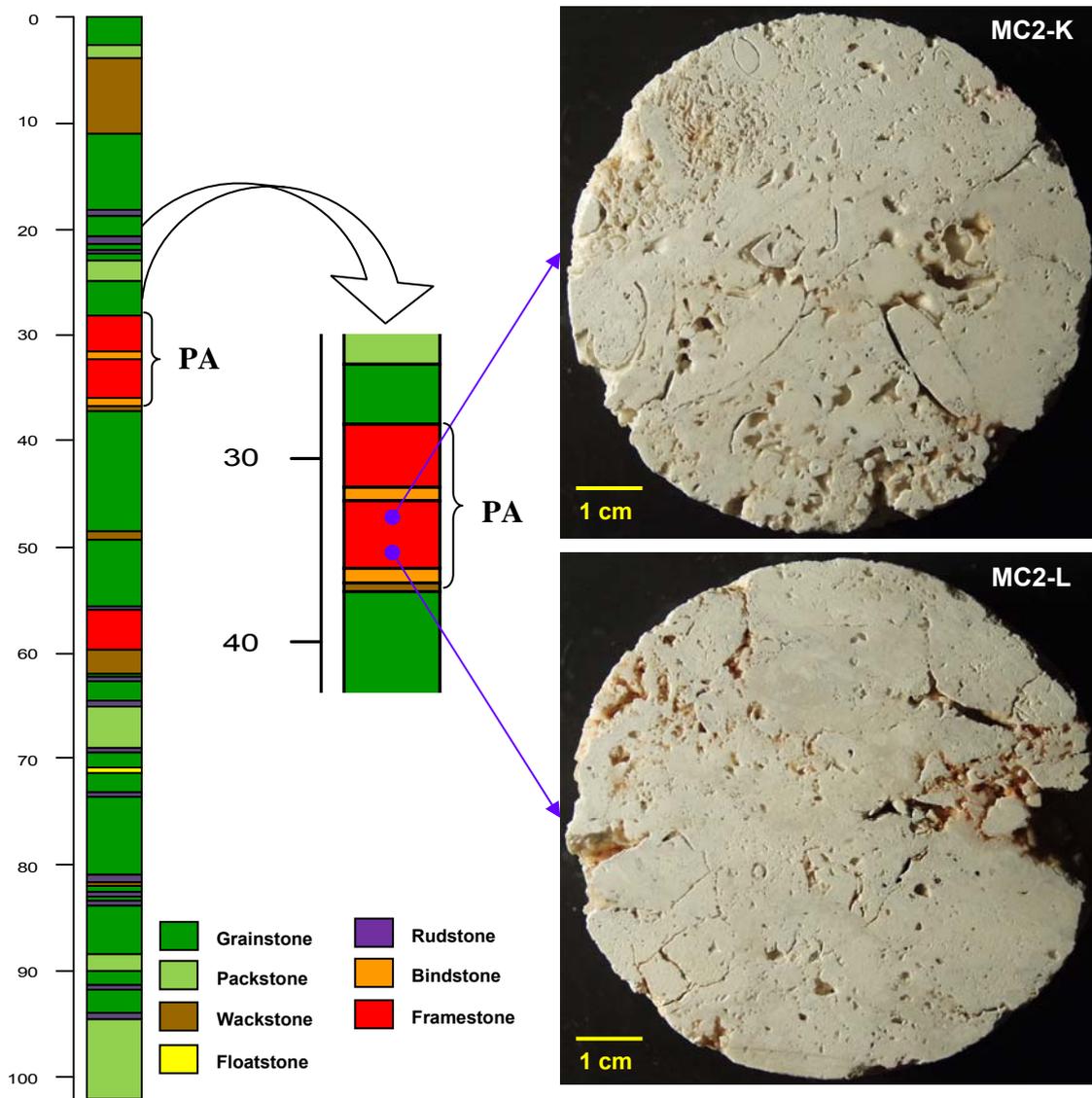


Figura 4.48.- Aspecto macroscópico de las dos calizas muestreadas dentro del tramo correspondiente con parche arrecifal (PA) localizado dentro del sondeo MC2. Secciones macroscópicas pertenecientes a las muestras MC2-K (arriba) y MC2-L (abajo) respectivamente. En ambos casos, las imágenes corresponden a superficies en corte de sierra de los testigos, realizadas perpendiculares al eje del sondeo.

Las dos muestra estudiadas MC2-K y MC2-L corresponden con calizas bioconstruidas (Figura 4.49), donde los corales que inicialmente construyeron el armazón rígido, posteriormente son fosilizados por rellenos de lodos micríticos y restos orgánicos (rodolitos, gasterópodos y foraminíferos) permitiendo así la preservación del esqueleto de la bioconstrucción. Corresponderían con calizas framestone (James, 1984).

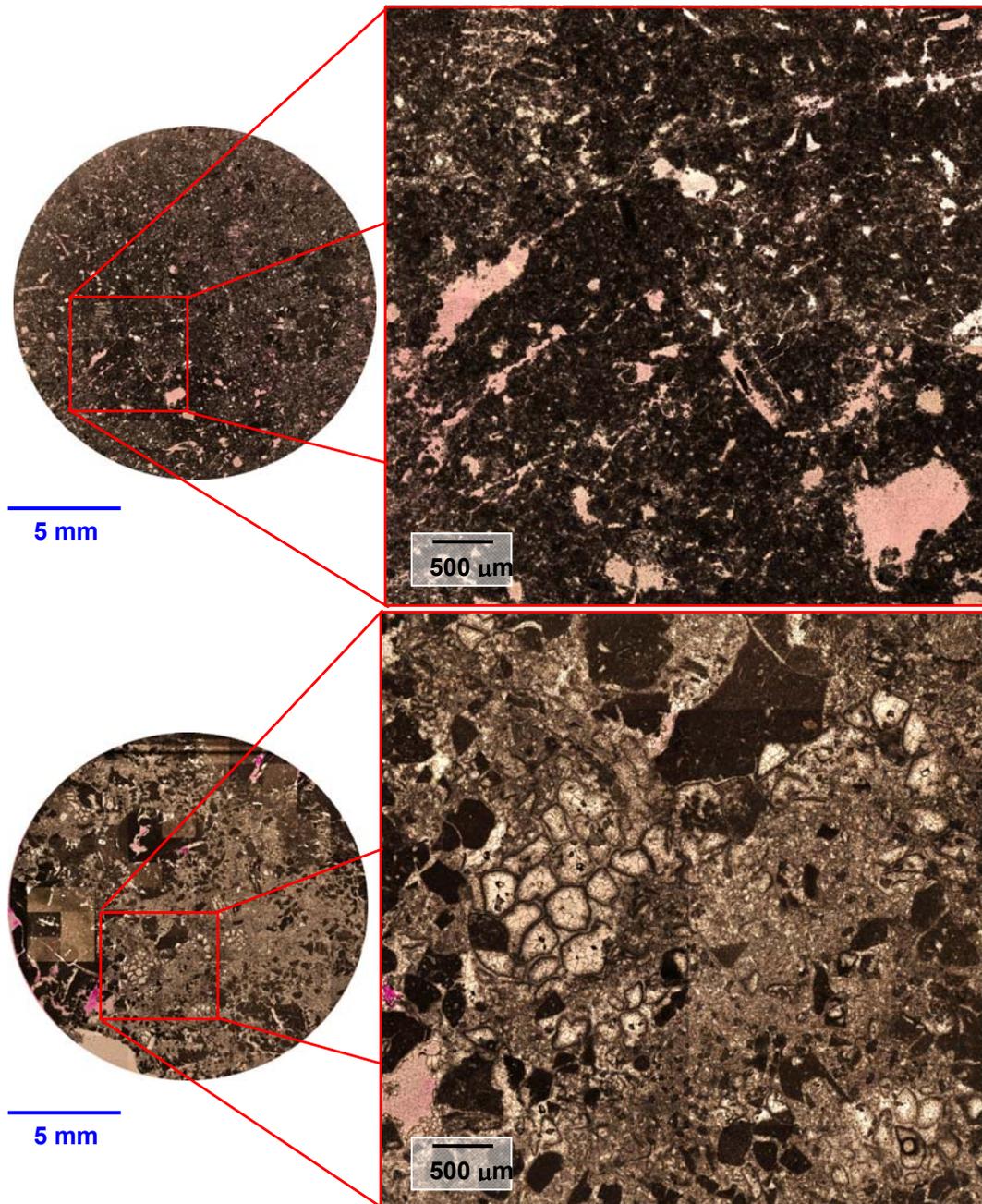


Figura 4.49.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de dos de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas de los testigos de sondeo MC2-K (arriba) y MC2-L (abajo). Arriba; lámina delgada asociada a una zona de la muestra MC2-K donde aparece el relleno micrítico que fosiliza la estructura coralina. Abajo; lámina delgada asociada a una zona de la muestra MC2-L donde se interseca la bioconstrucción.

La porosidad asociada a este tipo de rocas bioconstruidas es compleja. Por un lado, se puede apreciar una porosidad de bioconstrucción “growth-framework”. Son poros presentes en las rocas bioconstruidas –generadas in situ– constituidos por las cámaras y huecos dejados por los organismos durante su crecimiento (Figura 4.50).

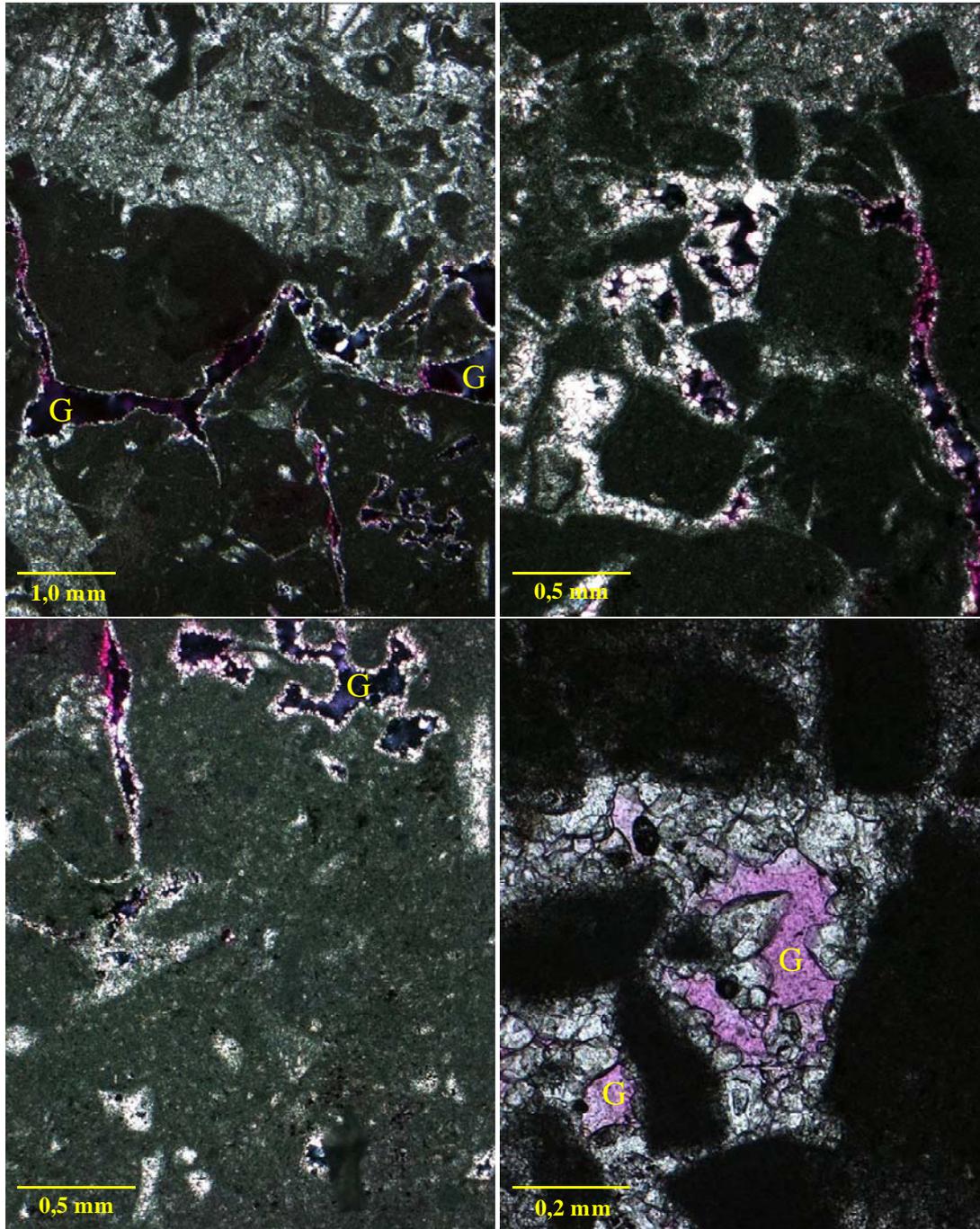


Figura 4.50.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-L correspondiente al parche arrecifal (PA). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad la porosidad de bioconstrucción que domina en este caliza arrecifal (G).

En segundo término la roca muestra una porosidad asociada al relleno sedimentario que fosiliza la estructura arrecifal. Ésta viene condicionada por el tipo de relleno, que en esta caliza, da lugar a una importante porosidad intramatricial (A) ligada al fango carbonatado y una porosidad móldica asociada a los organismos (Figura 4.51).

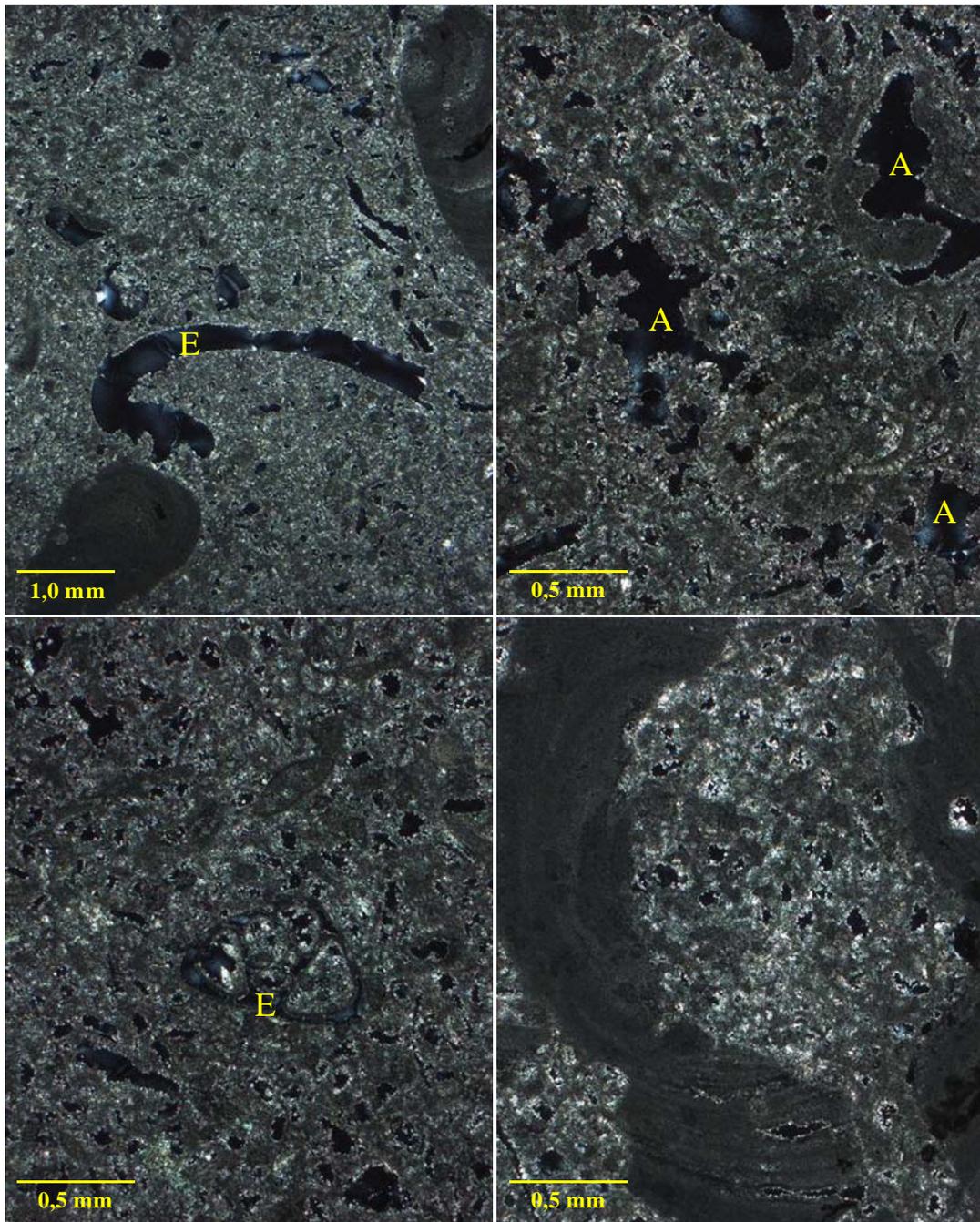


Figura 4.51.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-K correspondiente al parche arrecifal (PA). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad la porosidad asociada al relleno de la bioconstrucción, donde domina la porosidad intramatricial (A) y la porosidad móldica (E). En menor medida se observa porosidad intragranular y de perforación, asociada esta última a las algas rojas (rodolitos).

✚ Barrera coralina (BC): con unos 4 m de potencia la barrera coralina presente en la plataforma arrecifal de Lluçmajor, aparece representada por calizas bioconstruidas con marcadas texturas framestone (MC2-R). El aspecto macroscópico de la caliza muestreada aparece recogido en la figura 4.52.

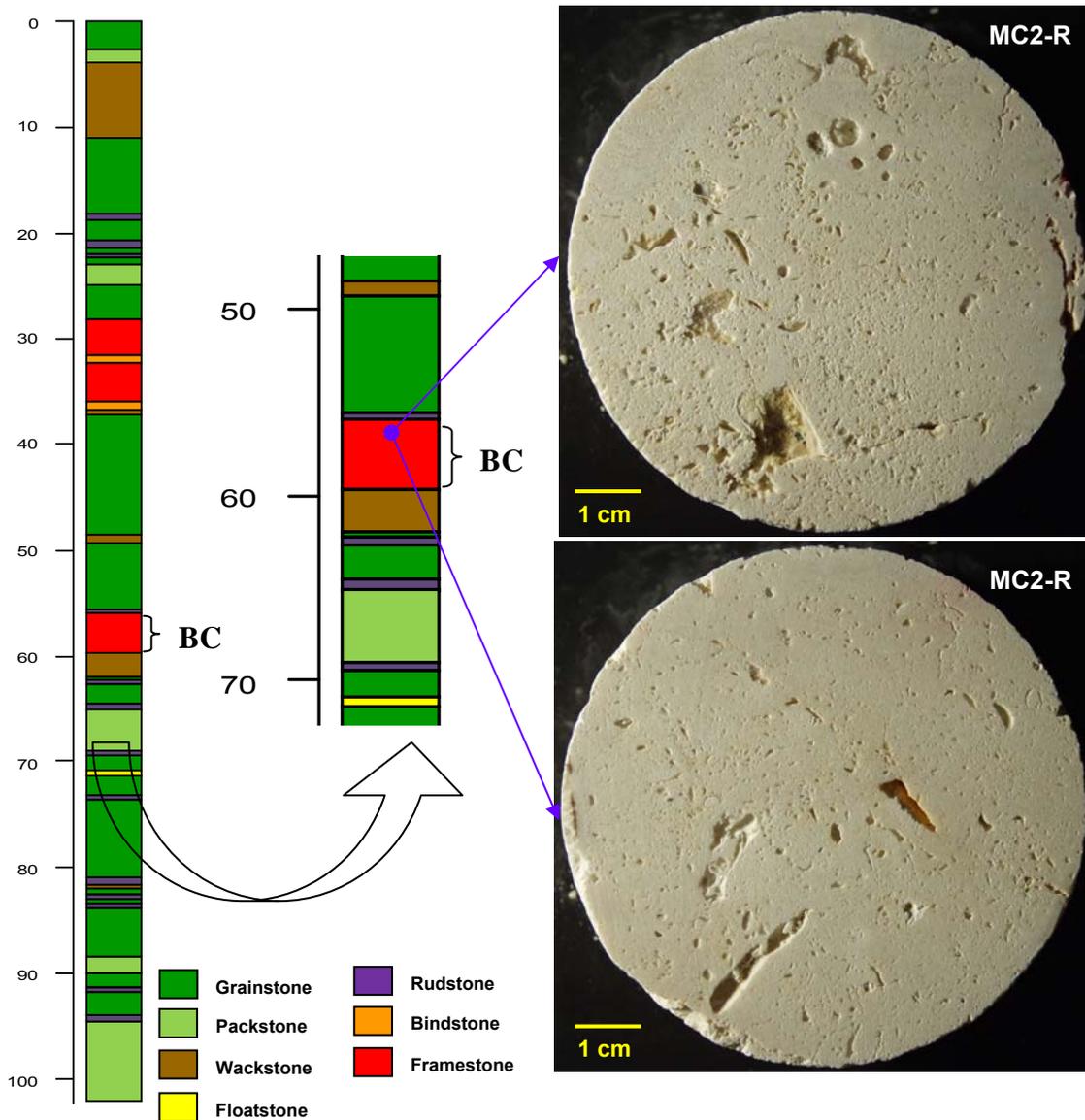


Figura 4.52.- Aspecto macroscópico de la caliza muestreada dentro del tramo correspondiente con la barrera coralina (BC) localizado dentro del sondeo MC2. Secciones macroscópicas pertenecientes a las muestra MC2-R. En ambos casos, las imágenes corresponden a superficies en corte de sierra de los testigos, realizadas perpendiculares al eje del sondeo.

La muestra MC2-R, al igual que las muestras MC2-K y MC2-L anteriormente descritas, corresponde con una caliza bioconstruida (Figura 4.53), donde los corales construyeron el armazón rígido, que posteriormente fue fosilizado por lodos micríticos y restos de organismos (gasterópodos, bivalvos y foraminíferos relleno el armazón de coral y permitiendo su preservación. Correspondería con una caliza framestone (James, 1984).

Como en el caso anterior, la porosidad asociada a este tipo de rocas bioconstruidas es compleja. Por un lado, se puede apreciar una porosidad de bioconstrucción “growth-framework”. Son poros presentes en las rocas bioconstruidas –generadas in situ– constituidos por las cámaras y huecos dejados por los organismos durante su crecimiento (Figura 4.54). En segundo término la roca muestra una porosidad asociada al relleno sedimentario que fosiliza la estructura arrecifal. Ésta viene condicionada por el tipo de relleno, que en esta caliza, da lugar a una importante porosidad intramatricial (A) ligada al fango carbonatado y una porosidad móldica asociada a los abundantes organismos presentes (Figura 4.54).

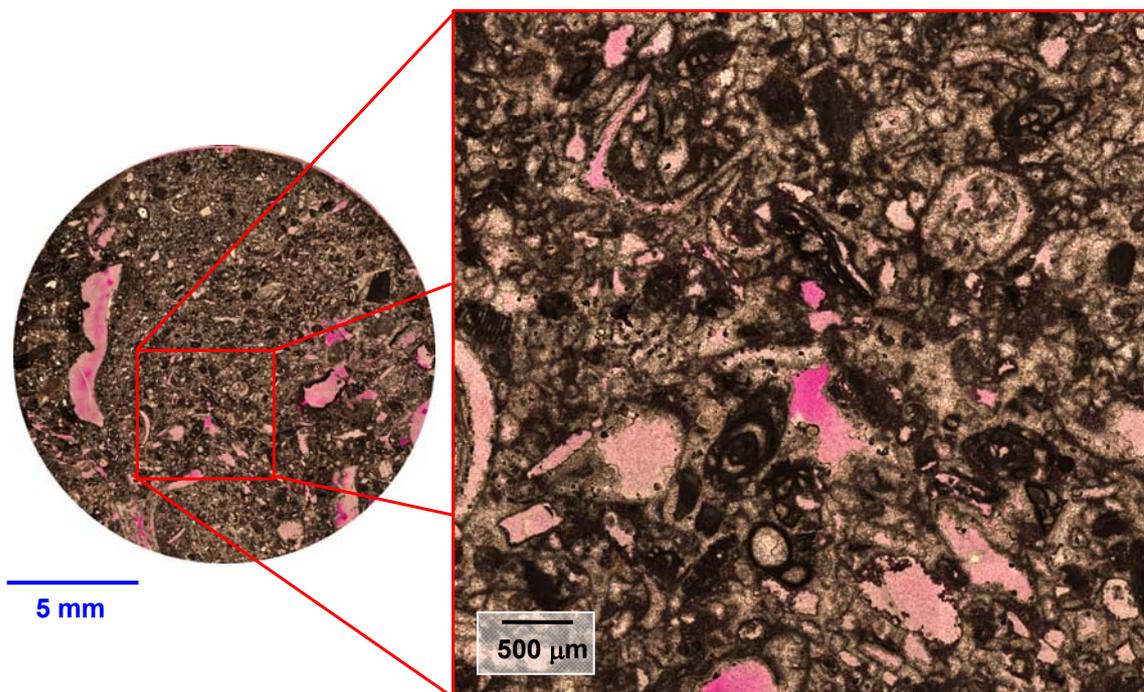


Figura 4.53.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-R. A esta escala de observación ya es posible apreciar la importante porosidad primaria presente en esta caliza, tanto a modo de porosidad de bioconstrucción como en forma de porosidad intramatricial. Igualmente es posible apreciar a esta escala porosidad secundaria de tipo móldica.

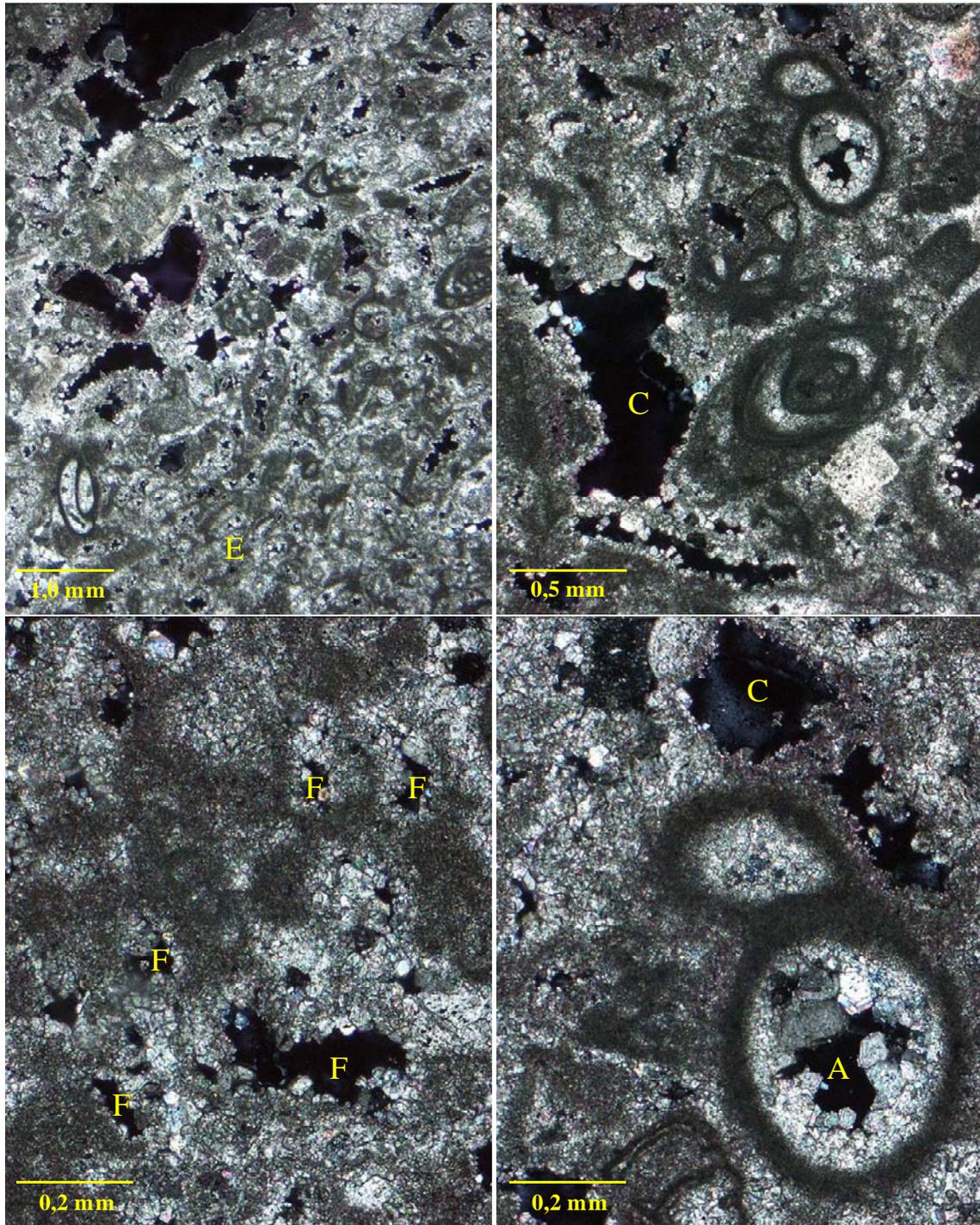


Figura 4.54.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-R correspondiente a la barrera coralina (BC). Observaciones llevadas a cabo con nicóles cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intragranular (A), intramatricial (C), y de bioconstrucción (F).

✚ Talud proximal (TP): constituye la litofacies de mayor potencia (28,5 m aproximadamente) y variabilidad textural. Aunque una vez más, predominan las

calizas con texturas grainstone (MC2-V; MC2-Y), destaca a techo la presencia de un nivel de calizas wackstone de algo más de 2 m de potencia (MC2-T) y naturaleza dolomítica. Destaca también por su potencia (4 m. aproximadamente) la presencia de un nivel de calizas packstone, así como numerosas intercalaciones de escasa entidad (30-50 cm), representadas principalmente por calizas con texturas rudstone (MC2-ρ) y escasas pasadas de calizas floatstone. El aspecto macroscópico de estas calizas aparece recogido en la figura 4.55.

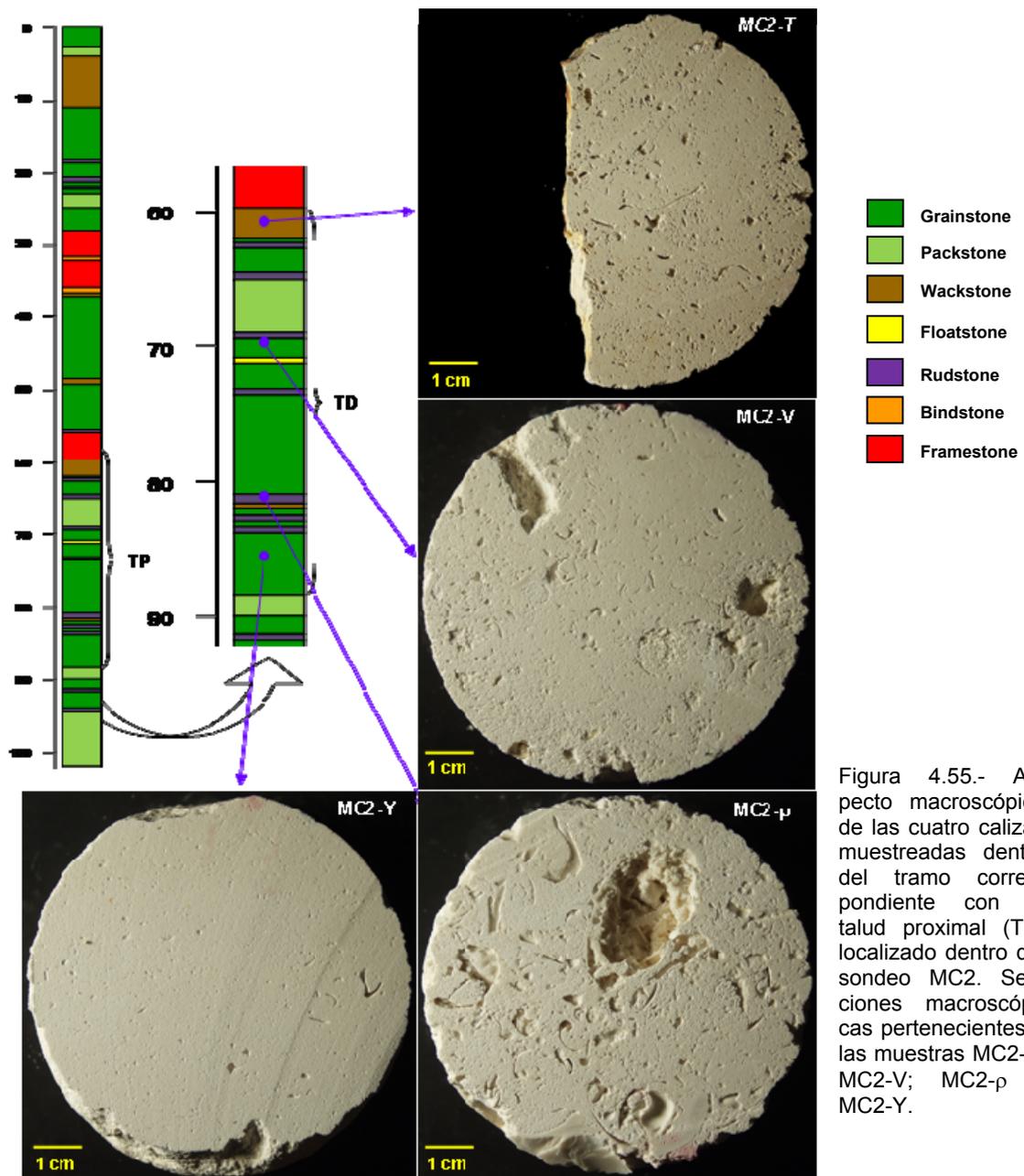


Figura 4.55.- Aspecto macroscópico de las cuatro calizas muestreadas dentro del tramo correspondiente con el talud proximal (TP) localizado dentro del sondeo MC2. Secciones macroscópicas pertenecientes a las muestras MC2-T; MC2-V; MC2-ρ y MC2-Y.

Las muestras MC2-T, MC2-V y MC2-Y corresponden con tres calizas fosilíferas con textura granosoportadas (Figuras 4.56 y 4.57), aunque tanto macroscópica como microscópicamente presentan diferencias en cuanto a tipo, tamaño, porcentaje y distribución tanto de los granos esqueléticos como de su porosidad, fundamentalmente en relación con la muestra MC2-T, que además se encuentra afectada por un importante proceso de reemplazamiento por dolomitización.

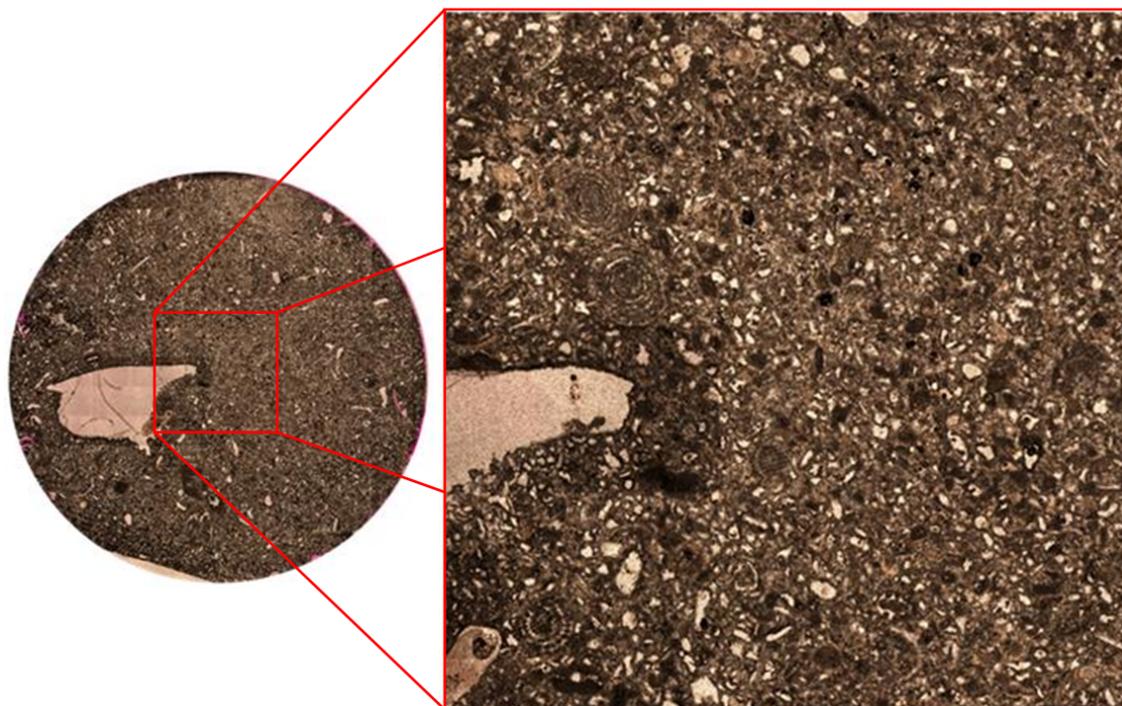


Figura 4.56.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-T. A esta escala de observación ya es posible apreciar la importante porosidad primaria presente en esta caliza, tanto a modo de porosidad de bioconstrucción como en forma de porosidad intramatricial. Igualmente es posible apreciar a esta escala porosidad secundaria de tipo móldica.

La muestra MC2-T corresponde con una caliza parcialmente dolomitizada, marcada en muchas zonas por la presencia de una textura cristalina asociada a los procesos de reemplazamiento sufridos por la roca durante la diagénesis, sobreimpuesta a la textura granosoportada original de la roca, (Figura 4.58). En las zonas donde la textura relicta es aún observable, destaca la presencia de foraminíferos (250-600 μm), junto a escasos fragmentos de gasterópodos, bivalvos, algas y peloides, etc., con tamaños en todos los casos inferiores a las 200 μm (Figura 4.58).

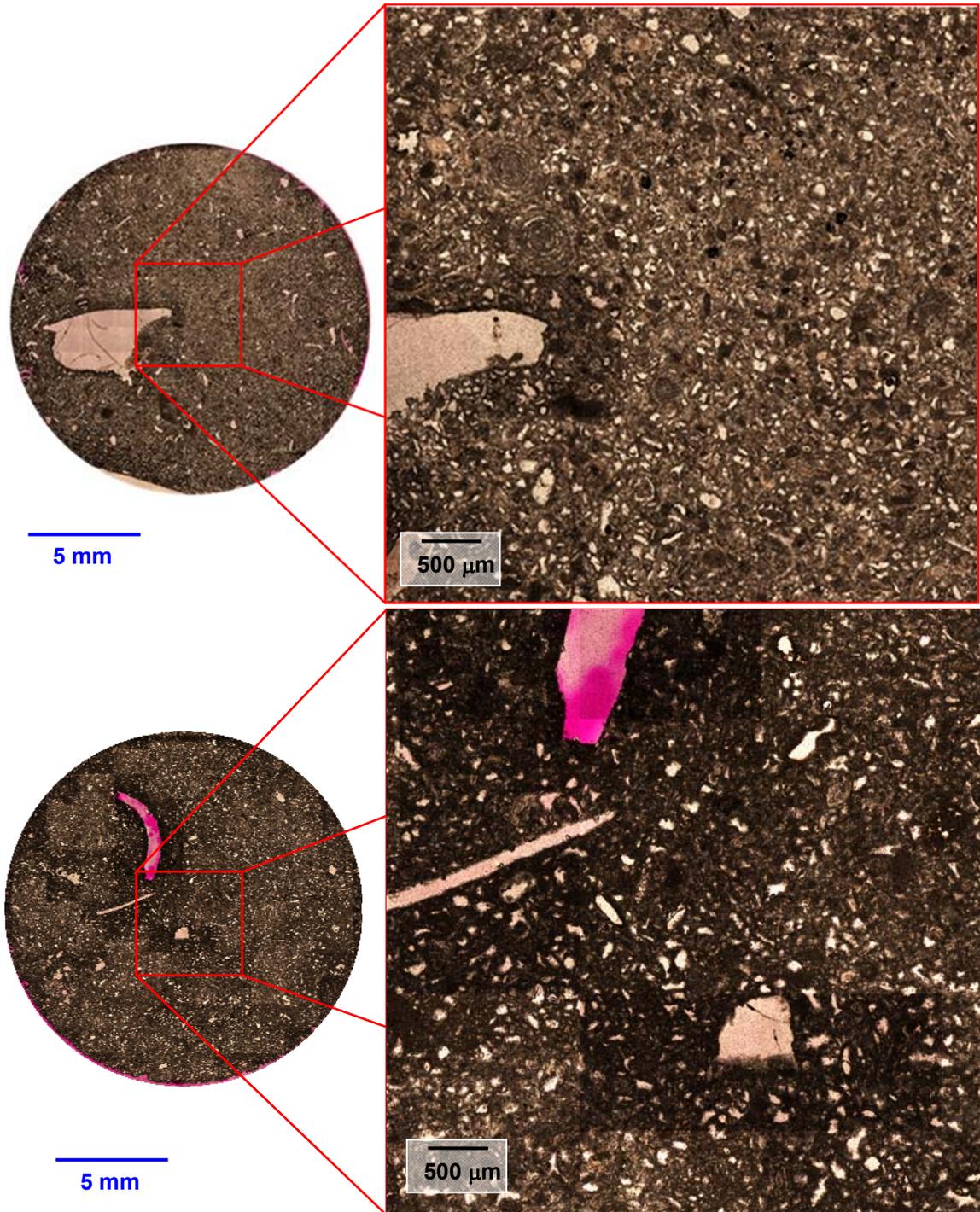


Figura 4.57.- Aspecto macroscópico de dos de las calizas muestreadas dentro del tramo correspondiente con el talud proximal (TP) localizado dentro del sondeo MC2. Secciones macroscópicas pertenecientes a las muestras MC2-V (arriba) y MC2-Y (abajo) respectivamente. En ambos casos, las imágenes corresponden a superficies en corte de sierra de los testigos, realizadas perpendiculares al eje del sondeo.

Los foraminíferos se encuentran presentes en las otras dos calizas citadas (Figuras 4.59 y 4.60), representando el grano esquelético más abundante de la muestra MC2-V

donde llegan a alcanzar las 500 μm de diámetro, junto a gasterópodos, peloides, restos de algas y moldes de bivalvos, éstos últimos abundantes en la muestra MC2-Y, donde incluso llegan a alcanzar 1 cm de longitud. En general, tanto el tamaño medio como el porcentaje de granos presentes es ligeramente mayor en la caliza MC2-V, siendo también un elemento distintivo la presencia de aproximadamente un 1 % de granos de cuarzo de pequeño tamaño. Una vez más, dentro de los granos esqueléticos, foraminíferos y gasterópodos, junto a los peloides muestran morfologías subredondeadas a globulares. Los fragmentos de conchas muestran morfologías elongadas.

En lo referente a la fase que aglomera estos organismos, cabe mencionar la presencia en la muestra MC2-T de un lodo carbonatado micrítico, puntualmente recristalizado a microesparita, y parcialmente reemplazado por dolomita. Las otras dos calizas, se caracterizan por presentar un importante proceso de recristalización sobreimpuesta a la textura original de la roca, lo que se traduce en la presencia de microesparita como fase aglomerante de los granos presentes. Este fenómeno de recristalización aparece más desarrollado en la muestra MC2-Y, lo que unido a un fenómeno de escasa importancia de dolomitización, se traduce en una textura relictiva difícilmente observable.

En las tres calizas granosoportadas analizadas dentro del talud proximal, destaca la presencia de una importante porosidad secundaria de tipo intercrystalina, de gran relevancia en las muestras MC2-T y MC2-Y, favorecida por el proceso de reemplazamiento de cristales de calcita por dolomita. Igualmente, en menor porcentaje se observa una porosidad primaria intragranular (asociada a las cámaras de los foraminíferos), intramatricial (en las zonas con textura relictiva con lodo carbonatado), y en menor medida, móldica por disolución de los fragmentos de conchas. La porosidad secundaria, a modo de porosidad móldica por disolución de fragmentos de conchas es destacable en la caliza MC2-V, aunque en menor o mayor grado se reproduce en las tres calizas (Figuras 4.58 a 4.60).

La primera de las calizas estudiadas (MC2-T) se clasificaría como caliza wackstone a packstone (según las diferentes secciones observadas), mientras que las otras dos (MC2-Y; MC2-V) corresponderían con calizas grainstone (Dunham, 1962). Por su

parte, utilizando la clasificación de Folk (1962) las tres calizas se clasificarían como biomicritas.

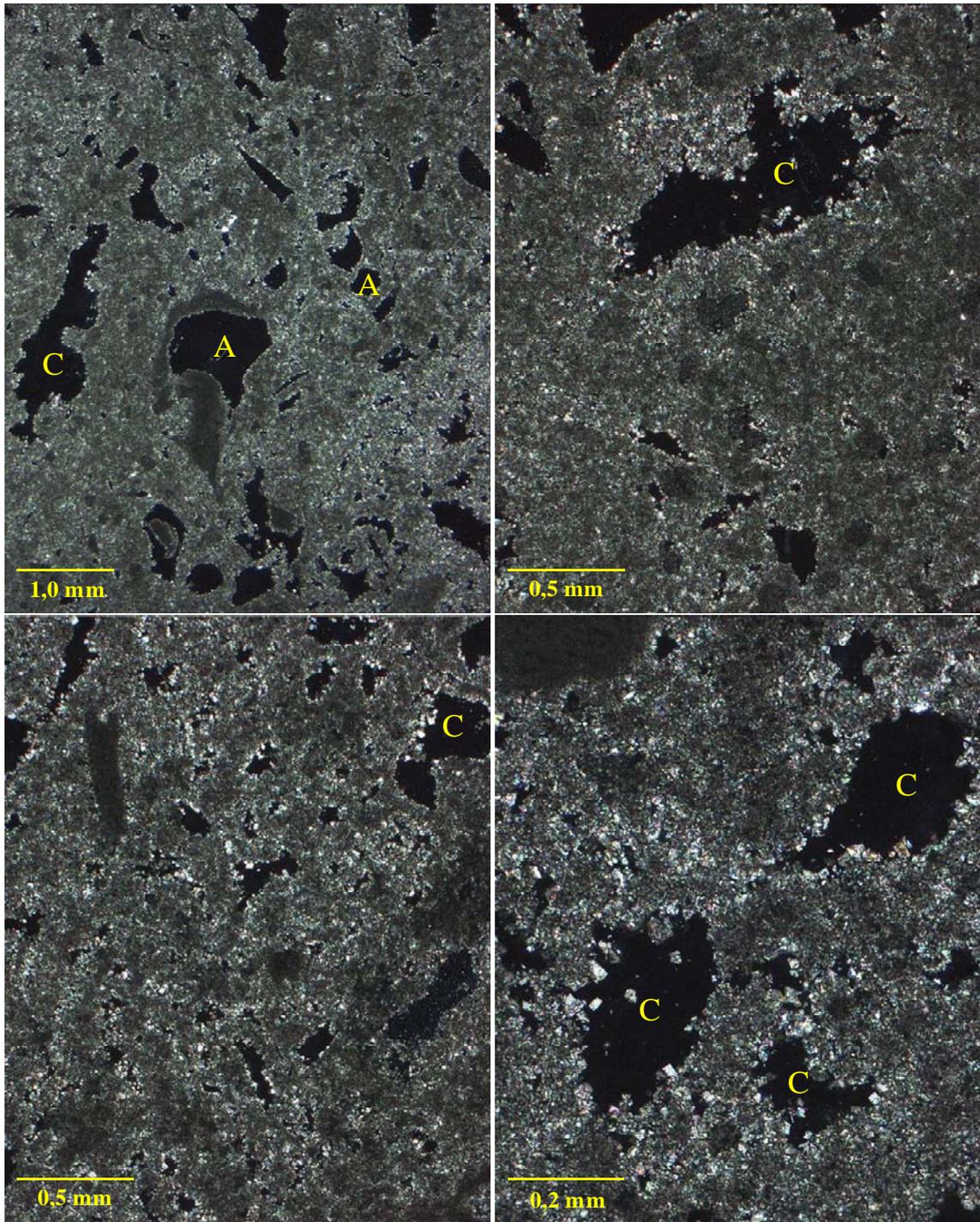


Figura 4.58.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-T correspondiente al talud proximal (TD). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intragranular (A) e intramatricial (C) fundamentalmente.

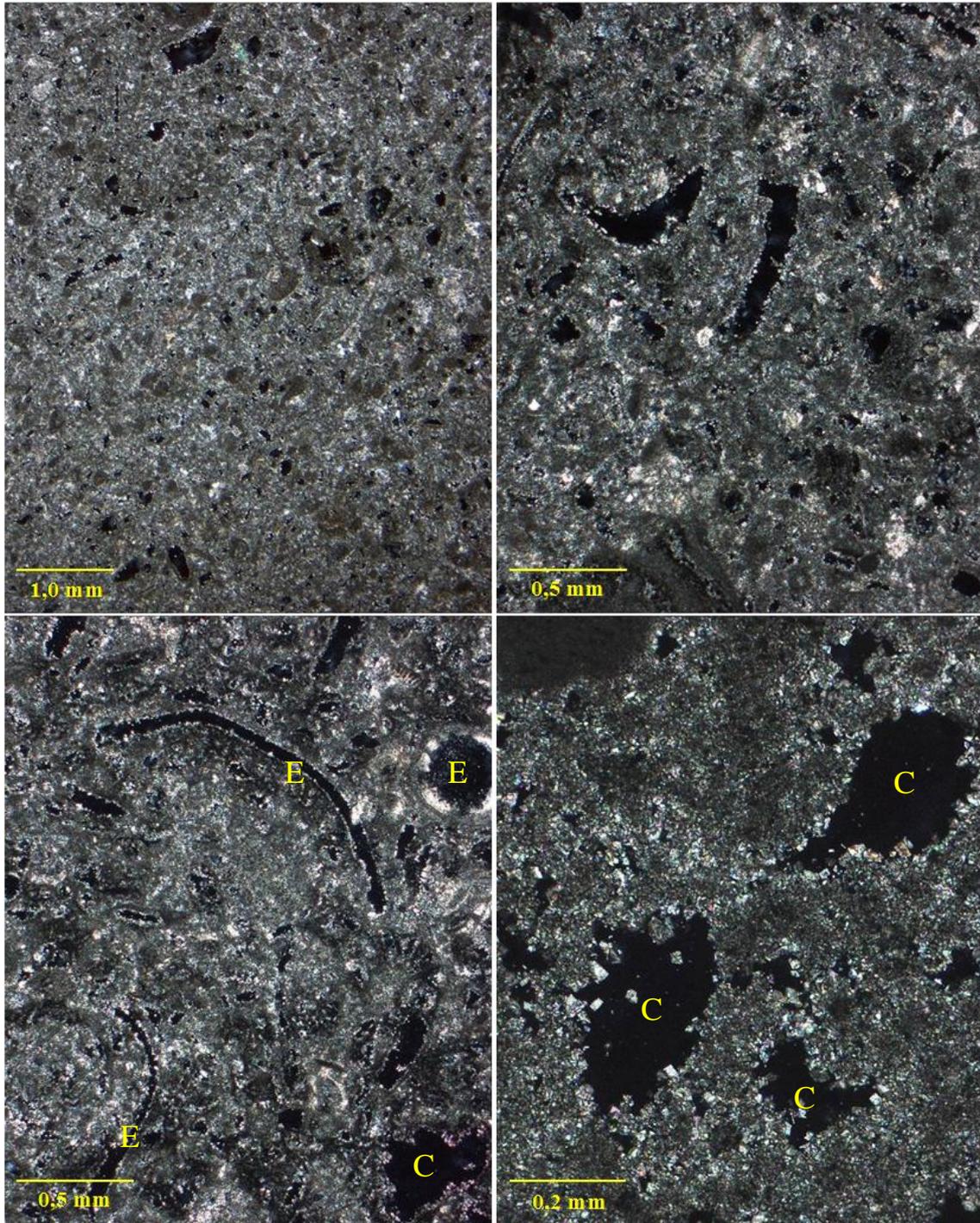


Figura 4.59.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-V correspondiente al talud proximal (TD). Observaciones llevadas a cabo con nicoles cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intramatricial (C) y secundaria de tipo móldica fundamentalmente €.

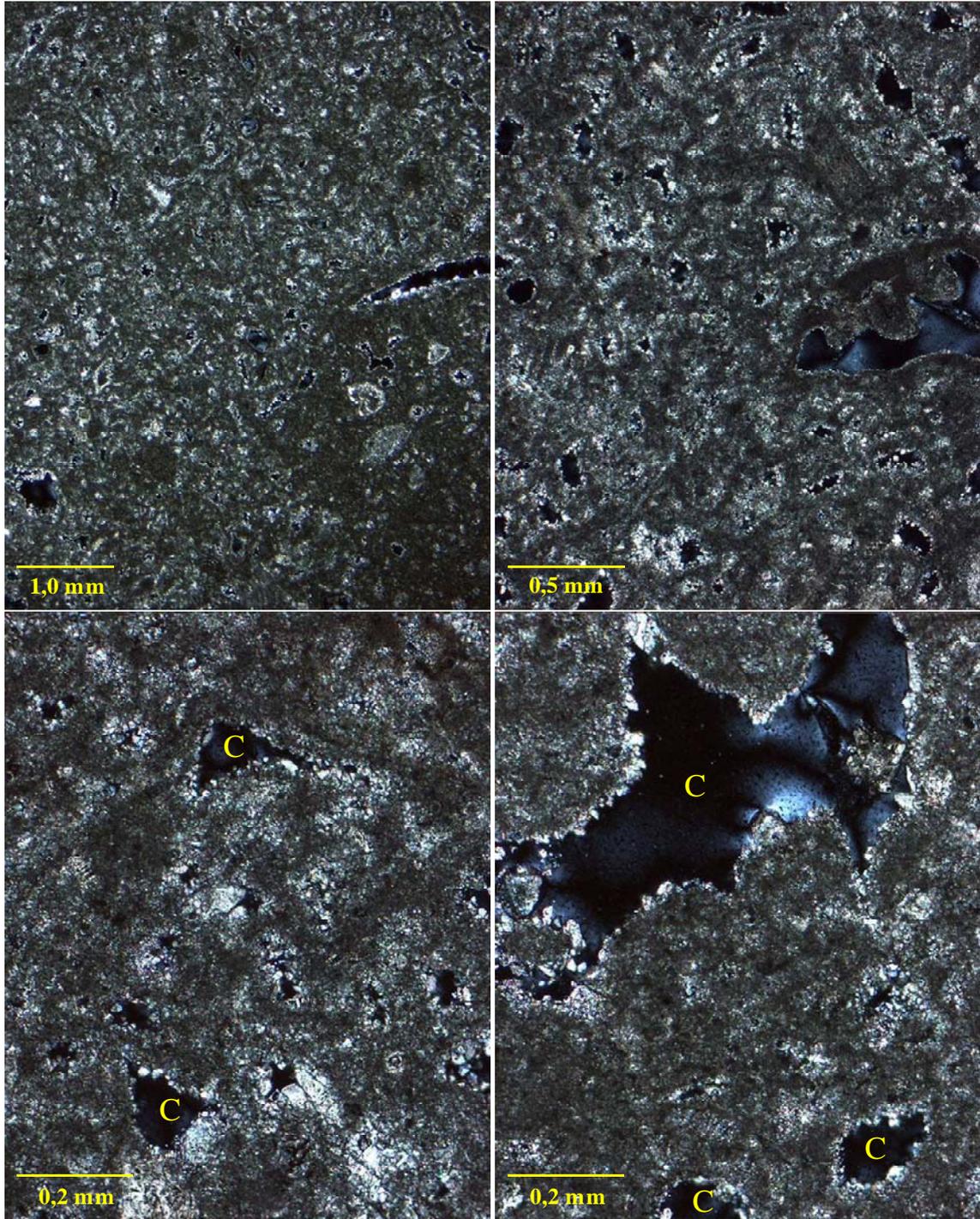


Figura 4.60.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-Y correspondiente al talud proximal (TD). Observaciones llevadas a cabo con nicols cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera; porosidad primaria de tipo intramatricial (C) fundamentalmente.

La muestra MC2-ρ corresponde con una caliza fosilífera con textura rudstone (Figura 4.61), con fragmentos de ostreidos, gasterópodos, corales y moldes de bivalvos milimétricos a centimétricos soportados por otros (foraminíferos, gasterópodos, bivalvos, peloides e intraclastos) de tamaño homométrico (150-300 μm). Destaca también la presencia de un cemento microesparítico-esparítico en mosaico. En conjunto, las morfologías observadas son predominantemente subredondeadas, exceptuando los fragmentos de conchas con morfologías más elongadas (Figura 4.65). Correspondería con una caliza rudstone (James, 1984) o una biomicrita (Folk, 1962).

Se aprecia una importante porosidad primaria asociada fundamentalmente a las cámaras de los organismos (intragranular), a los intersticios entre granos (intergranular y/o de protección “shelter”) y al cementos carbonatado (intramatricial). Igualmente, se puede apreciar en los ostreidos porosidad de perforación, parcialmente rellena de lodo carbonatado. La porosidad secundaria ligada a los fragmentos fósiles es también muy relevante (porosidad móldica), relacionada con disolución selectiva de los granos en etapas más o menos tempranas de la diagénesis (Figura 4.62).

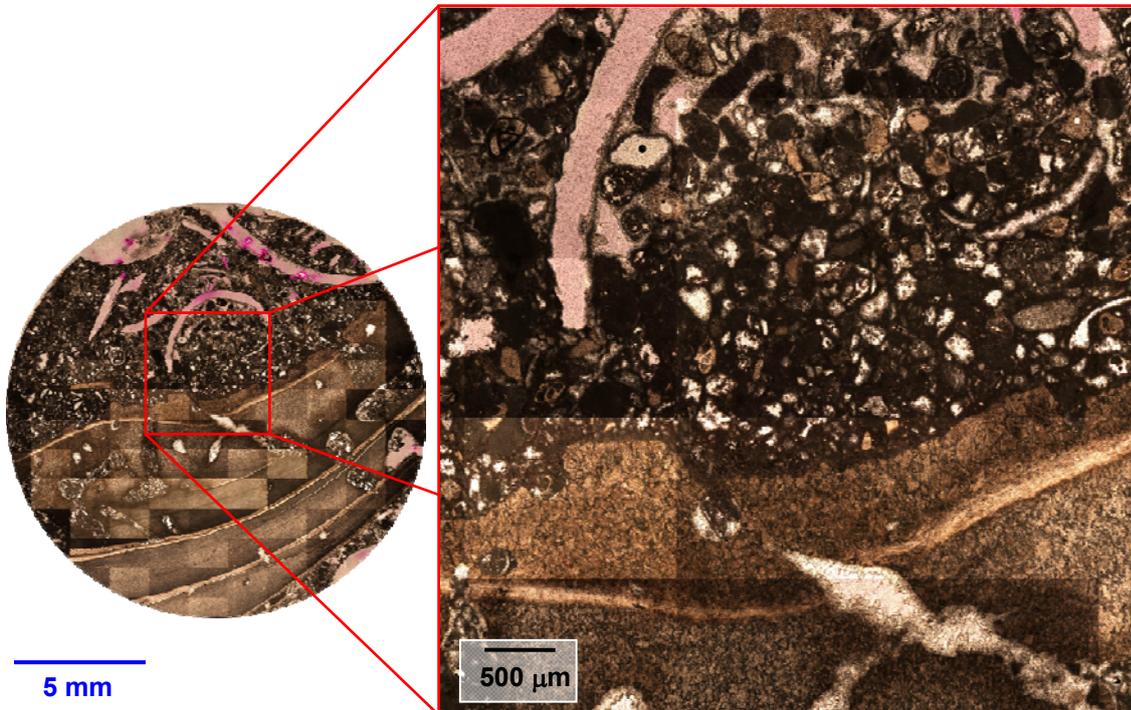


Figura 4.61.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-ρ. A esta escala de observación, junto a la presencia de restos de organismos centimétricos, destaca la presencia de huecos de tamaño milimétrico a centimétrico asociados a porosidad móldica.

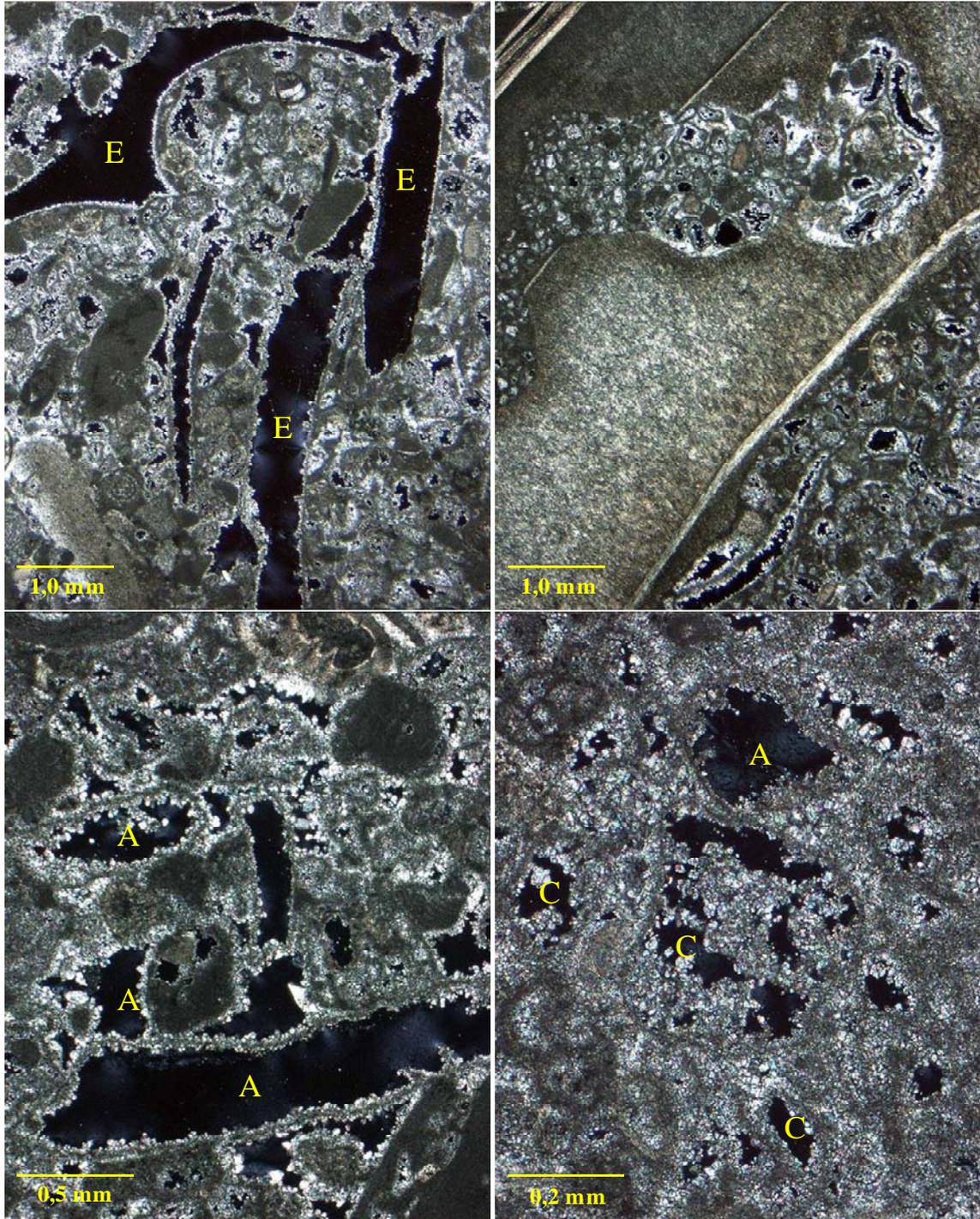


Figura 4.62.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-ρ correspondiente al talud proximal (TP). Observaciones llevadas a cabo con nicotes cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los diferentes tipos de poros asociados a esta caliza fosilífera. La porosidad primaria de tipo intragranular (A) e intramatricial (C) son fácilmente identificados a esta escala de observación. Igualmente, destaca la presencia de una importante porosidad secundaria a modo de porosidad móldica (E).

✚ Talud distal (TP): la potencia atravesada para esta litofacies por el sondeo MC2 antes de la interrupción del mismo se sitúa alrededor de 14 m, aunque en alguno de los sondeos adyacentes (Figura 2.8) se han alcanzado potencias superiores a los 30 m. A diferencia de las litofacies anteriormente descritas, en el sondeo MC2, y para la parte perforada de la litofacies, predominan las calizas packstone sobre las demás texturas (MC2-Z). No obstante destaca en la mitad superior, la presencia de un nivel métrico de calizas grainstone, intercalada a su vez por 2-3 pasadas de calizas con texturas rudstone de orden decimétrico (50-70 cm). El aspecto macroscópico de estas calizas aparece recogido en la figura 4.63.

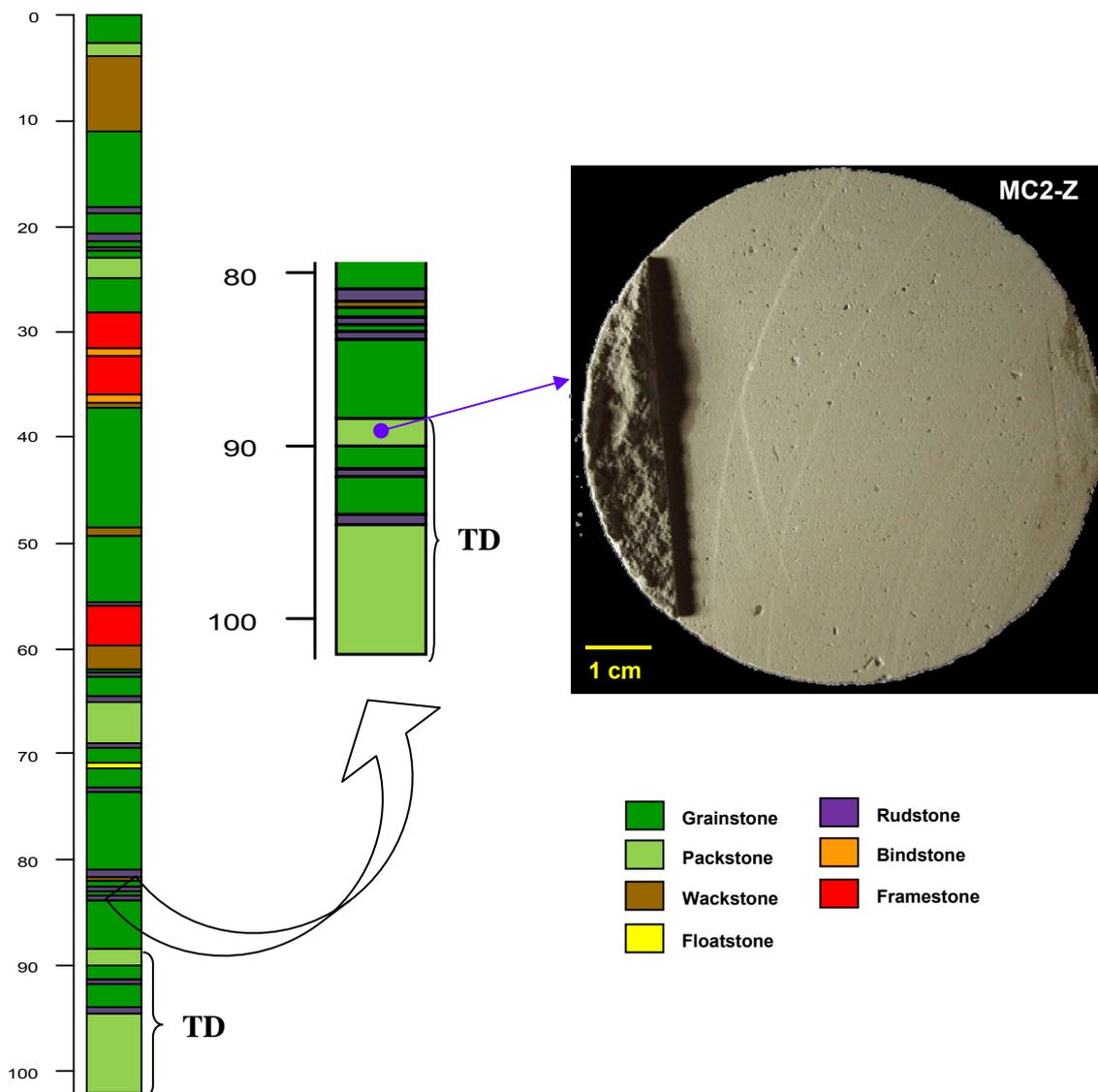


Figura 4.63.- Aspecto macroscópico de la caliza muestreada dentro del tramo correspondiente con el talud distal (TD) localizado dentro del sondeo MC2. Sección macroscópica perteneciente a la muestra MC2-Z. La imagen corresponde con una superficie en corte de sierra del testigo, realizada perpendicularmente al eje del sondeo.

La muestra MC2-Z corresponde con una caliza parcialmente dolomitizada, marcada en muchas zonas por la presencia de una textura cristalina asociada a los procesos de reemplazamiento sufridos por la roca durante la diagénesis, sobreimpuesta a la textura granosoportada original de la roca, (Figura 4.64). En las zonas donde la textura relicta es aún observable, destaca la presencia de foraminíferos (150-250 μm), junto a escasos fragmentos de gasterópodos, bivalvos, algas, peloides, etc., con tamaños en todos los casos inferiores a las 500 μm (Figura 4.65). Todos ellos aparecen englobados por un lodo carbonatado (calcita y dolomita), parcialmente recrystalizado [(micrita-microesparita) (4-15 μm)]. Correspondería con una caliza packstone (Dunham, 1962) o una biomicrita (Folk, 1962).

Dentro del lodo carbonatado destaca la presencia de una importante porosidad secundaria de tipo intercrystalino generada a expensas de los procesos de reemplazamiento de cristales de calcita por dolomita. Igualmente se observa una porosidad primaria; intragranular (asociada a las cámaras de los foraminíferos), intramatricial (en las zonas con textura relicta con lodo carbonatado), y en menor medida, móldica por disolución de los fragmentos de conchas (Figura 4.65).

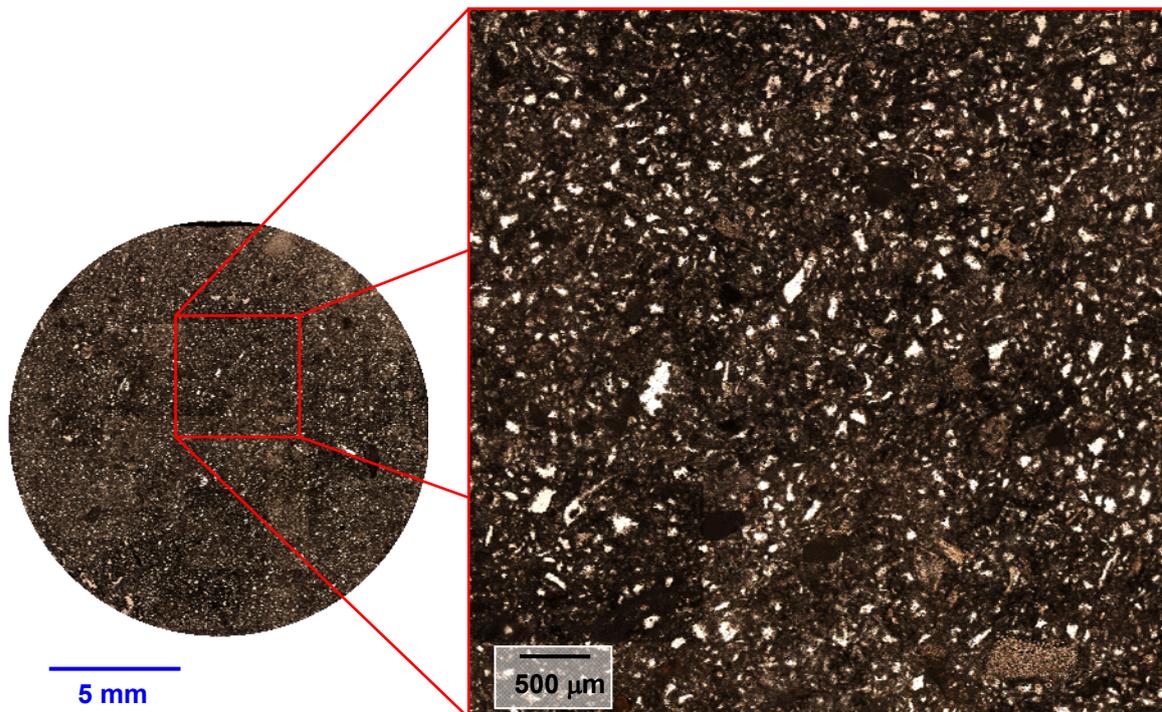


Figura 4.64.- Mosaico de imágenes (izquierda) y detalle (derecha) bajo luz natural de una de las láminas delgadas utilizadas para las observaciones petrográficas del testigo de sondeo MC2-Z, correspondiente al tramo superior del talud distal (TD). A esta escala de observación destaca la presencia de abundantes poros dentro de la matriz carbonatada (porosidad intercrystalina e intramatricial).

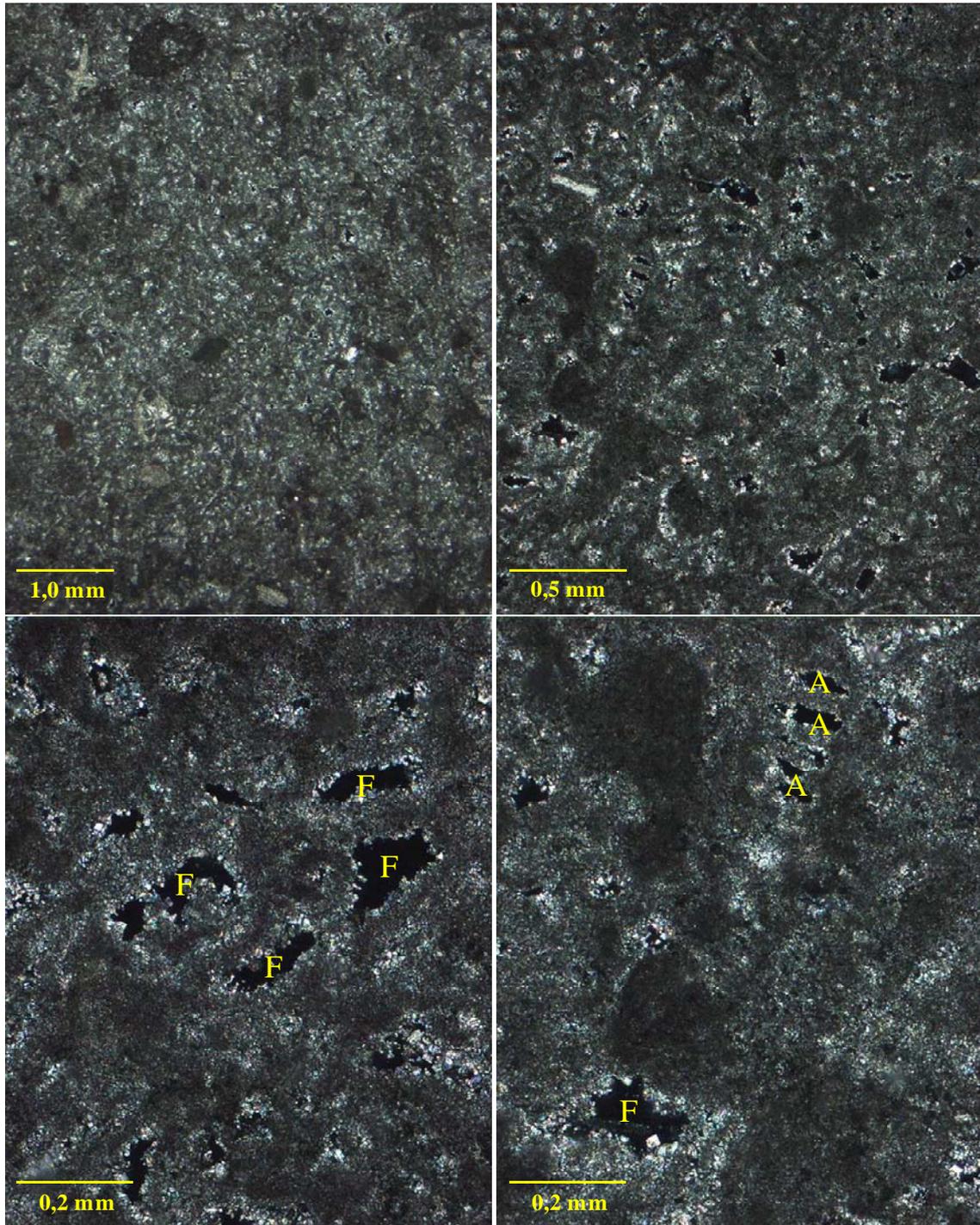


Figura 4.65.- Aspecto bajo microscopía óptica de polarización (POL) de la muestra MC2-Z correspondiente a la zona superior del talud distal (TD). Observaciones llevadas a cabo con nicóles cruzados bajo diferentes aumentos. Las micrografías permiten observar con total claridad los dos tipos de poros predominantes en esta caliza dolomitizada; poros intercristalinos (F) en relación con el proceso de dolomitización y poros intragranulares, asociados a las cámaras de los organismos (A).

El estudio macroscópico de los más de 100 m de testigo de sondeo obtenidos en el sondeo MC2, la observación bajo microscopía óptica de polarización y electrónica de barrido de las más de 200 muestras procedentes de los 17 testigos de sondeo analizados detalladamente dentro de este trabajo, así como, la integración de algunos de los datos obtenidos por el ETH e ISTEEM relativos al tipo de porosidad presente en las diferentes litofacies, ha permitido establecer un gráfico resumen con los principales tipos de porosidad dominantes en las diferentes litofacies establecidas en el sondeo MC2 (Figura 4.66).

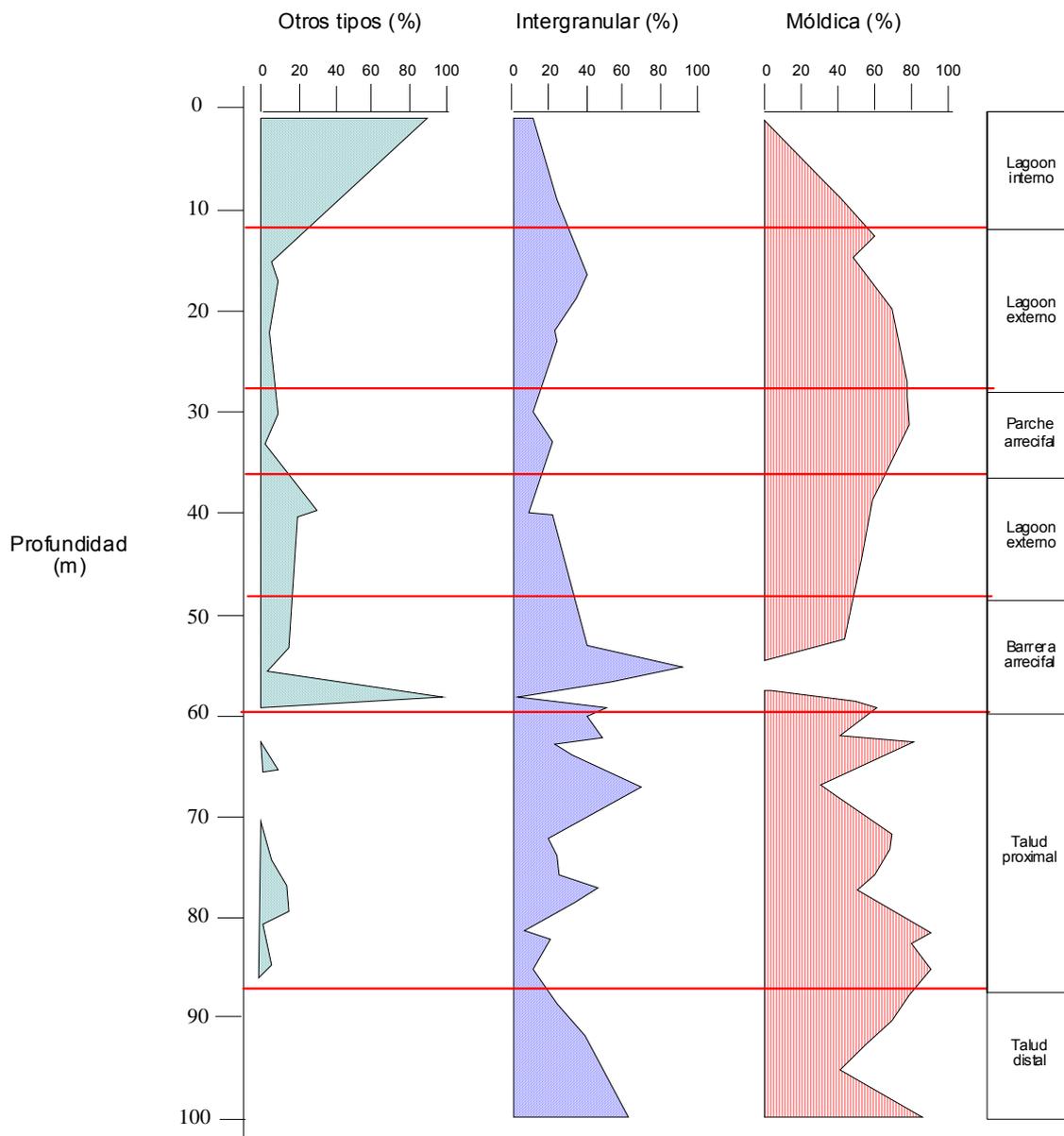


Figura 4.66.- Principales tipos de porosidad observadas a lo largo del sondeo MC2.

4.3.3.- Composición química

Las muestras estudiadas a lo largo del presente trabajo han sido analizadas mediante fluorescencia de rayos X (FRX), procediéndose únicamente a la determinación de los elementos mayores, dadas las necesidades analíticas del proyecto.

El equipo utilizado ha sido un "PHILIPS PW2404" y Cargador Automático "PW2540". El equipo está dotado de un tubo con ánodo de rodio (Rh) con 4 Kw de potencia, y 5 cristales analizadores (Fli 200, Fli 220, Pe, Ge y Px1). Así mismo se completa con 3 detectores: sellado de xenón, centelleo y flujo gaseoso.

La fluorescencia de rayos X es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra.

La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que ésta tenga un tamaño inferior al del portamuestras. Están excluidos el H, Li, 61Pm, 43Tc, 84Po, 85At, los gases nobles (excepto el argón) y los actínidos del 89Ac al 103Lr (excepto 90Th y 92U).

La preparación de las muestras ha seguido el procedimiento habitual en este tipo de análisis: Molienda en mortero de ágata (< 1 μm), cuarteado hasta obtener una muestra representativa de unos 20 g y prensado de una mezcla de muestra y aglutinante hasta obtener la pastilla que se introduce en el equipo de fluorescencia de rayos X.

Los resultados obtenidos aparecen recogidos en la tabla 4.14 y gráficamente representados en las figuras 4.67 y 4.68.

Tabla 4.14.- Composición química obtenida para los diferentes testigos de sondeo analizados. A modo de tabla se muestran los elementos mayores expresados en porcentajes en peso de sus óxidos.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Composición química (%)										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
MC2-A6	2,23	Lagoon interno	0,99	0,60	0,16	0,00	0,40	54,70	0,01	0,01	0,03	0,01	43,40
MC2-B1	5,88		2,87	0,94	0,30	0,01	0,51	52,82	0,02	0,10	0,06	0,01	41,71
MC2-D1	14,50	Lagoon externo	0,23	0,03	0,03	0,00	0,27	56,94	0,11	0,01	0,01	0,03	42,14
MC2-E6	17,51		0,21	0,13	0,03	0,00	0,35	55,49	0,01	0,00	0,02	0,08	43,34
MC2-F6	19,54		0,19	0,02	0,04	0,01	0,34	56,49	0,00	0,01	0,02	0,01	43,05
MC2-G5	21,52		0,09	0,01	0,03	0,00	0,31	56,78	0,01	0,01	0,01	0,02	42,78
MC2-K1	33,31		0,29	0,18	0,05	0,01	0,34	55,90	0,01	0,01	0,02	0,01	43,29
MC2-L5	34,53	Parche arrecifal	0,27	0,19	0,04	0,00	0,31	55,79	0,01	0,01	0,02	0,01	43,68
MC2-N1	42,08	Lagoon externo	0,12	0,18	0,03	0,01	0,30	55,62	0,01	0,01	0,01	0,01	42,79
MC2-O1	48,12		0,00	0,05	0,03	0,00	0,38	52,99	0,01	0,00	0,02	0,01	43,24
MC2-O5	48,32		1,10	0,49	0,14	0,01	17,12	35,01	0,06	0,05	0,15	0,04	45,70
MC2-F6	50,78		0,37	0,33	0,05	0,00	0,34	55,73	0,01	0,01	0,02	0,01	43,52
MC2-R6	56,83		Barrera	0,16	0,12	0,04	0,01	0,31	55,80	0,01	0,01	0,02	0,01
MC2-T6	60,96	Talud proximal	0,66	0,35	0,12	0,00	18,93	34,02	0,04	0,02	0,03	0,03	46,16
MC2-V6	70,03		1,13	0,23	0,07	0,00	0,38	54,49	0,02	0,01	0,03	0,02	43,66
MC2-7	81,14		0,11	0,12	0,03	0,00	0,30	55,96	0,03	0,00	0,02	0,02	43,73
MC2-Y6	85,60		0,28	0,15	0,04	0,00	4,35	51,04	0,01	0,01	0,02	0,02	44,56
MC2-Z1	88,92		Talud distal	1,00	0,37	0,11	0,00	11,25	41,83	0,06	0,01	0,03	0,02

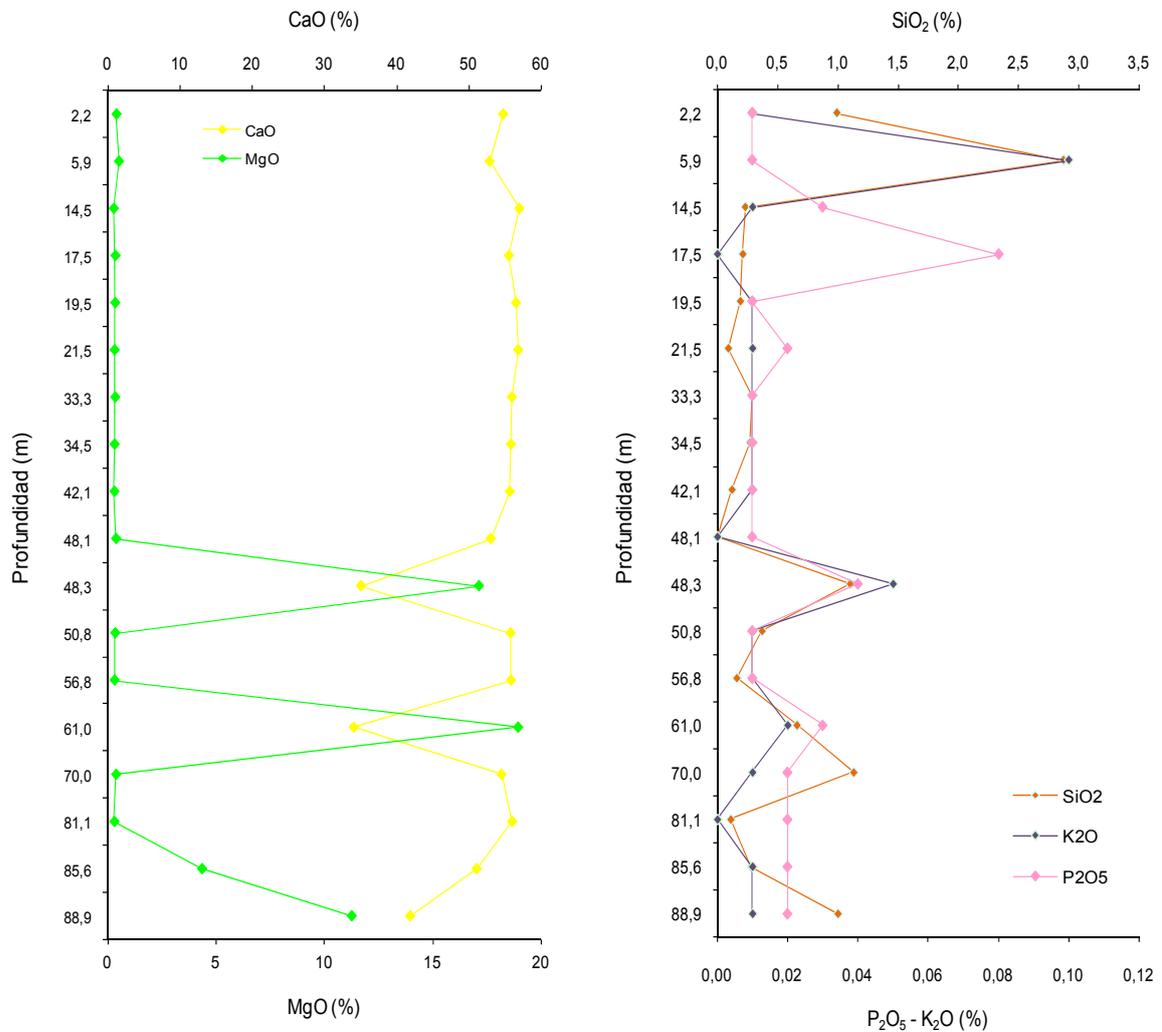


Figura 4.67.- Perfiles de composición química vs profundidad obtenidos para los diferentes testigos analizados a lo largo del sondeo. Izquierda; porcentaje en peso de MgO y CaO vs profundidad. Derecha; porcentaje en peso de SiO₂, P₂O₅ y K₂O vs profundidad.

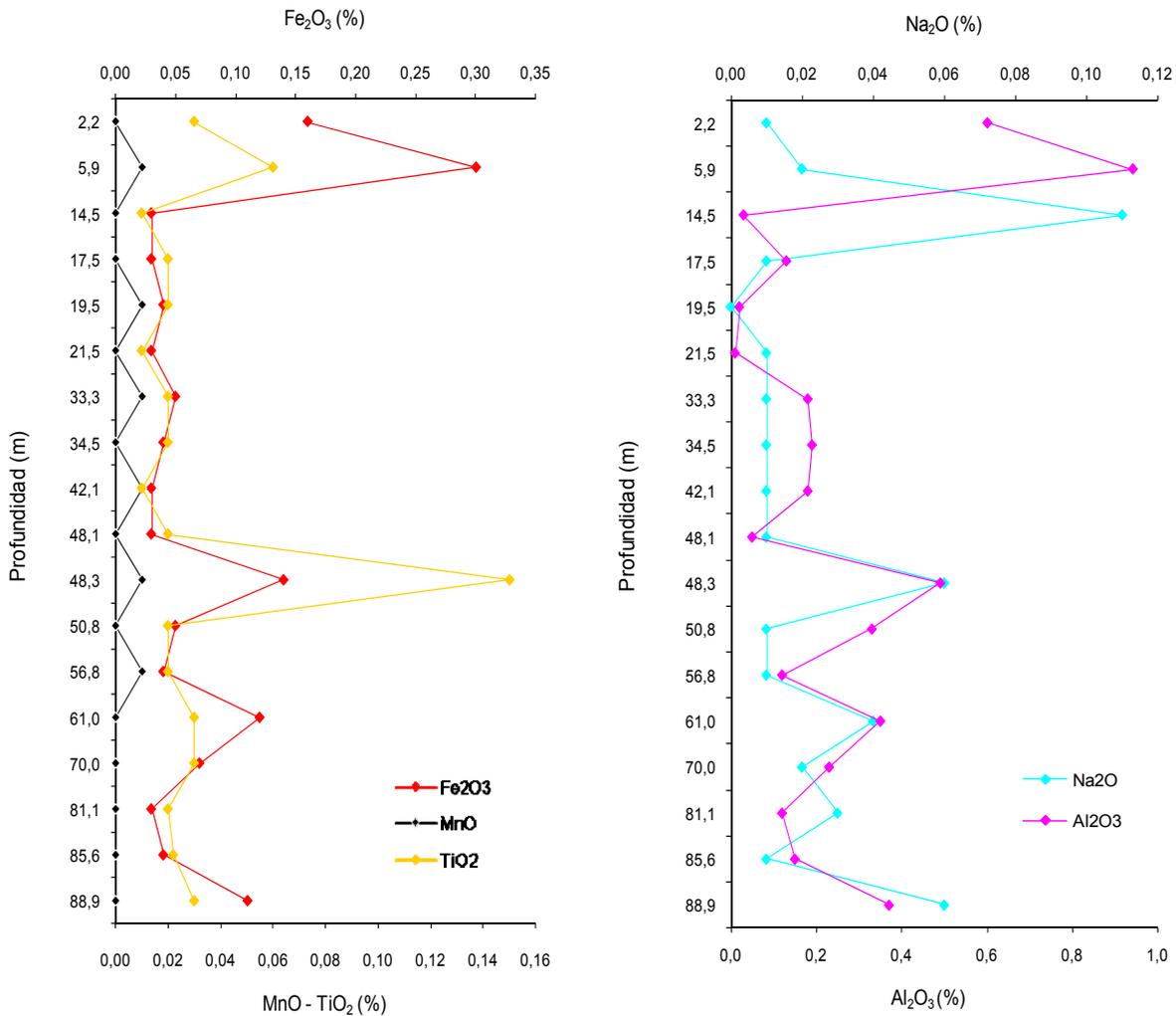


Figura 4.68.- Perfiles de composición química vs profundidad obtenidos para los diferentes testigos analizados a lo largo del sondeo. Izquierda; porcentaje en peso de Fe₂O₃, MnO y TiO₂ vs profundidad. Derecha; porcentaje en peso de Na₂O y Al₂O₃ vs profundidad.

De los diferentes perfiles composicionales anteriormente representados, y por el especial interés que puede suponer de cara a la interpretación petrofísica, cabe destacar la existencia de tres niveles donde se produce un notable aumento del contenido en magnesio (dolomita). Estos incrementos se localizan alrededor de las cotas: -48,3 m., dentro del tramo inferior del lagoon externo (muestra MC2-O); -61,0 m., dentro del talud proximal (muestra MC2-T) y en el tramo final del sondeo, por encima de los -85,6 m., coincidiendo con la zona de transición entre el talud proximal (MC2-Y) y distal (MC2-Z). Destacar igualmente un incremento de todos los demás elementos químicos en las muestras correspondientes al lagoon interno (MC2-A y MC2-B), reflejo de un mayor aporte de terrígenos en forma de cuarzo, feldespatos, finos, etc., dentro de este ambiente sedimentario.

4.4.- Caracterización del sistema poroso

4.4.1.- Introducción

Desde un punto de vista petrofísico, la correcta interpretación de la funcionalidad hidráulica del espacio poroso de una roca, requiere conocer el **volumen**, y la **geometría y distribución** de los espacios vacíos presentes, es decir, la configuración de su sistema poroso.

El **volumen** de poros presente en las diferentes litofacies estudiadas, ha sido una de las propiedades básicas evaluadas en el capítulo 4.2, separando entre porosidad total, porosidad cerrada y porosidad abierta. En el capítulo 4.4, se procede nuevamente a su cuantificación mediante la utilización de otras dos técnicas: proceso digital de imágenes y porosimetría de inyección de mercurio. Esto permitirá comparar la bondad de las diferentes técnicas utilizadas, comparando los resultados obtenidos.

A su vez, en el capítulo 4.2, la porosidad abierta ha sido dividida en “porosidad efectiva” y “porosidad no efectiva o atrapada”, de acuerdo con la mayor o menor facilidad del agua para moverse por el seno de una roca. Su cuantificación ha obedecido a la relación existente entre el valor de porosidad abierta determinado y los valores de absorción libre y forzada de agua que mostraban los testigos de roca ensayados.

No obstante, tal y como se describe a lo largo del presente capítulo, la división de la porosidad abierta en efectiva y atrapada, ha sido tradicionalmente deducida del ensayo de porosimetría de inyección de mercurio, y extrapolada al comportamiento del agua en el seno de una roca (Alonso, 1996), no existiendo ninguna norma de ensayo para su determinación. La utilización de ambas técnicas para la obtención de estos parámetros permitirá correlacionar además ambas metodologías de trabajo.

La tabla 4.15 sintetiza algunos de los aspectos anteriormente descritos: tipos de porosidad, símbolos utilizados por las normas utilizadas en el presente trabajo, definiciones más aceptadas, parámetros involucrados y sus relaciones numéricas, normas de ensayo para su obtención, y un breve comentario sobre la funcionalidad hidráulica de cada uno de los tipos de porosidad anteriormente separados.

Tabla 4.15.- Relación numérica, definición y normas en relación a los diferentes tipos de porosidad anteriormente descritas (Montoto 2003, modificado).

Tipo de porosidad		Fórmula	Definición	Norma	Funcionalidad hidráulica
Total (P)		$P = (1 - \rho_b/\rho_r) * 100$	La porosidad total (P) es la relación en porcentaje, entre el volumen de poros (abiertos y cerrados) y el volumen aparente de la muestra.	Determinación de la densidad real y la densidad aparente, y de la porosidad total y abierta. EN- 1936 (1999)	Predecible con muchos errores
Abierta (P _o)	Abierta (P _o)	$P_o = (m_s - m_d / m_s - m_h) * 100$	La porosidad abierta (P _o) es la relación en porcentaje, entre el volumen de poros abiertos y el volumen aparente de la muestra.		No existe; se deduce habitualmente de la porosimetría de inyección de mercurio.
	Efectiva (P _e)	$P_e = P_o - P_i$	La porosidad efectiva (P _e) es la diferencia entre la porosidad abierta de la roca (P _o) y la porosidad atrapada de la misma (P _i).		
	No efectiva ó atrapada (P _i)	$P_i = P_o - P_e$	La porosidad atrapada o no efectiva (P _i) es la diferencia entre la porosidad abierta de la roca (P _o) y la porosidad efectiva de la misma (P _e).	No activo en el corto plazo. En el largo plazo contribuye a un mayor tiempo de residencia del agua y las reacciones profundas líquido-sólido	
Cerrada (P _c)		$P_c = V_c / V_T$ $P_c = P - P_o$	La porosidad cerrada es la porosidad que corresponde a los intersticios que no están conectados entre sí y, por lo tanto, no permiten flujo de un fluido a través de ellos		No activo a ninguna escala de tiempo
V _T = Volumen de la roca V _c = Volumen de los poros cerrados m _h = masa de la muestra sumergida en agua		P _c = Porosidad cerrada P _o = Porosidad abierta P _i = Porosidad atrapada m _s = Masa de la muestra saturada en agua		P = Porosidad total ρ _b = Densidad aparente ρ _r = Densidad real m _d = masa de la muestra seca	

Una gran parte de las propiedades físicas de las rocas son íntimamente dependientes de su porosidad. De la misma manera que la variación en algunas propiedades puede ser entendida conociendo el porcentaje volumétrico de los espacios vacíos; otras, como la permeabilidad o la capilaridad, necesitan correlacionarse con la forma en que la porosidad se distribuye en el volumen de roca (Etris *et al.*, 1998), es decir, conocer la **geometría y distribución** de estos espacios vacíos.

Para entender esta variabilidad deben determinarse parámetros estructurales que reflejen la manera en que se organiza la porosidad, en concreto, su correcta cuantificación es de vital importancia en el análisis de los procesos de alteración,

donde el sistema poroso representa la zona de actuación preferente de los fenómenos físico-químicos (Fitzner, 1990), o en la circulación de los fluidos el seno de una roca (Esbert *et al.*, 1997; Montoto, 2003).

Haynes (1973) define como parámetros estructurales fundamentales en la descripción del espacio poroso los siguientes:

- *Porosidad*: fracción del volumen total de la muestra que es ocupada por los poros.
- *Superficie específica*: área o superficie accesible contenida en una unidad de volumen de sólido.
- *Distribución del tamaño de poro*: fracción del volumen de la porosidad que corresponde a un determinado tamaño
- *Forma del poro*: referida a dos factores de forma (factor de forma rugosa y factor de forma circular).

Sin embargo, este autor no hace referencia a uno de los aspectos más relevantes en la configuración de un sistema poroso, los conductos que unen los poros (Figuras 4.68 y 4.69), la distribución de sus **radios de acceso** y la tortuosidad de los mismos; todos ellos son los verdaderos responsables de la mayor o menor conectividad de un sistema poroso y con ello, de la facilidad o dificultad de los fluidos para circular en el seno de las rocas porosas, tales como las calizas existentes en la plataforma arrecifal de Lluçmajor.

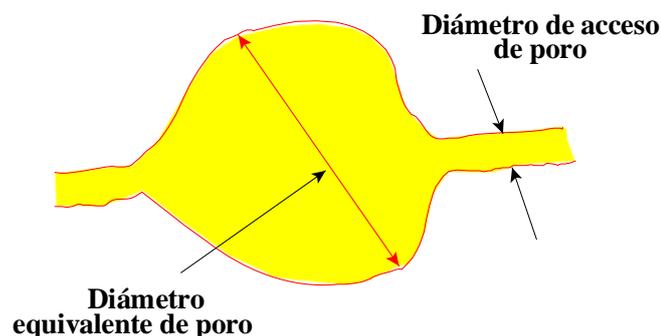


Figura 4.68.- Esquema ilustrativo de la geometría básica de un poro (Montoto, 2003). El diámetro equivalente de poro es un dato necesario para evaluar el volumen poroso de la roca y su capacidad de almacenamiento. Por el contrario, el diámetro de acceso de poro proporciona información sobre la dificultad o facilidad del agua para fluir a través de la roca, es decir, su comportamiento cinético.

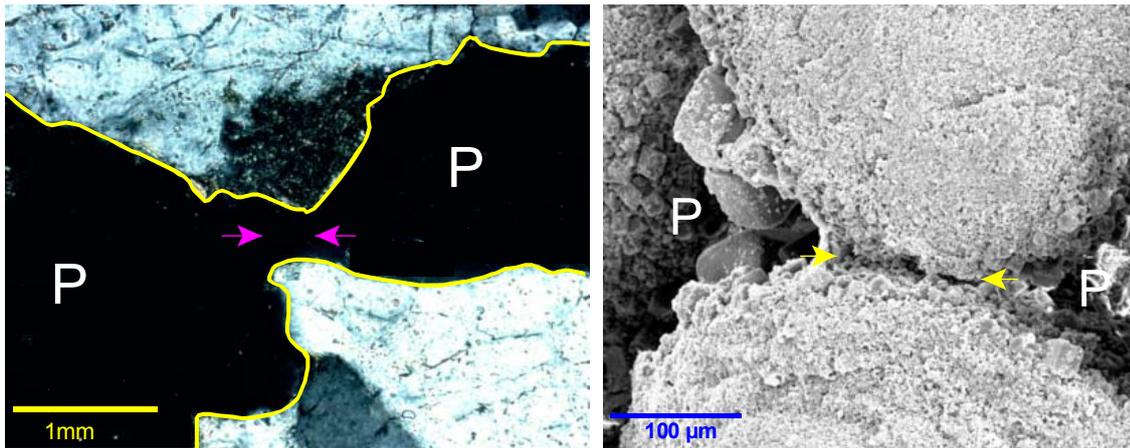


Figura 4.69.- Características geométricas del conducto de comunicación entre dos poros. A la izquierda; micrografía de una arenisca tomada bajo microscopía óptica de polarización con nicols cruzados. Se puede observar los dos poros (P) y el conducto de conexión entre ellos (flechas rosas). A la derecha; micrografía de una caliza tomada bajo microscopía electrónica de barrido. Entre los oolitos constituyentes de esta caliza se aprecian los poros (P) y el largo conducto de unión entre ambos (flechas amarillas).

La observación directa de secciones planas de un material poroso, tanto macroscópicamente como mediante la utilización de microscopía óptica o electrónica de barrido, posibilita la cuantificación de algunos de éstos parámetros, bien mediante la utilización de medios estereológicos (Haynes, 1973; Stroeven, 1987; Gundersen *et al.*, 1988; Karlsson y Cruz-Orive, 1992; Menéndez, 1992; Nistal, 1993; Howard y Reed, 1998; Russ y Dehoff, 2000) ó por medio de técnicas de análisis de imágenes (Serra y Kolomanski, 1976; Rink y Schooper, 1978; Bel-Lan *et al.*, 1978; Montoto, L. *et al.*, 1978; Montoto, 1978a; Montoto *et al.*, 1978b, 1980, 1981c, d; Montoto, L., 1982; Nistal, 1993; Goodchild y Fueten, 1998; Castroviejo *et al.*; 2002; Berrezueta y Castroviejo, 2007; Wang y Jia; 2009).

El análisis digital de imagen, es una técnica instrumental compleja, a la vez que fiable y eficaz, basada en la utilización de computadoras dotadas de un hardware y un software específico. Mediante esta técnica, imágenes de roca obtenidas con cualquier técnica microscópica o incluso imágenes macroscópicas, pueden ser analizadas digitalmente con el objetivo de discriminar y cuantificar sus componentes (mineralogía, porosidad, fisuración, etc.). Este análisis implica el siguiente tratamiento de imagen: digitalización de la imagen, procesamiento, extracción de información y cuantificación, procedimiento ampliamente descrito por Martínez Nistal (1993).

Digitalizada la imagen, la discriminación de la zona porosa se realiza mediante un simple proceso de “thresholding”, tomándose como umbral de segmentación un valor

determinado de gris (son imágenes binarias en blanco y negro), considerándose como poros aquellas zonas de la imagen con un valor de gris comprendido entre 0 y el umbral de segmentación asignado en cada caso. El resultado final es una imagen binaria con los poros abiertos en un color y el resto de la imagen en otro (Figura 4.70). La depuración de imperfecciones y pequeñas áreas mal clasificadas se consigue mediante una criba de áreas mínimas y un proceso de cierre.

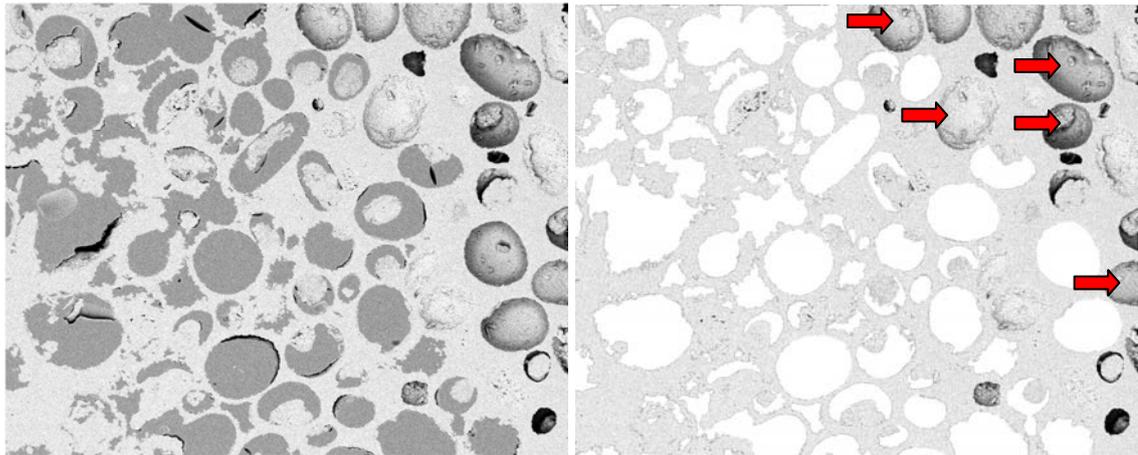


Figura 4.70.- Izquierda; imagen al BSEM de una muestra impregnada con resina fluorescente. Derecha; imagen anterior tras ser procesada digitalmente. En blanco se observan los poros abiertos detectados y en gris claro la roca. Igualmente, esta técnica permite discriminar la porosidad cerrada (flechas rojas).

A partir de dicha imagen binaria, es posible cuantificar toda una serie de parámetros (Tabla 4.16), describiéndose a continuación los utilizados en el presente trabajo:

La porosidad de la muestra vendrá dada por la fracción de volumen V_v ocupada por poros. Según el principio de Delesse es equivalente a la fracción de área, pudiendo calcularse en una imagen digital mediante la siguiente ecuación:

$$V_v = \frac{\sum \text{pixels (poros)}}{\sum \text{pixels (totales)}}$$

Para la cuantificación de la superficie específica ocupada por los poros (S_v), se extrae, a partir de la imagen binaria, los bordes de los poros, vectorizando sus coordenadas para calcular sus longitudes y aplicando la siguiente fórmula para obtener la superficie específica total de los poros presentes en la imagen:

$$S_v = 4 \frac{\sum B_i (\text{obj})}{\pi \sum A_i (\text{ref})}$$

Donde: $B_i (\text{obj})$: Longitud de los bordes de los poros; $A_i (\text{ref})$: Área de referencia.

Los tamaños de poro han sido determinados mediante el cálculo del radio de poro a lo largo de toda la superficie del mismo, ya que de este modo su valor es independiente de la forma. Si se considera el poro como un círculo, su radio vendrá dado por el valor del pixel central en el mapa de distancias. En el caso más común, cuando los poros tienen formas irregulares, el radio se puede definir como la distancia desde su línea media o eje al borde. De este modo, para cada poro tenemos una serie de radios correspondientes a las distancias de los puntos de su línea media a la periferia, calculándose así los valores de radio máximo, mínimo y medio. Las coordenadas de la línea media se obtienen mediante un proceso de “thinning”. Utilizándolas como máscara sobre la imagen de distancias se obtienen los valores de los radios de poro.

Finalmente, para poder evaluar la forma de los poros, se han calculado los parámetros de forma circular (FC) y forma rugosa (FR), por ser estos los más utilizados en la bibliografía (Russ, 1990; Nistal, 1993; Levine, 1995).

El factor de forma circular (FC) se basa en la relación existente entre la superficie de los poros con la superficie de un círculo de igual área. Aunque empíricamente este factor se puede calcular de diferentes maneras, en el presente trabajo se ha adoptado la expresión seguida por Nistal (1993):

$$FC = 4\pi S/P^2$$

Donde **S**; es la superficie de los poros y, **P**; el perímetro de los mismos. Siguiendo esta expresión, FC es igual a 1 para un círculo y tiende a 0 para poros poco circulares. La forma rugosa (FR): también denominado convexidad (Russ, 1990) relaciona el perímetro convexo de los poros con su perímetro total, según la siguiente ecuación:

$$FR = P_{\text{convexo}}/P_{\text{total}}$$

El perímetro convexo se define como la longitud de la línea convexa que circunscribe el objeto a medir. Para su cuantificación se calcula la longitud de un polígono definido por 64 vectores. Por rotación, los ejes cartesianos X e Y de la imagen se convierten en X' e Y' pudiéndose tomar las coordenadas máxima y mínima del objeto en X' e Y'. Tras realizar 32 rotaciones se obtienen 64 puntos que definen los extremos de un polígono que se aproxima al perímetro convexo del poro. Calculando el perímetro de dicho polígono se obtiene un valor aproximado al perímetro convexo del grano.

Paralelamente al proceso digital de imagen, existen una serie de métodos indirectos, como la porosimetría de mercurio, donde a partir de la inyección de mercurio en la roca, es posible deducir la fracción de volumen de poros accesibles a determinadas presiones por dicho fluido, así como los radios de acceso de poro.

Esta técnica se basa en la premisa de que un líquido no mojable (ángulo de contacto superior a 90°) solamente penetra en los capilares bajo presión (Abell et al, 1999). Por lo tanto, tras someter la cámara que contiene la muestra a vacío, y al aplicar una presión cada vez mayor sobre el mercurio, este va rellenando el espacio poroso abierto de la roca (Cook, 1991; Cook y Hover, 1999); como resultado, el mercurio invade primero los poros más grandes y sucesivamente, los más pequeños hasta que el sistema poroso está saturado o es incapaz de aceptar más mercurio debido a que el espacio poroso residual está pobremente conectado para permitir la penetración (Winslow y Diamond, 1970; Beaudoin, 1979). La relación entre la presión aplicada y el diámetro capilar equivalente de poros es descrita por Washburn (1921) como:

$$P = - 4\gamma \cos \theta/d$$

Donde; **P** = presión, γ = tensión superficial del líquido, θ = ángulo de contacto del líquido, y **d** = diámetro del capilar.

Las curvas de inyección de mercurio obtenidas en este ensayo, proporcionan información de la porosidad conectada de la roca, obtenida a partir del volumen total de mercurio intruido en el seno de la misma, a la vez que, la distribución de los radios de acceso de poro se determina a partir del volumen intruido en cada incremento de presión. Sin embargo, no ofrecen información acerca del tamaño o tipo de poros invadido ya que la cantidad de mercurio atrapado en un determinado intervalo de presión puede ser debido al relleno de muchos poros de varios tamaños o al de unos pocos poros de gran tamaño. En relación a esta técnica deben aclararse dos aspectos:

1) Proporciona información sobre la capacidad del Hg presurizado para circular por el sistema poroso abierto de la roca, que no corresponde exactamente con la capacidad real de agua no presurizada para fluir a través de ésta. En cualquier caso, representa una herramienta muy valiosa en la caracterización de la geometría de la estructura del sistema poroso, a la vez que constituye un procedimiento muy sólido para comprender la capacidad del agua para fluir a través de la roca matriz (Van-Brakel, *et al.*, 1981;

Cook, 1991; Cerepi *et al.*, 2002b).

2) Proporciona una distribución de los radios de acceso de poro que constituyen el sistema poroso de la roca (Abell *et al.*, 1999; Esbert *et al.*, 1997; Montoto, 2003), a la vez que, dan información del volumen de mercurio que penetra en la roca para cada intervalo de estos radios de acceso ó de presión. En ningún caso se obtiene la distribución de los tamaños de poro, tal y como muy frecuentemente se puede apreciar en la bibliografía y en numerosos trabajos de investigación.

Además de los parámetros anteriormente descritos; porosidad abierta de la roca y distribución de radios de acceso de poro, la porosimetría de inyección de mercurio permite obtener empíricamente toda una serie de parámetros (Tabla 4.16), entre los que cabe destacar la porosidad abierta efectiva y no efectiva o atrapada, superficie específica o la densidad real y aparente de la muestra.

Clásicamente, la determinación del porcentaje de porosidad abierta que corresponde con porosidad efectiva y porosidad no efectiva o atrapada, se realiza a partir de los datos de intrusión y extrusión obtenidos durante el ensayo de inyección de mercurio, utilizando los siguiente cálculos:

- 1) Se parte de los siguientes datos del porosímetro: (P_1 : Peso de la muestra (g); P_2 : Peso del penetrómetro + mercurio (g); P_3 : Peso del penetrómetro + muestra + mercurio (g); P_4 : Peso de la muestra + mercurio (g); T.C.V: Volumen de poros (mm^3/g) y densidad del mercurio: $13,6 \text{ g/cm}^3$)
- 2) Se realizan los siguientes cálculos previos: Volumen de la muestra: $V_t = (P_1 + P_2 + P_3) / 13,6 \text{ (cm}^3)$ y densidad de la roca: $\rho_d = P_1 / V_t \text{ (g/cm}^3)$.
- 3) La porosidad abierta (P_0) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_0 = [(V_p)/(V_t \times 1000)] \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{siendo: } V_p = \text{T.C.V} \times P_1 \text{ (mm}^3/\text{g)}$$

- 4) La porosidad atrapada (P_t) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_t = (V_{\text{Hg}}/V_t) \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{siendo: } V_{\text{Hg}} = \text{T.C.V} \times P_1 \text{ (cm}^3)$$

Sin embargo, ambos tipos de porosidad pueden ser calculadas de una manera mucho más precisa mediante la realización de dos ciclos consecutivos de inyección de mercurio (Montoto, 2003). Así, finalizado el primer ciclo de inyección la muestra es extraída de la cámara de ensayo, dejando exudar a presión atmosférica el mercurio contenido en el interior de la muestra ensayada, hasta alcanzar peso constante en dos pesadas consecutivas realizadas en un intervalo de 24 horas. A continuación se procede a la realización del 2º ciclo de inyección de mercurio sobre la misma muestra.

La determinación de la porosidad efectiva y no efectiva de la muestra ensayada se obtiene en este caso a partir de las dos curvas de intrusión obtenidas durante sendos ensayos de inyección de mercurio. Tal y como se refleja gráficamente en la figura 4.74, la porosidad efectiva se calcula a partir del volumen de mercurio intruido durante el segundo ciclo de inyección, siendo la diferencia entre este volumen y el volumen alcanzado durante la primera intrusión el correspondiente a la porosidad atrapada.

Esta metodología permite además discriminar, dentro del volumen de mercurio que penetra en la roca para cada intervalo de radios de acceso ó de presión, que parte corresponde con porosidad atrapada y que parte de dicho volumen se encuentra asociados a porosidad efectiva, donde el mercurio circula con gran facilidad a su través (Figura 4.71).

La correcta interpretación de los datos aquí obtenidos; porosidad abierta efectiva y no efectiva, porosidad cerrada, superficie específica, histogramas de distribución de radios de poro y radios de acceso de poro, en combinación con algunos de los parámetros obtenidos mediante la determinación de las propiedades hidráulicas de las rocas (Esbert *et al*, 1997), permitirán conocer la configuración del sistema poroso de la roca, en términos de volumen poroso, movilidad del agua, tortuosidad, conectividad, radio de acceso, etc., parámetros todos ellos de vital importancia para comprender la funcionalidad hidráulica de una roca, de gran interés en el estudio de un acuífero.

La tabla 4.16 sintetiza los parámetros obtenidos con cada una de las técnicas de observación y/o cuantificación utilizadas en el presente capítulo, a la vez que, la metodología de trabajo seguida a lo largo del mismo, queda recogida en el capítulo “Methodology” del CD anexo a esta tesis doctoral.

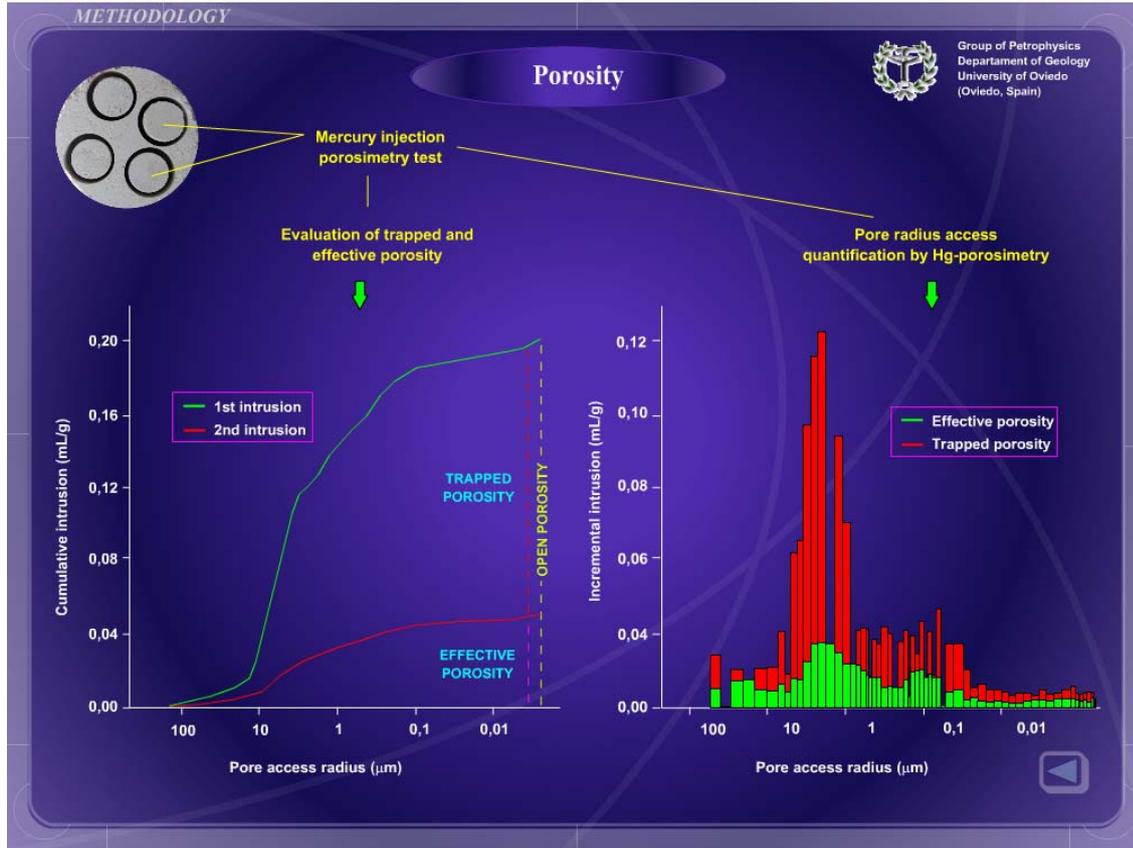


Figura 4.71.- Determinación de la porosidad efectiva y no efectiva de una muestra de roca a partir de las curvas de intrusión obtenidas en sendos ensayos de inyección de mercurio realizadas sobre una misma muestra (2 ciclos). Tal y como muestra el gráfico de la izquierda, la porosidad efectiva corresponderá con el volumen inyectado durante el segundo ciclo. La porosidad atrapada se obtendrá de la diferencia entre el volumen de mercurio inyectado en el primer ciclo y el alcanzado en el segundo. El gráfico de la izquierda muestra que parte del volumen de mercurio que penetra en la roca para cada intervalo de radios de acceso corresponden con porosidad efectiva y cuáles con una porosidad atrapada.

Tabla 4.16.- Diferentes parámetros usados en el presente capítulo en la caracterización de la configuración de un sistema poroso, obtenidos mediante diferentes técnicas de cuantificación.

Técnica de análisis		Parámetros obtenidos	Unidades
Estudio macroscópico de las muestras	Proceso digital de imágenes obtenidas	Porosidad total	%
		Distribución de tamaños de poro (> 500 μm)	μm
		Superficie específica de tamaños de poro (> 500 μm)	mm ⁻¹
		Factor de forma y rugosidad de tamaños de poro (> 500 μm)	---
Microscopía electrónica de barrido con electrones retrodispersados		Porosidad abierta	%
Distribución de tamaños de poro (< 500 μm)		μm	
Superficie específica de tamaños de poro (< 500 μm)		mm ⁻¹	
Factor de forma y rugosidad de tamaños de poro (< 500 μm)		---	
Porosimetría de inyección de mercurio	Porosidad abierta	%	
	Porosidad efectiva	%	
	Porosidad atrapada	%	
	Distribución de radios de acceso de poro	μm	
	Volumen de intrusión vs intervalo de radios de acceso	%	
	Superficie específica	g/l	
	Densidad real	Kg/m ³	
Densidad aparente	Kg/m ³		

4.4.2.- Metodología

El análisis de la configuración del sistema poroso de cada uno de los testigos de roca estudiados ha comenzado con la obtención de una o varias secciones de roca cortadas perpendicularmente al eje longitudinal (Figura 4.72). A partir de estas secciones se han obtenido pequeñas muestras cilíndricas “plugs” de 2-3 cm de longitud y 1,6 cm de diámetro utilizados para caracterizar el sistema poroso (Figura 4.73), una vez preparadas según las necesidades de las técnicas de observación y análisis a utilizar.

Previamente a la extracción de éstos “plugs” se ha procedido al fotografiado de las caras de las secciones obtenidas, a fin de proceder al estudio macroscópico de la porosidad mediante proceso digital de imagen que será descrito posteriormente.

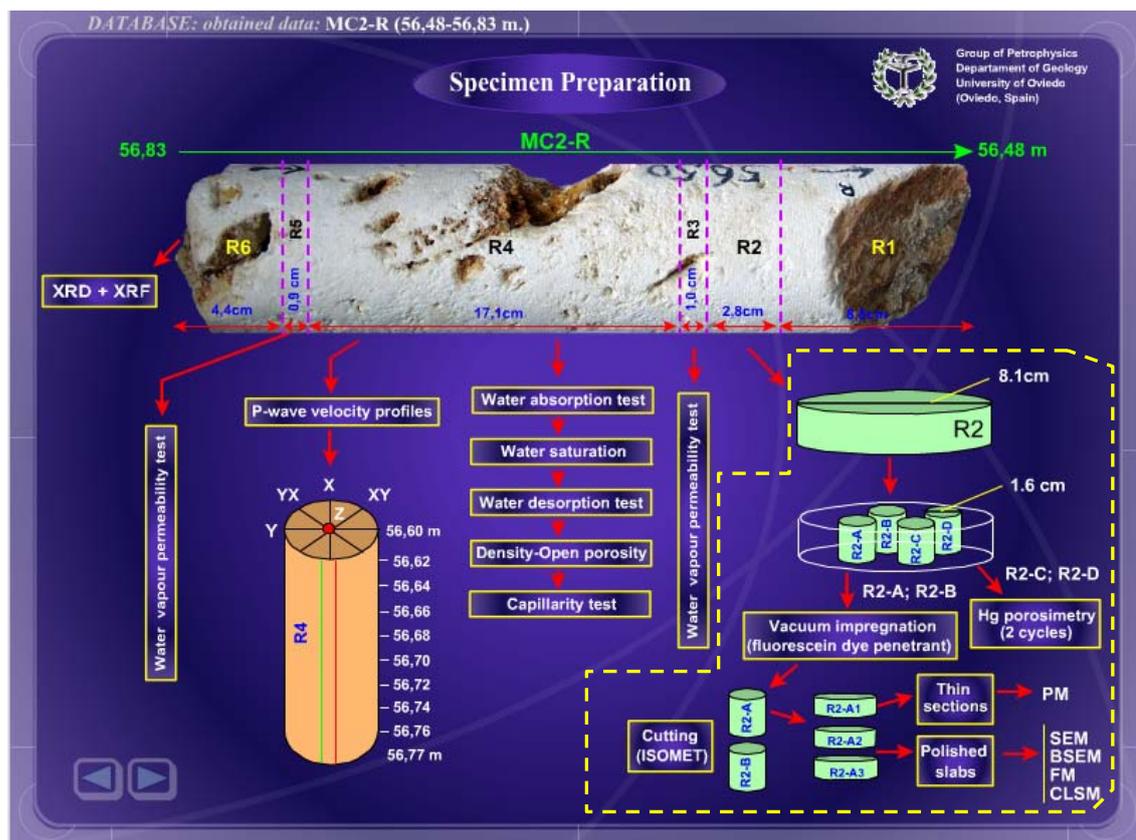


Figura 4.72.- Esquema de trabajo seguido en la caracterización de los sistemas porosos de los testigos de roca obtenidos en el sondeo MC2, en este caso ejemplo de la muestra MC2-R. La información contenida dentro del recuadro amarillo en línea discontinua, representa los pasos iniciales seguidos en la caracterización del sistema poroso llevada a cabo en el capítulo 4.4.

Los “plugs” obtenidos han seguido dos líneas diferentes de análisis: En primer término, sobre una parte de los mismos, y tratando de minimizar el desarrollo de artefactos, se han realizado sistemáticamente procedimientos específicos de preparación de muestras; a) impregnación bajo vacío con resinas fluorescentes (Rodamina B), siguiendo la metodología descrita en el subcapítulo 4.3.1 (páginas 82-83); b) corte mediante disco de baja deformación y; c) preparación de secciones pulidas y/o láminas delgadas pulidas sin cobre (Figura 4.73). Las observaciones así obtenidas del sistema poroso han de considerarse como altamente fiables y libres de artefactos.

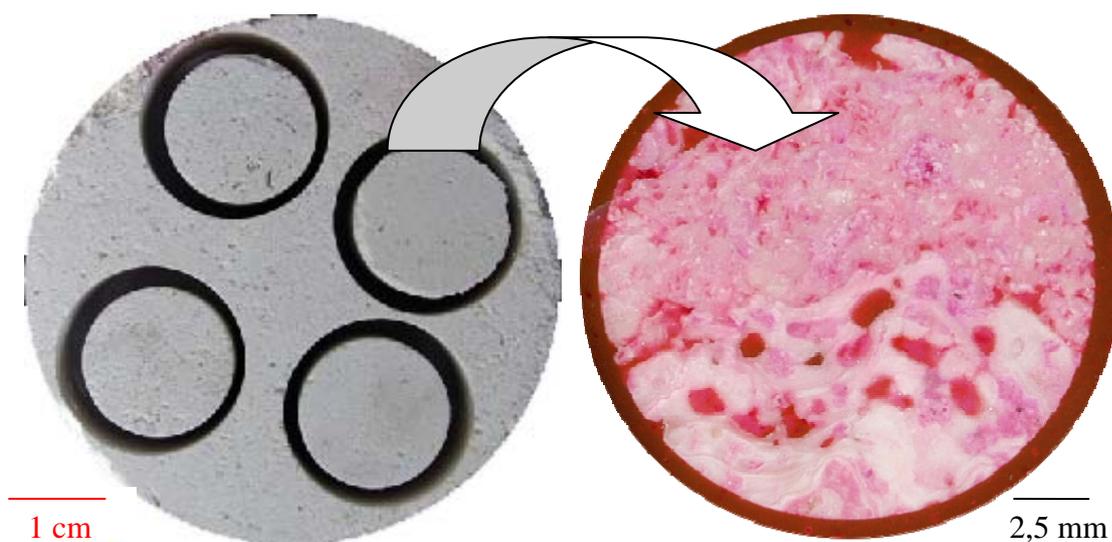


Figura 4.73.- Izquierda; Detalle de los pequeños cilindros de roca obtenidos a partir de una de las secciones cortadas perpendicularmente al eje del testigo de sondeo. Estas pequeñas muestras de roca serán utilizadas para la caracterización del sistema poroso de la roca. Derecha; Detalle de uno de los cilindros de roca tras ser impregnados con una resina fluorescente (Rodamina B). Cada uno de ellos, y mediante la utilización de sierra con disco diamantado de baja deformación, servirán para la obtención de unas 10 láminas delgadas pulidas sin cobre, que serán utilizadas para su observación tanto al POL como al BSEM.

A continuación se ha procedido a la observación de las láminas obtenidas bajo diferentes técnicas microscópicas que proporcionan imágenes con información detallada acerca de la geometría del espacio poroso a diferentes escalas: a) óptica de polarización (POL) con nicols paralelos y nicols cruzados, lo que ha permitido diferenciar los tipos genéticos de porosidad, tal y como aparece recogido en el estudio petrográfico sintetizado en el capítulo 4.3, b) microscopía electrónica de barrido, utilizando tanto electrones secundarios (SEM) como electrones retrodispersados (BSEM). Estos últimos permiten obtener imágenes donde la porosidad abierta de la roca, rellena de resina fluorescente tras su impregnación, contrasta claramente con el

resto de la masa pétreo, gracias a la diferencia de densidad que muestran ambos materiales. En este caso, es posible además obtener información de la porosidad cerrada de la roca, que no aparece rellena por la citada resina (Figura 4.74).

Las imágenes microscópicas obtenidas bajo BSEM, así como las imágenes macroscópicas de la roca tomadas tanto en las caras de las secciones de testigo cortadas perpendicularmente al eje longitudinal del sondeo como en las dos caras del testigo tras ser cortado longitudinalmente, han sido sometidas a un análisis digital de imágenes a fin de obtener algunos de los parámetros anteriormente descritos: distribución de tamaños de poro, superficie específica, volumen poroso, etc.

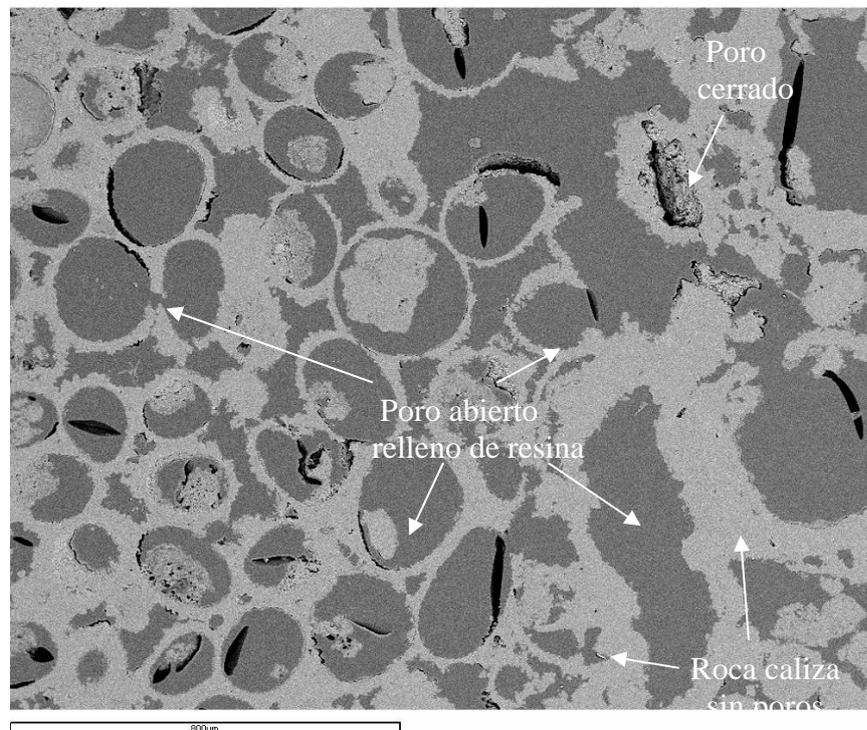


Figura 4.74.- Micrografía bajo microscopía electrónica de barrido con electrones retrodispersados de una muestra de caliza oolítica (MC2-A). Este tipo de imágenes, donde los poros aparecen rellenos de resina con una fluoresceína, muestran un contraste de densidad muy alto respecto a la roca. Así los colores oscuros corresponden con los poros rellenos de resina, mientras que los colores más grisáceos corresponden con la roca. También se pueden detectar la presencia de poros no rellenos (porosidad cerrada). Esta marcada discriminación de los poros facilita mucho su posterior cuantificación con PDI.

Este análisis cuantitativo de la porosidad ha seguido fielmente la metodología desarrollada por Nistal, A. (1993), ampliamente descrita en su Tesis Doctoral titulada “*Discriminación, cuantificación y cartografiado de componentes petrográficos mediante proceso digital de multi-imágenes microscópicas*”. En dicho trabajo aparecen cada uno de los parámetros citados en la tabla 4.16, su método de cálculo, fórmula, etc.

En la presente tesis doctoral, las imágenes obtenidas han sido procesadas mediante el software de proceso digital de imagen LEICA-QWin-Pro. Para cada uno de los testigos analizados se han procesado 6 imágenes macroscópicas (4 perpendiculares al eje longitudinal del testigo y 2 secciones coincidentes con el eje axial del testigo), que abarca los tamaños de poros mayores de 500 μm de radio, y se ha estudiado un total de 20 láminas delgadas, de las cuales se han obtenido unas 600 imágenes al BSEM, en relación al intervalo de porosidad situada por debajo de las 500 μm (Figura 4.75).

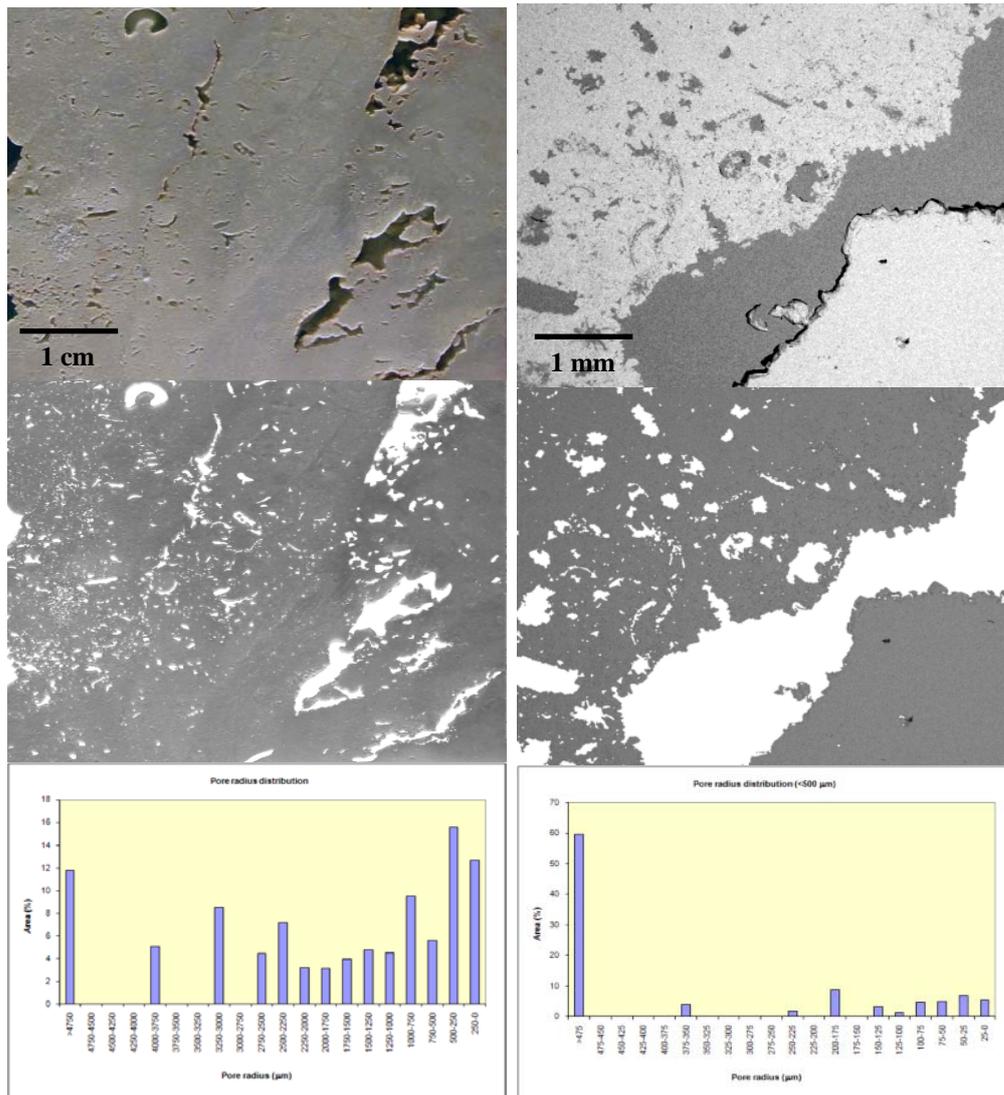


Figura 4.75.- Esquema ilustrativo que muestra el procedimiento seguido en el análisis digital de imágenes utilizado para el estudio de la porosidad. Las imágenes macroscópicas tomadas con luz lateral (destacar la porosidad) han sido utilizadas para la fracción porosa superior a 500 μm de radio (izquierda). Las imágenes obtenidas al microscopio electrónico de barrido han servido para la fracción de poros con tamaños inferiores a las 500 μm de radio (derecha).

El resto de los pequeños cilindros de roca obtenidos han sido ensayados mediante porosimetría de inyección de mercurio. El equipo utilizado ha sido un equipo de la casa Micromeritics, modelo AUTOPORE III, capaz de generar una presión máxima de 33.000 psi, y cuyo rango de detección de radios de acceso de poro oscila entre 360-0,0001 μm .

La metodología seguida ha sido la siguiente: para cada uno de los testigos de sondeo estudiados a lo largo de este trabajo, se han ensayado entre 4 – 8 muestras con unos tamaños de unos 2,5 cm de altura y 1,6 cm de diámetro. Sometiendo cada una de las muestras ensayadas a 2 ciclos de inyección de mercurio (Figura 4.76).



Figura 4.76.- Izquierda; Detalle del equipo AUTOPORE III (Micromeritics) utilizado en los ensayos de inyección de mercurio. Derecha; Detalle de una muestra dentro de un penetrómetro, que se introducen dentro de las cámaras de baja y alta presión del porosímetro.

4.4.3.- Resultados obtenidos

Aunque los análisis llevados a cabo en este capítulo 4.4, proporcionar nuevos datos de porosidad abierta (accesible y atrapada), que permiten comparar los resultados proporcionados por las diferentes técnicas utilizadas, y ponen nuevamente de manifiesto importantes diferencias dentro de las seis litofacies estudiadas, son los datos referidos a la configuración de los sistemas porosos los que muestran un mayor interés en este caso. Así, tanto la distribución de los tamaños de poros como de los conductos que unen éstos han sido estudiados mediante proceso digital de imágenes y porosimetría de inyección de mercurio respectivamente.

El análisis de los sistemas porosos bajo **proceso digital de imágenes (PDI)**, refleja valores medios de radio de poro de $21 \pm 9 \mu\text{m}$ (Tabla 4.17). Por litofacies, los valores medios más elevados han sido medidos en el tramo inferior del lagoon externo ($36 \pm 42 \mu\text{m}$), si bien, tal y como refleja la desviación típica obtenida, este valor está controlado por el tamaño de poro del testigo MC2-O5, correspondiente a una zona dolomitizada con generación de porosidad secundaria, que da lugar a valores medios de más de $100 \mu\text{m}$ de radio de poro. Por el contrario, tal y como cabría esperar, los valores medios de radio de poro más pequeños se localizan en la parte más baja del talud proximal (MC2-Y: $3,09 \mu\text{m}$) y en el talud distal (MC2-Z: $4,56 \mu\text{m}$). En lo referente al resto de los testigos estudiados los valores medios son relativamente homogéneos, situándose siempre entre 10 y $30 \mu\text{m}$ (Figura 4.77).

Tabla 4.17.- Valores de porosidad abierta, radio medio de poro, superficie específica (S_v) y factores morfológicos: factor de forma circular (FC) y factor de forma rugosa (FR).

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Parámetros obtenidos mediante proceso digital de imágenes				
			Porosidad abierta (%)	Radio medio de poro (μm)	Sup. específica S_v (μm^{-1})	Factor de forma circular FC	Factor de forma rugosa FR
MC2-A2	1,95-1,98	Lagoon interno	11,76 ± 12,36	27,65 ± 15,11	0,0054 ± 0,006	0,000014 ± 0,000038	0,79 ± 0,19
MC2-B4	5,96-5,98		16,49 ± 7,51	7,05 ± 6,14	0,0821 ± 0,108	0,001455 ± 0,008230	0,81 ± 0,02
MC2-D3	14,51-14,54	Lagoon externo	41,39 ± 8,95	30,98 ± 9,14	0,0162 ± 0,0050	0,003110 ± 0,001959	0,83 ± 0,01
MC2-E5	17,47-17,49		30,67 ± 4,42	13,50 ± 5,82	0,0318 ± 0,0160	0,001819 ± 0,000994	0,80 ± 0,01
MC2-F3	19,43-19,46		38,12 ± 12,30	12,00 ± 7,64	0,0878 ± 0,1565	0,012765 ± 0,004569	0,81 ± 0,02
MC2-G1	21,26-21,32		26,29 ± 10,46	17,18 ± 6,78	0,0182 ± 0,0140	0,002512 ± 0,003165	0,81 ± 0,01
MC2-K2	33,32-33,35	Parche arrecifal	32,87 ± 8,65	9,60 ± 8,84	0,1456 ± 0,2427	0,002450 ± 0,002134	0,80 ± 0,01
MC2-L2	34,29-34,32		22,19 ± 11,58	22,21 ± 19,69	0,2111 ± 0,0275	0,013418 ± 0,013281	0,79 ± 0,01
MC2-N3	42,31-42,34	Lagoon externo	25,34 ± 8,34	21,79 ± 16,19	0,0174 ± 0,0155	0,005601 ± 0,002282	0,80 ± 0,01
MC2-O1	48,12-48,16		12,23 ± 5,92	10,49 ± 4,51	0,0144 ± 0,0064	0,002006 ± 0,001774	0,80 ± 0,006
MC2-O5	48,29-48,32		26,92 ± 20,08	100,78 ± 156,23	0,0088 ± 0,0217	0,045486 ± 0,048360	0,80 ± 0,02
MC2-P5	50,71-50,74		27,93 ± 4,50	14,43 ± 7,74	0,0258 ± 0,0148	0,002433 ± 0,001131	0,80 ± 0,01
MC2-R2	56,56-56,59		Barrera	21,14 ± 13,02	22,91 ± 13,57	0,0125 ± 0,0136	0,007729 ± 0,006229
MC2-T5	60,92-60,95	Talud proximal	21,44 ± 7,67	9,68 ± 5,51	0,0373 ± 0,0315	0,001364 ± 0,000892	0,80 ± 0,005
MC2-V2	69,85-69,88		21,45 ± 7,50	14,67 ± 6,02	0,0201 ± 0,0133	0,001741 ± 0,001065	0,82 ± 0,02
MC2-Y2	81,02-81,05		23,79 ± 15,64	15,24 ± 15,84	0,03471 ± 0,0582	0,003456 ± 0,000345	0,79 ± 0,03
MC2-Y2	85,39-85,42		30,10 ± 3,60	3,09 ± 0,25	0,0971 ± 0,0042	0,000714 ± 0,000177	0,79 ± 0,003
MC2-Z5	89,06-89,08		Talud distal	21,92 ± 5,47	4,56 ± 4,00	0,0866 ± 0,0560	0,000987 ± 0,000346

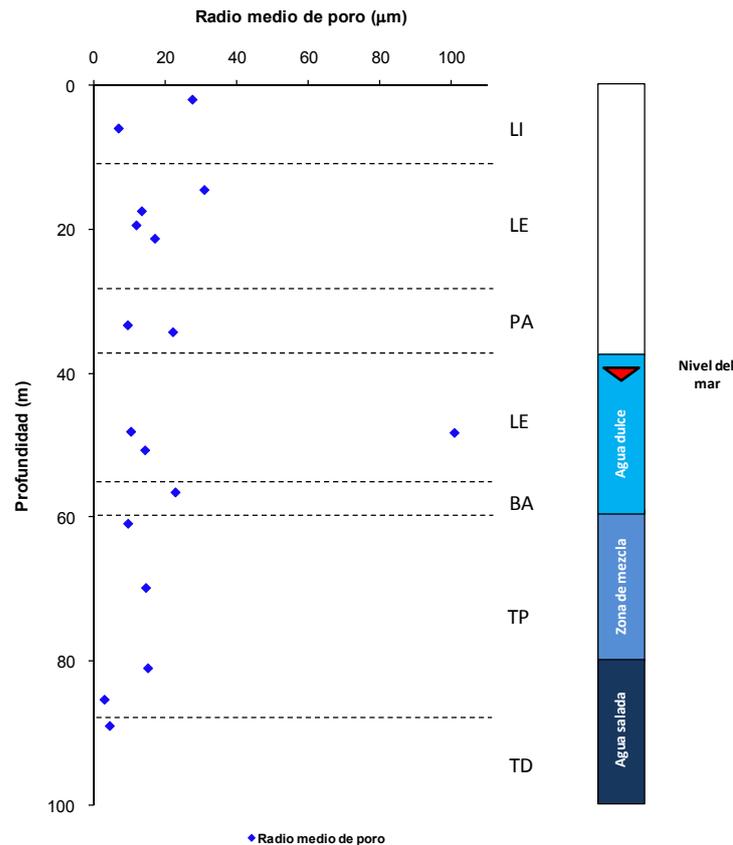


Figura 4.77.- Perfiles donde se recogen los valores de radio medio de poro, obtenidos mediante proceso digital de imágenes macroscópicas (macros con luz lateral) y microscópicas (BSEM) de cada uno de los testigos de sondeo estudiados. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

En lo que se refiere a las distribuciones de tamaños de poros obtenidas para las distintas litofacies no cabe hablar de un patrón claro para todo el conjunto, ni incluso en la mayor parte de los casos de un patrón típico dentro de una misma litofacies, lo que refleja, una vez más, la complejidad y variabilidad de los sistemas porosos de las litofacies definidas dentro de la plataforma carbonatada (Figuras 4.78 a 4.82).

Si se establece el valor de 500 µm de radio de poro como umbral entre poros macroscópicos y microscópicos, y se atiende al área ocupada por cada uno de ellos, se puede hablar de rocas macroporosas (más del 50 % del área ocupada por poros corresponden con macroporos) y rocas microporosas (más del 50 % del área ocupada por poros corresponden con microporos). La tabla 4.18 sintetiza el tipo de porosidad que en cuanto a tamaño de poro se refiere presentan las distintas litofacies estudiadas.

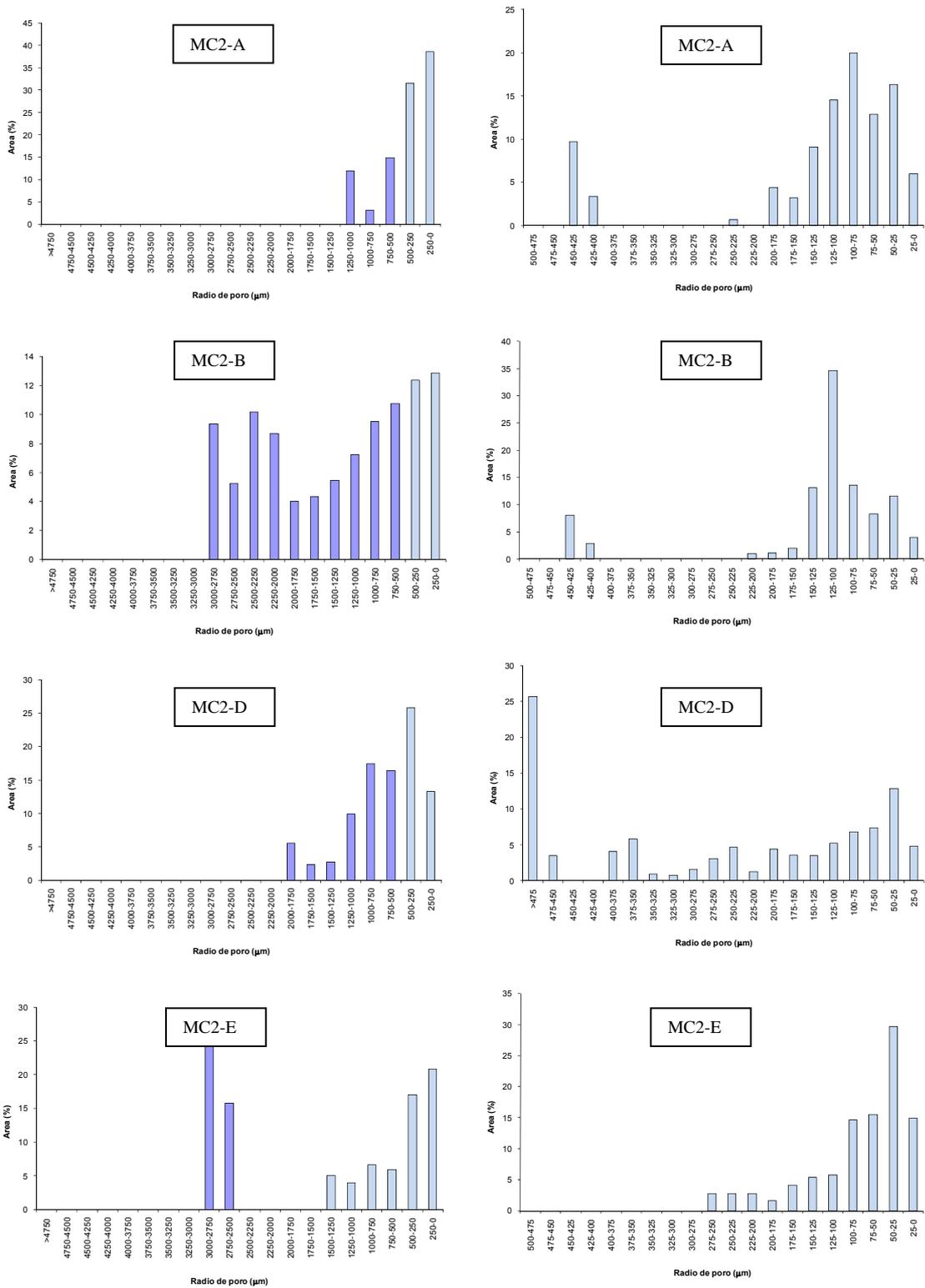


Figura 4.78.- Histogramas de distribución de tamaños de poro (expresados en radios) obtenidos para las muestras MC2-A y MC2-B (Lagoon interno), y MC2-D y MC2-E (Lagoon externo – Tramo superior). En cada caso, el gráfico de la izquierda incluye todos los tamaños de poros detectados en la roca, es decir, los valores superiores a 500 µm, obtenidos por procesado de imágenes macroscópicas, y los valores inferiores a partir de imágenes de SEM. Por su parte, el gráfico de la derecha muestra la distribución de tamaños referidas al 100 %, de los tamaños de poro situados por debajo de 500 µm.

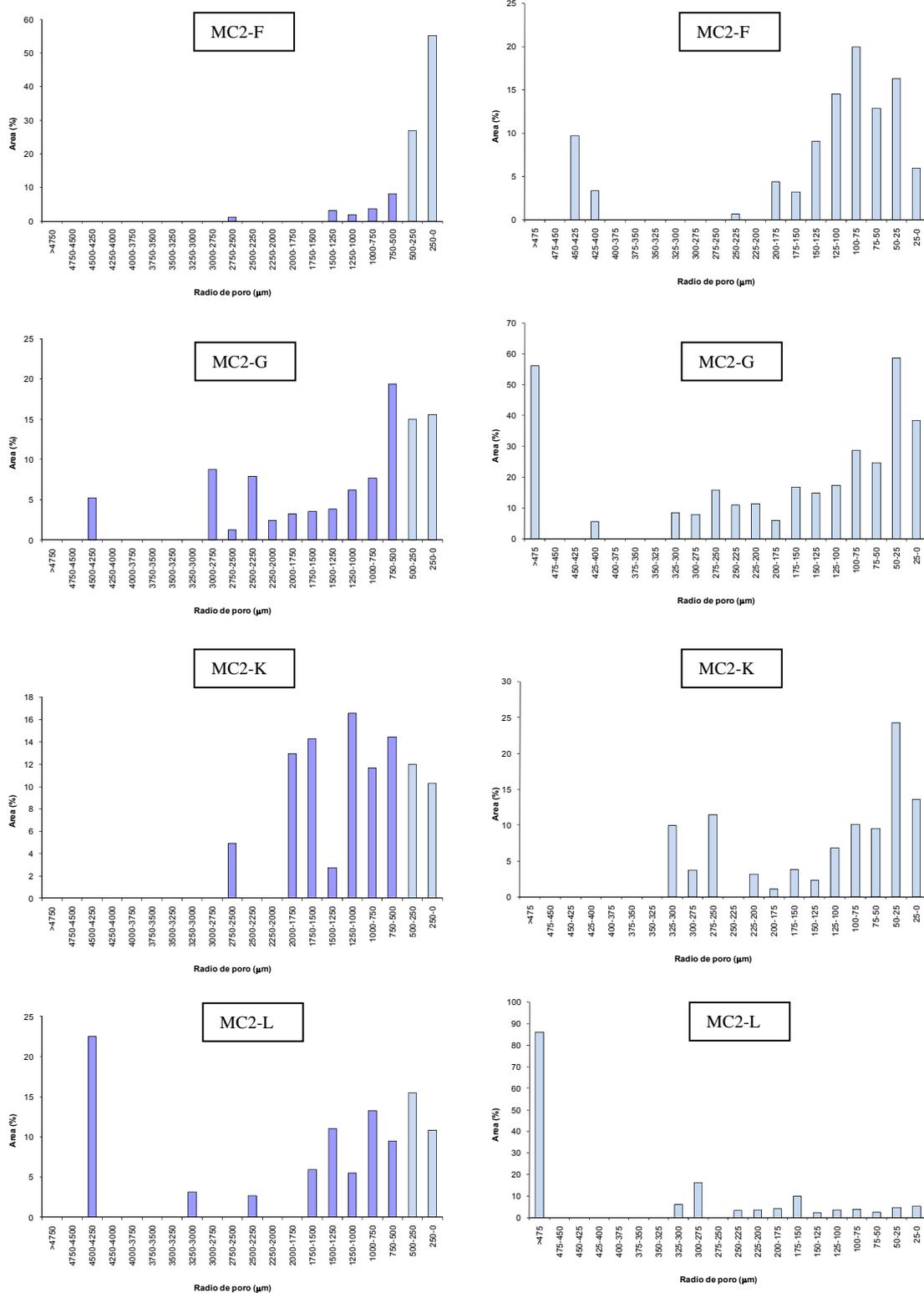


Figura 4.79.- Histogramas de distribución de tamaños de poro (expresados en radios) obtenidos para las muestras MC2-F y MC2-G (Lagoon externo – Tramo superior), y MC2-K y MC2-L (Parche arrecifal). En cada caso, el gráfico de la izquierda incluye todos los tamaños de poros detectados en la roca, es decir, los valores superiores a 500 μm , obtenidos por procesamiento de imágenes macroscópicas, y los valores inferiores obtenidos a partir de imágenes de SEM. Por su parte, el gráfico de la derecha muestra la distribución de tamaños referidos al 100 %, de los tamaños de poro situados por debajo de 500 μm .

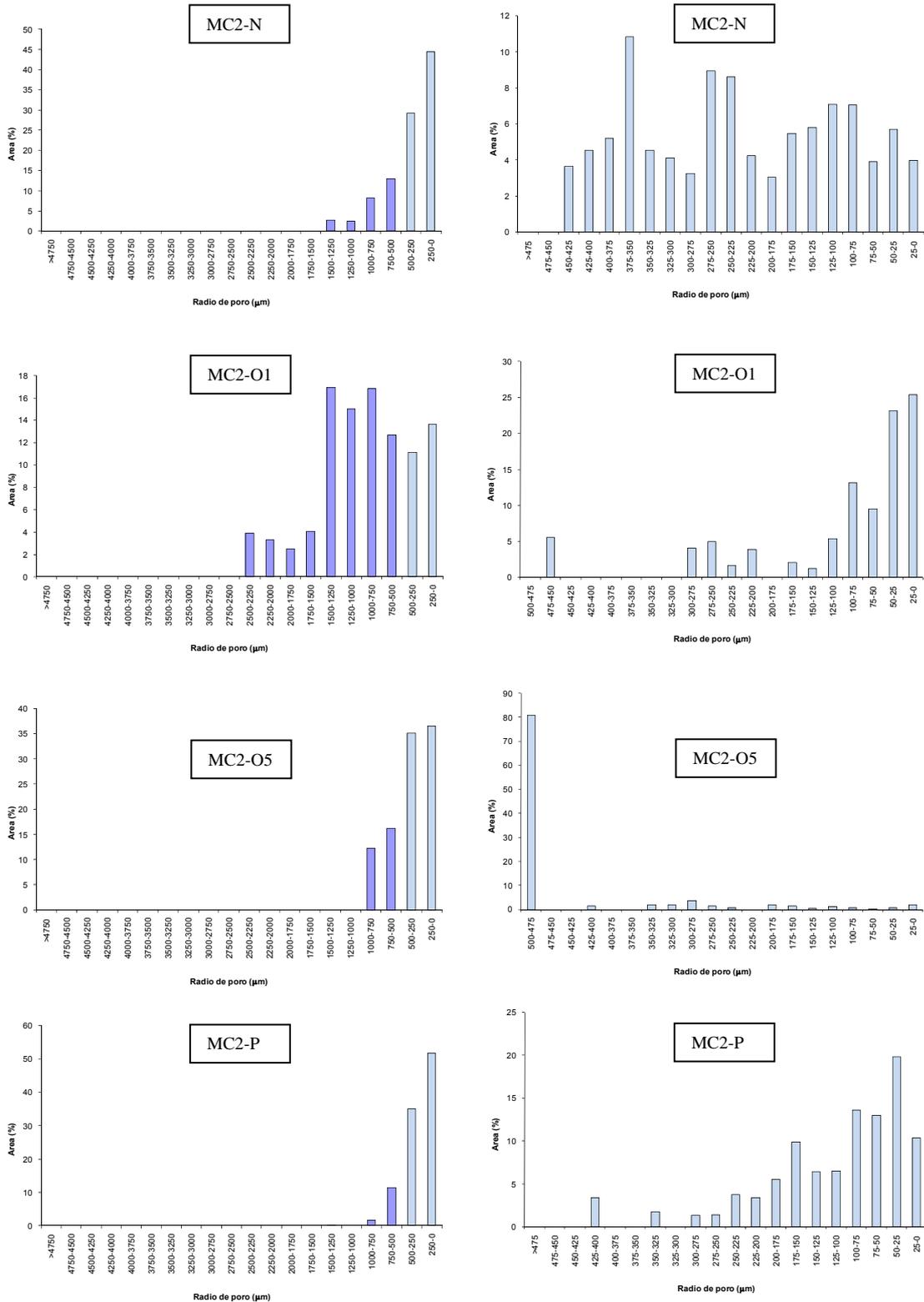


Figura 4.80.- Histogramas de distribución de tamaños de poro (expresados en radios) obtenidos para las muestras MC2-N, MC2-O1, MC2-O5 y MC2-P (Lagoon externo – Tramo inferior) En cada caso, el gráfico de la izquierda incluye todos los tamaños de poros detectados en la roca, es decir, los valores superiores a 500 μm, obtenidos por procesamiento de imágenes macroscópicas, y los valores inferiores obtenidos a partir de imágenes de SEM. Por su parte, el gráfico de la derecha muestra la distribución de tamaños referidas al 100 %, de los tamaños de poro situados por debajo de 500 μm.

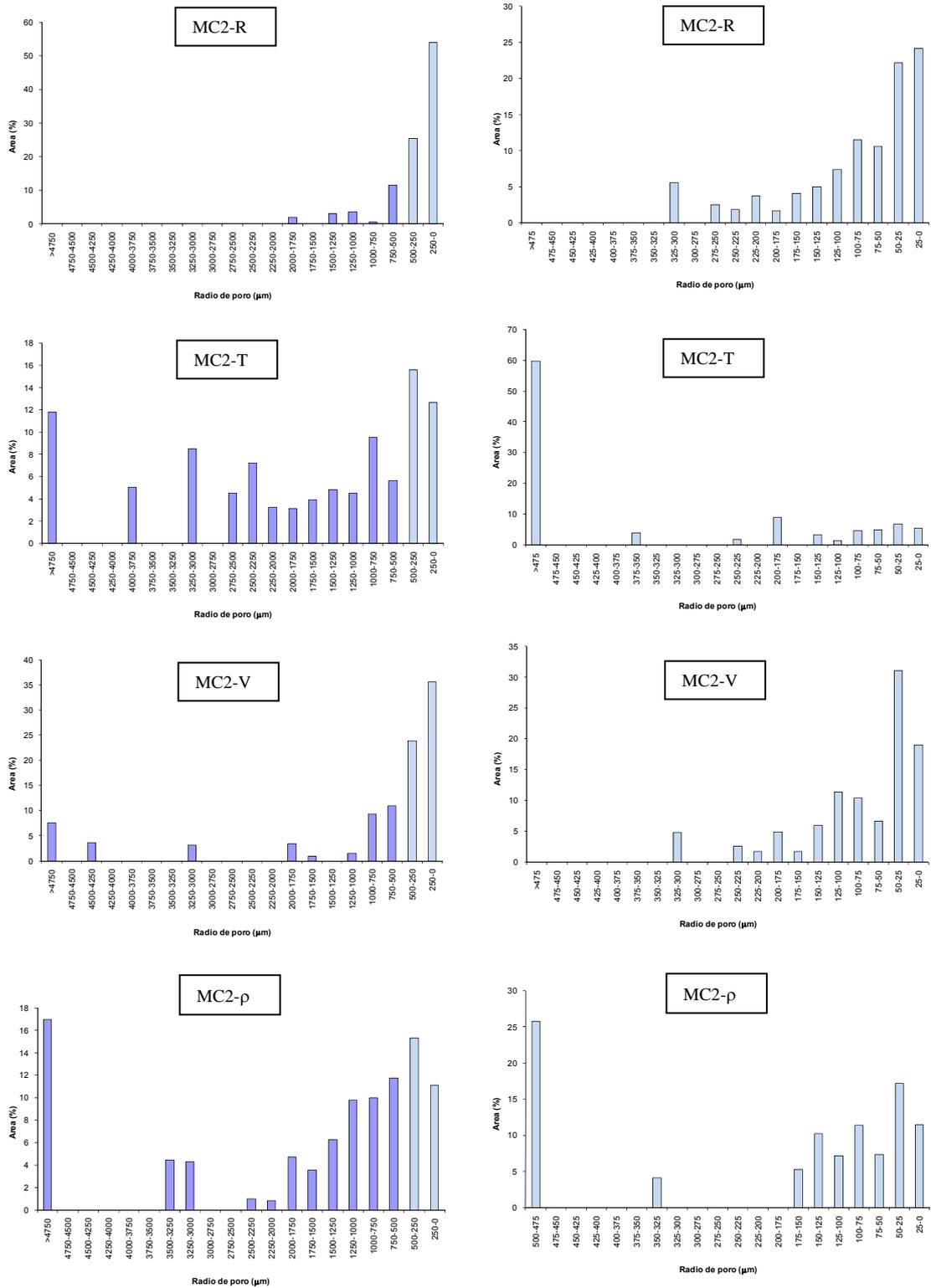


Figura 4.81.- Histogramas de distribución de tamaños de poro (expresados en radios) obtenidos para las muestras MC2-R (Barrera arrecifal), MC2-T, MC2-V y MC2-ρ (Talud proximal). En cada caso, el gráfico de la izquierda incluye todos los tamaños de poros detectados en la roca, es decir, los valores superiores a 500 μm, obtenidos por procesamiento de imágenes macroscópicas, y los valores inferiores obtenidos a partir de imágenes de SEM. Por su parte, el gráfico de la derecha muestra la distribución de tamaños referidas al 100 %, de los tamaños de poro situados por debajo de 500 μm.

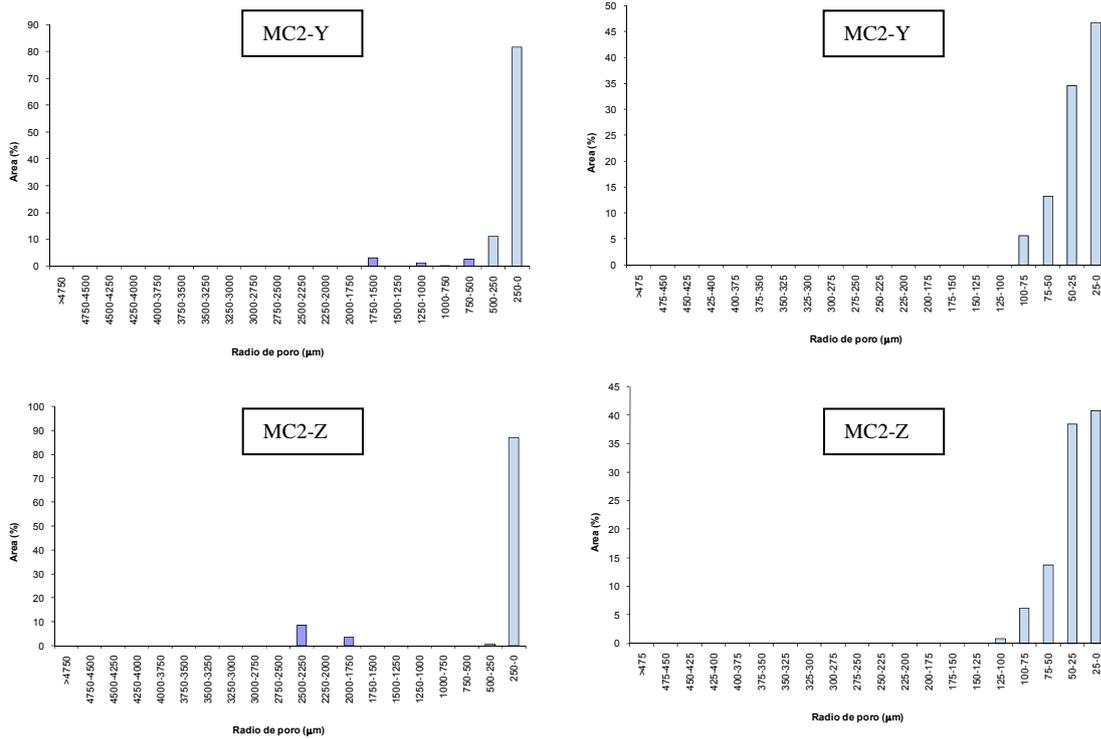


Figura 4.82.- Histogramas de distribución de tamaños de poro (expresados en radios) obtenidos para las muestras MC2-Y (base del talud proximal) y MC2-Z (Talud distal). En cada caso, el gráfico de la izquierda incluye todos los tamaños de poros detectados en la roca, es decir, los valores superiores a 500 μm, obtenidos por procesamiento de imágenes macroscópicas, y los valores inferiores obtenidos a partir de imágenes de SEM. Por su parte, el gráfico de la derecha muestra la distribución de tamaños referidas al 100 %, de los tamaños de poro situados por debajo de 500 μm.

Tabla 4.18.- Porcentaje de porosidad correspondiente con poros mayores de 500 μm (macroporosidad) y menores de 500 μm (microporosidad) obtenidas tras procesar digitalmente imágenes macroscópicas y microscópicas de las muestras estudiadas.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Tipo de porosidad dominante	
			Macroporosidad (%)	Microporosidad (%)
MC2-A2	1,95-1,98	Lagoon interno	30,01	69,99
MC2-B4	5,96-5,98		74,74	25,26
MC2-D3	14,51-14,54	Lagoon externo	54,46	39,04
MC2-E5	17,47-17,49		62,14	37,86
MC2-F3	19,43-19,46		17,98	82,02
MC2-G1	21,28-21,32		69,42	30,58
MC2-K2	33,32-33,35	Parche arrecifal	77,72	22,28
MC2-L2	34,29-34,32		73,67	26,33
MC2-N3	42,31-42,34	Lagoon externo	26,29	76,31
MC2-O1	48,12-48,16		75,24	24,76
MC2-O5	48,29-48,32		28,47	71,53
MC2-P5	50,71-50,74		13,35	86,65
MC2-R2	56,56-56,59	Barrera	71,74	28,26
MC2-T5	60,92-60,95	Talud proximal	20,56	79,43
MC2-V2	69,85-69,88		40,54	59,46
MC2-W2	81,02-81,05		73,59	26,41
MC2-Y2	85,39-85,42		7,40	92,60
MC2-Z5	89,06-89,08	Talud distal	12,15	87,85

Los valores medios de superficie específica obtenidos para la totalidad de las litofacies estudiadas se sitúa en $0,06 \pm 0,06 \mu\text{m}^{-1}$. Estos bajos valores de superficie específica, hacen referencia únicamente a las paredes de los poros, sin considerar los conductos que unen éstos, verdaderos responsables de los elevados valores de superficie específica que suelen mostrar este tipo de rocas. Salvo la muestra MC2-O5, que como reflejo de un mayor tamaño de poro presenta valores de superficie específica algo menores ($0,0088 \mu\text{m}^{-1}$) y la muestra MC2-L, con valores mucho mayores ($0,21 \mu\text{m}^{-1}$), el resto de las muestras presentan valores próximos a la media, que siguen una relación potencial (Figura 4.83).

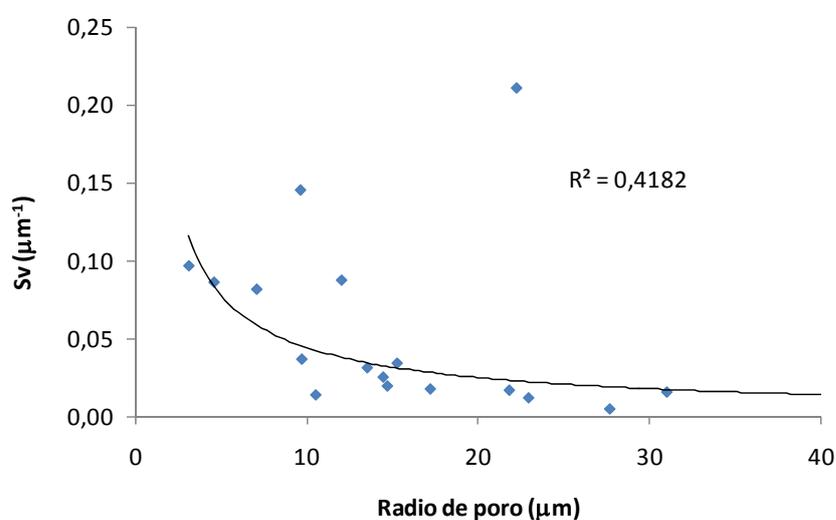
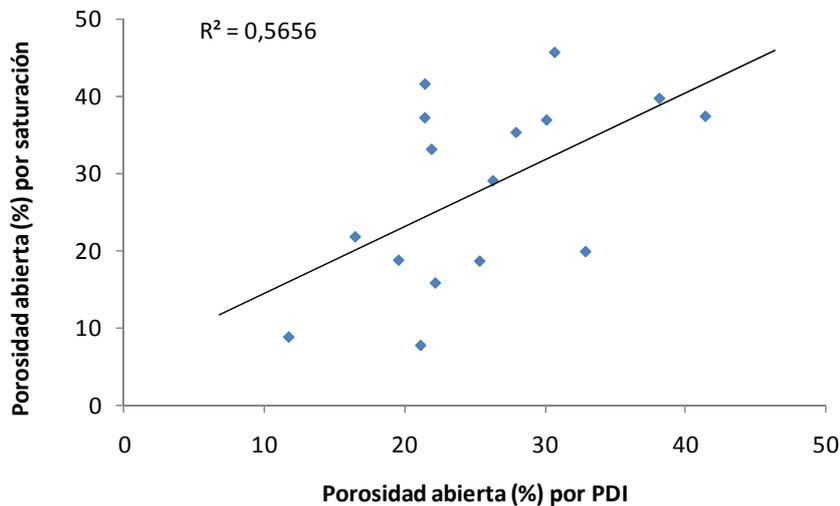


Figura 4.83.- Representación gráfica del tamaño de los poros (radio) y la superficie específica obtenida. Se puede observar como el tipo de relación que mejor se ajusta es de tipo potencial.

La forma de los poros, deducida de los factores de forma circular (FC) y de forma rugosa (FR), y confirmada mediante las observaciones realizadas bajo las diferentes técnicas microscópicas utilizadas a lo largo de este trabajo, pone de manifiesto la presencia de poros, que en mayor o en menor medida muestran morfologías muy irregulares y poco equidimensionales. Los valores medios de FC se sitúan en $0,06 \pm 0,06$; muy lejos por lo tanto del valor 1 que refleja morfologías circulares. Los mayores valores han sido obtenidos en las muestras MC2-O5 (0,045) y MC2-L (0,013), como reflejo de los procesos de los respectivos procesos de dolomitización y disolución kárstica asociados a ambos. Por su parte, los valores de FR obtenidos son muy uniformes para todas las muestras estudiadas ($0,8 \pm 0,007$), lo que pone de manifiesto cierta similitud en los poros en lo que a la elevada tortuosidad de los mismos se refiere.

Finalmente, en lo referente a los valores de porosidad abierta se refiere, cabe destacar la moderada relación lineal existente entre los datos presentados en el capítulo 4.2, obtenidos mediante saturación forzada de agua de los testigos completos y los obtenidos en este capítulo mediante proceso digital de imagen (PDI) de láminas delgadas impregnadas con resinas fluorescentes (Figura 4.84). Es obvio, que ambas técnicas no dan los mismos resultados, dada la extraordinaria complejidad de los sistemas porosos estudiados y la diferente resolución y/o escala de observación utilizadas. Son los valores obtenidos por absorción forzada de agua los más representativos, por utilizar el testigo completo para su medición, tener un carácter tridimensional e incluir los conductos y no sólo los poros. Por lo tanto, serán éstos los que se tomarán a consideración a la hora de describir las diferentes litofacies estudiadas.



4.84.- Representación gráfica del tamaño de los poros (radio) y la superficie específica obtenida. Se puede observar como el tipo de relación que mejor se ajusta es de tipo potencial.

Los resultados obtenidos mediante **porosimetría de inyección de mercurio**, en consonancia con los resultados obtenidos en los ensayos hidráulicos (capítulo 4.2) y con los datos del PDI, reflejan que los valores medios más elevados de porosidad abierta (accesible al Hg) corresponden al talud distal y proximal respectivamente, seguido muy de cerca por el tramo superior del lagoón externo. Éstos valores se sitúan en estas tres litofacies próximos al 40 % (Tabla 4.19), alcanzando algunas de las muestras estudiadas valores superiores al 45 % (Figura 4.85).

Ligeramente inferiores han sido los valores medios obtenidos en el tramo inferior del lagoon externo (a excepción de la base), tramo no carstificado de la barrera coralina y el parche arrecifal, litofacies con valores medios de porosidad abierta próximos al 23 %. Una vez más, los valores más bajos corresponden al lagoon interno (12 %), alcanzando algunas de las muestras correspondientes al nivel oolítico valores inferiores al 7 %.

En este caso, existe una buena relación lineal entre los datos de porosidad abierta presentados en el capítulo 4.2, obtenidos mediante saturación forzada de agua de los testigos completos y los obtenidos por porosimetría de inyección de mercurio a lo largo de este capítulo (Figura 4.86).

Tabla 4.19.- Valores de porosidad abierta (p_0), porosidad abierta efectiva (p_e) y porosidad abierta no efectiva (p_t), obtenidos mediante la realización de dos ciclos de porosimetría de inyección de mercurio.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Porosidad al mercurio		
			Abierta	Efectiva	No efectiva
			p_0 (%)	p_e (%)	p_t (%)
MC2-A2	1,95-1,98	Lagoon interno	6,7 ± 1,1	3,0 ± 0,4	3,7 ± 0,5
MC2-B4	5,96-5,98		17,6 ± 2,3	4,9 ± 0,6	12,7 ± 1,5
MC2-D3	14,51-14,54	Lagoon externo	34,4 ± 0,8	3,4 ± 0,5	31,0 ± 0,7
MC2-E5	17,47-17,49		40,4 ± 1,5	25,0 ± 0,6	15,4 ± 0,5
MC2-F3	19,43-19,46		36,2 ± 1,8	20,8 ± 0,9	15,4 ± 1,1
MC2-G1	21,28-21,32		44,4 ± 4,3	3,9 ± 0,3	40,5 ± 1,6
MC2-K2	33,32-33,35	Parche arrecifal	28,1 ± 2,3	10,7 ± 0,9	17,4 ± 1,8
MC2-L2	34,29-34,32		18,8 ± 1,6	5,1 ± 0,8	13,7 ± 1,2
MC2-N3	42,31-42,34	Lagoon externo	21,7 ± 1,6	3,5 ± 0,3	18,2 ± 0,8
MC2-O1	48,12-48,16		20,9 ± 1,9	10,9 ± 1,4	10,0 ± 1,2
MC2-O5	48,29-48,32		13,5 ± 2,3	2,8 ± 0,3	10,7 ± 0,6
MC2-P5	50,71-50,74		37,1 ± 3,1	17,5 ± 1,1	19,6 ± 1,7
MC2-R2	56,56-56,59	Barrera	23,5 ± 13,4	10,3 ± 4,3	13,2 ± 4,8
MC2-T5	60,92-60,95	Talud proximal	35,2 ± 1,6	17,6 ± 0,8	17,6 ± 0,7
MC2-V2	69,85-69,88		46,9 ± 4,9	7,7 ± 5,2	39,2 ± 4,3
MC2-p2	81,02-81,05		29,1 ± 1,5	5,5 ± 0,8	23,6 ± 0,7
MC2-Y2	85,39-85,42		37,4 ± 3,6	12,8 ± 2,6	24,6 ± 3,5
MC2-Z5	89,06-89,08	Talud distal	41,7 ± 1,6	14,7 ± 0,5	27,0 ± 0,9

Al igual que en el capítulo 4.2, la técnica de inyección de mercurio ha permitido discriminar, mediante la realización de dos ciclos de inyección consecutivos (Figura 4.87), que parte de la porosidad abierta de la roca carece de funcionalidad hidráulica a corto plazo, por corresponder con poros mal comunicados (porosidad no efectiva o atrapada), y que volumen de la porosidad abierta permite la circulación del agua con facilidad, dada la presencia de poros y conductos bien comunicados y de baja tortuosidad (porosidad efectiva). Los resultados obtenidos aparecen recogidos en la tabla 4.19.

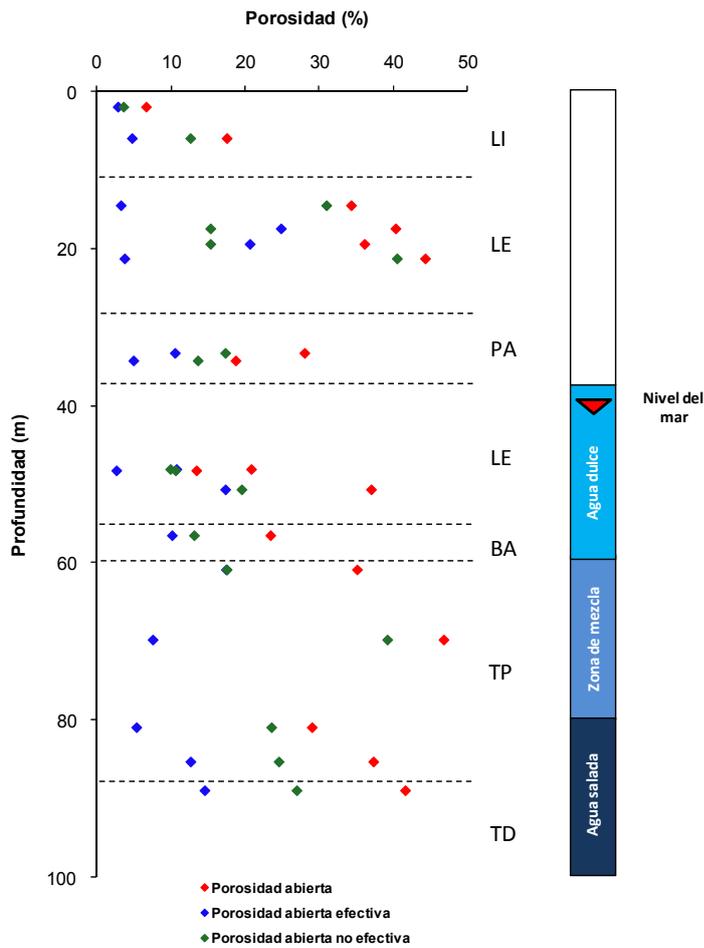


Figura 4.85.- Perfiles donde se recogen los valores de porosidad; abierta, abierta efectiva y abierta no efectiva o atrapada, deducidos de los ensayos de inyección de mercurio, llevados a cabo sobre pequeñas muestras cilíndricas extraídas de cada uno de los testigos de sondeo estudiados. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

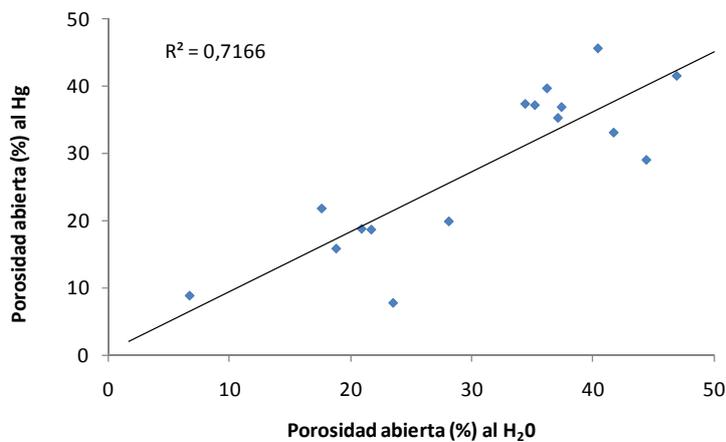


Figura 4.86- Representación gráfica de la relación lineal entre los valores de porosidad abierta obtenidos al agua (capítulo 4.2) y al mercurio (capítulo 4.4)

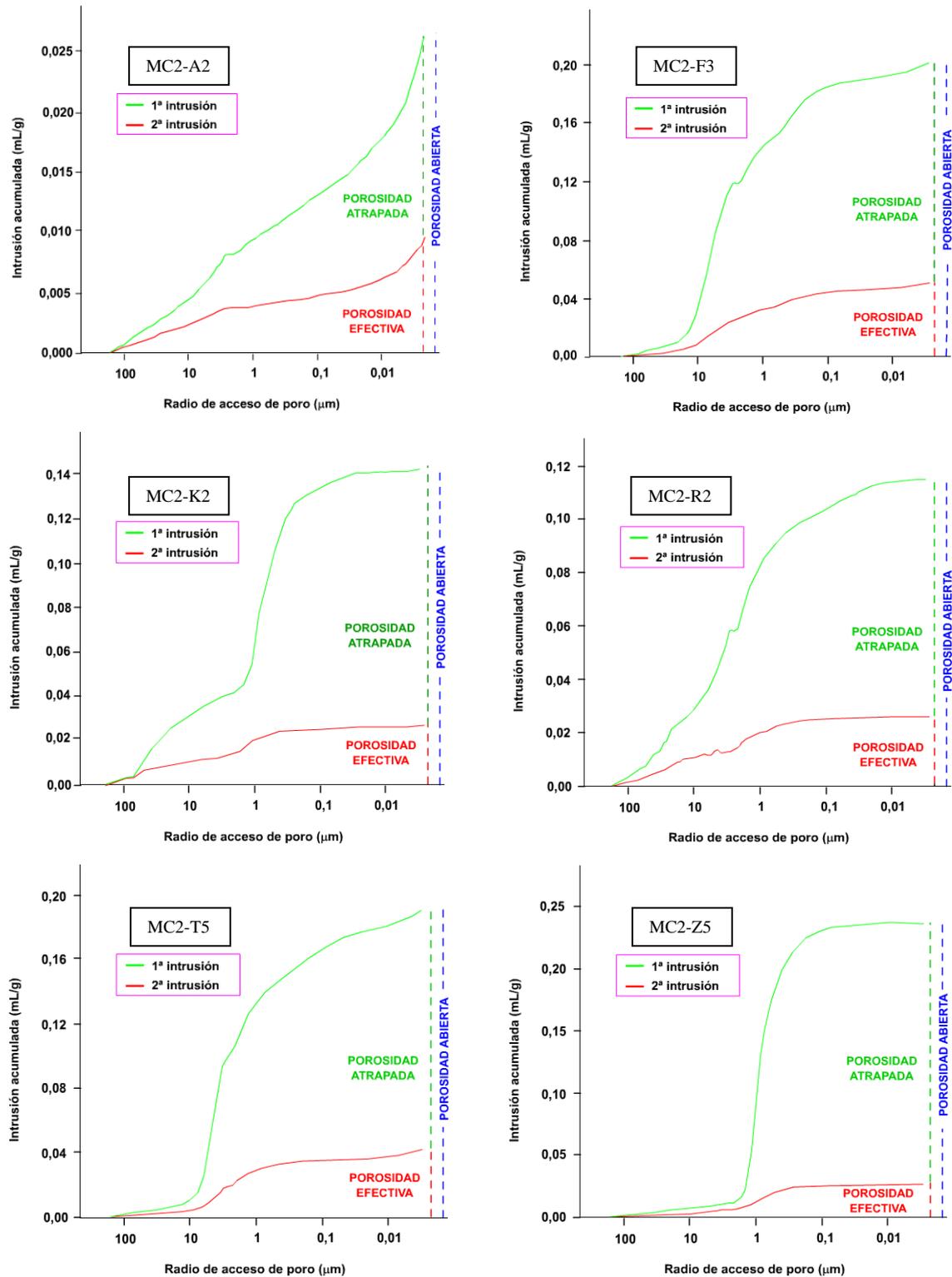


Figura 4.87.- Curvas de intrusión de mercurio obtenidas para algunas de las muestras ensayadas. La realización de dos ciclos consecutivos de inyección permite obtener información del volumen de porosidad abierta que se puede considerar efectiva y que parte de la misma correspondería con una porosidad atrapada, en ambos casos a corto plazo. Para todas las litofacies estudiadas, las muestras estudiadas presentan elevados valores de porosidad atrapada.

De las tablas y gráficos anteriores, se deduce que para cualquiera de las litofacies estudiadas, entre el 56-70 % ($64,8 \pm 4,3$ %) de la porosidad abierta, a escala de roca matriz, está representada por una porosidad no efectiva o atrapada, donde a corto plazo el agua penetrará de manera muy lenta, con suma dificultad, y donde una vez dentro será difícil de sacar o de provocar su movilización.

Para todo el sondeo estudiado, de los valores medios de porosidad abierta inicialmente obtenidos mediante esta técnica ($28,6 \pm 10,8$ %), tan sólo el $10,2 \pm 3,7$ % correspondería a porosidad efectiva, mientras que el $18,8 \pm 7,7$ % restante, estaría en relación con una porosidad no efectiva o atrapada, donde la migración del agua es sumamente costosa.

Estos valores, muy similares a los obtenidos mediante los ensayos hidráulicos, confirman que las diferentes litofacies presentes en la plataforma arrecifal, muestran a escala de roca matriz, sistemas porosos donde al menos una parte importante de los mismos están mal comunicados, constituido predominantemente por conductos estrechos y tortuosos que dificulta la circulación del agua a su través.

Esto es claramente observable en los histogramas de distribución de los radios de acceso de poro obtenidos en los ensayos de inyección de mercurio (Figura 4.88), así como en los diferentes parámetros deducidos de los mismos, y que aparecen recogidos en la tabla 4.20.

Tabla 4.20.- Parámetros porosimétricos obtenidos mediante porosimetría de inyección de mercurio.

Muestra	Profundidad (m)	Facies	Otros parámetros obtenidos mediante porosimetría de inyección de mercurio				
			Radio medio de acceso de poro		Sup. específica	Densidad (Kg/m ³)	
			Media ($\bar{\Delta}$ m)	Mediana ($\bar{\Delta}$ m)	S _v (m ² /g)	Aparente ($\bar{\Delta}_b$)	Real ($\bar{\Delta}_r$)
MC2-A2	1,95-1,98	Lagoon interno	0,012 ± 0,0001	0,10 ± 0,5	4,32 ± 0,34	2491 ± 15	2670 ± 21
MC2-B4	5,96-5,98		0,043 ± 0,021	0,33 ± 0,12	3,62 ± 0,60	2258 ± 17	2740 ± 26
MC2-D3	14,51-14,54	Lagoon externo	0,31 ± 0,06	8,39 ± 0,08	1,25 ± 0,07	1778 ± 10	2711 ± 11
MC2-E5	17,47-17,49		0,625 ± 0,0009	8,36 ± 0,06	0,78 ± 0,06	1645 ± 62	2763 ± 34
MC2-F3	19,43-19,46		0,096 ± 0,006	4,18 ± 0,12	4,18 ± 0,08	1806 ± 26	2832 ± 12
MC2-G1	21,28-21,32		0,29 ± 0,02	2,11 ± 0,08	2,11 ± 0,06	1427 ± 125	2567 ± 25
MC2-K2	33,32-33,35	Parche arrecifal	0,021 ± 0,0005	0,087 ± 0,022	1,34 ± 0,19	1966 ± 23	2732 ± 14
MC2-L2	34,29-34,32		0,012 ± 0,003	1,66 ± 0,25	1,39 ± 1,32	2235 ± 61	2754 ± 16
MC2-N3	42,31-42,34	Lagoon externo	0,189 ± 0,004	0,70 ± 0,06	1,07 ± 0,06	2139 ± 36	2734 ± 15
MC2-O1	48,12-48,16		0,249 ± 0,006	1,15 ± 0,09	1,04 ± 0,03	1616 ± 23	2353 ± 36
MC2-O5	48,29-48,32		0,12 ± 0,02	1,01 ± 0,05	0,93 ± 0,05	2044 ± 33	2720 ± 45
MC2-P5	50,71-50,74		0,307 ± 0,02	5,48 ± 0,39	1,43 ± 0,02	1691 ± 48	2691 ± 65
MC2-R2	56,56-56,59	Barrera	0,25 ± 0,02	2,67 ± 0,14	0,93 ± 0,35	2040 ± 45	2666 ± 11
MC2-T5	60,92-60,95	Talud proximal	0,076 ± 0,0005	3,07 ± 0,03	4,75 ± 0,8	1886 ± 17	2911 ± 18
MC2-V2	69,85-69,88		0,482 ± 0,008	3,54 ± 0,65	1,42 ± 0,24	1374 ± 94	2592 ± 35
MC2-□	81,02-81,05		0,22 ± 0,03	1,27 ± 0,09	1,40 ± 0,05	1929 ± 21	2719 ± 8
MC2-Y2	85,39-85,42		0,801 ± 0,0005	1,75 ± 0,14	0,551 ± 0,007	1695 ± 37	2709 ± 12
MC2-Z5	89,06-89,08	Talud distal	1,38 ± 0,06	0,89 ± 0,08	0,34 ± 0,04	1761 ± 15	3022 ± 89

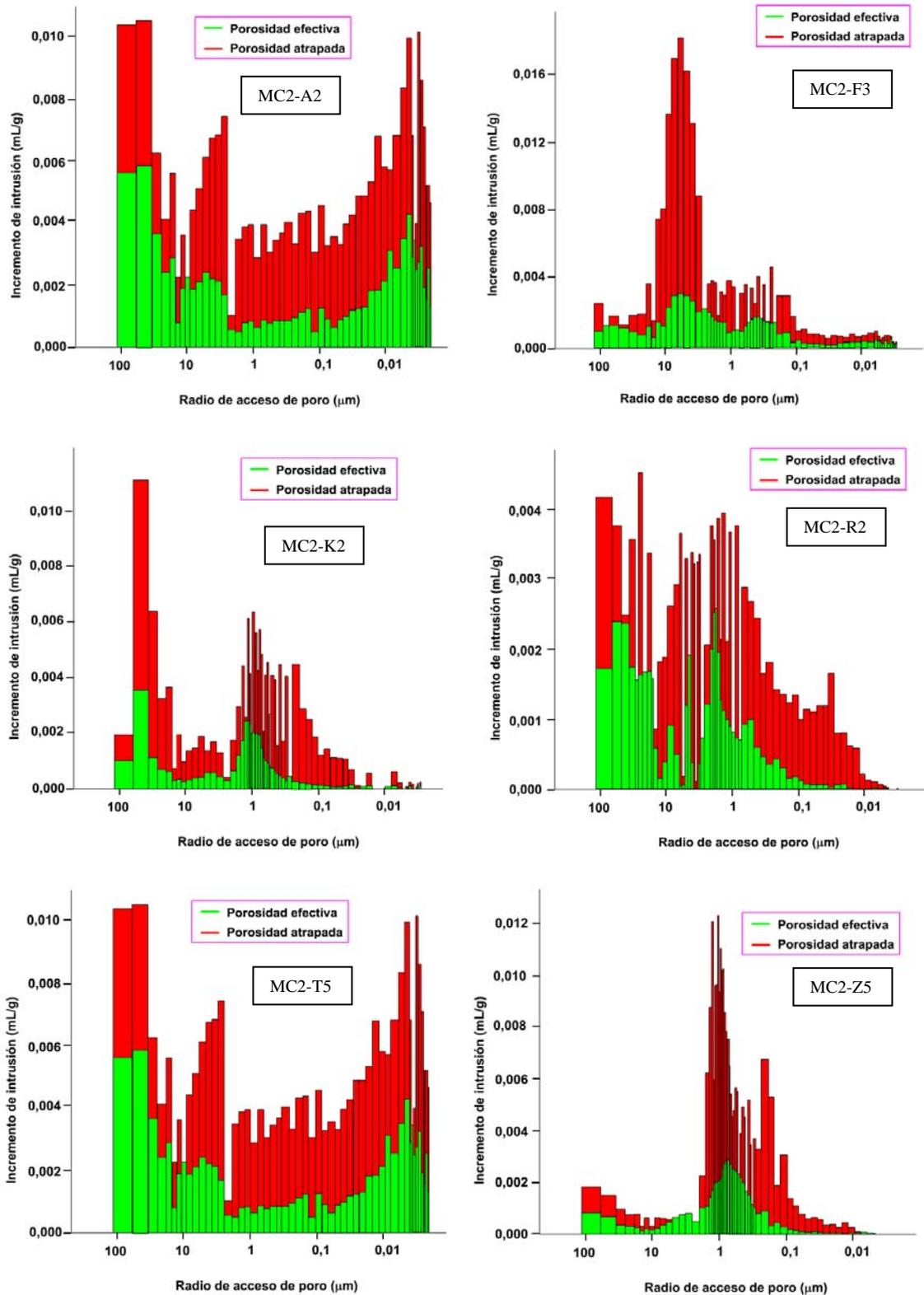


Figura 4.88.- Histograma de distribución de radios de acceso de poro obtenidas para algunas de las muestras ensayadas. La realización de dos ciclos consecutivos de inyección permite obtener información de los rangos de acceso de poro a través de los cuales la porosidad accesible se puede considerar efectiva y que parte de la misma correspondería con una porosidad atrapada, en ambos casos a corto plazo. Para todas las litofacies estudiadas, las muestras estudiadas presentan elevados valores de porosidad atrapada.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los aspectos descritos dentro del presente subcapítulo, y para cada una de las litofacies establecidas dentro del área de estudio de Ses Sitjoles desarrolladas a lo largo del trabajo, se pueden sintetizar que:

- ✚ Lagoon interno (LI): las muestras correspondientes al lagoon interno, tanto en el tramo superior oolítico (MC2-A) como en el inferior fangoso (MC2-B), ponen de manifiesto la presencia de rocas predominantemente microporosas, tanto desde un punto de vista de sus tamaños medios de poro (predominio de poros con radio inferior a $<500 \mu\text{m}$) como desde un punto de vista de sus conductos (predominio de radios de acceso de poro inferiores a las $7,5 \mu\text{m}$).

Los radios medios de poro alcanzan valores de $27 \mu\text{m}$ (MC2-A) y $7 \mu\text{m}$ (MC2-B) respectivamente, donde casi el 70 % y 25 % de los mismos han sido identificados como microporos, siguiendo en el primero de los casos una distribución según una campana de gauss, cuyo máximo se sitúa alrededor de las $75\text{-}100 \mu\text{m}$ coincidiendo con el tamaño de grano de los oolitos, y una distribución polimodal en el segundo. Los factores morfológicos obtenidos, con factores de forma circular muy pequeños, y factores de forma rugosa muy altos evidencian en ambas rocas poros poco circulares (muy irregulares) y relativamente poco rugosos.

Los conductos que unen dichos poros presentan radios de acceso de $0,012$ y $0,043 \mu\text{m}$ (media); $0,10$ y $0,33 \mu\text{m}$ (mediana) para las muestras MC2-A y MC2-B respectivamente. En el lagoon oolítico, la fuerte pendiente del tramo final de la curva de intrusión de mercurio, pone además de manifiesto la presencia de radios de acceso de poro situados por debajo del límite de detección del equipo utilizado. En ambos casos, la distribución de los radios de acceso es marcadamente polimodal, evidenciando los dos ciclos realizados sobre todas las muestras la presencia de porosidades atrapadas próximas al 55 y 70 % respectivamente, coincidiendo con los valores obtenidos en el capítulo 4.2.

- ✚ Lagoon externo (LE): una vez más, en términos generales se puede decir que el tramo superior del lagoon externo (MC2-D3, MC2-E3, MC2-F2 y MC2-G2), muestra un comportamiento diferente el tramo inferior del mismo (MC2-N2, MC2-O3 y MC2-P2), situado por debajo del parche arrecifal.

Dentro de este tramo superior, en base a los tamaños de poros de sus sistemas porosos, se pueden separar dos muestras microporosas (MC2-E y MC2-F), donde aproximadamente el 37 y 82 % de los de los poros han sido identificados como microporos, y dos muestras macroporosas (MC2-D y MC2-G), donde el 55 y 69 % de los poros observados corresponden con macroporos, estas últimas marcadas por la presencia de una textura grainstone de grano grueso y una textura rudstone respectivamente.

El radio medio de poro para todo el tramo se sitúa en $20 \pm 5 \mu\text{m}$, con valores individualizados algo menores en las muestras microporosas ($13 \mu\text{m}$ en MC2-E y $12 \mu\text{m}$ en MC2-F) que en las macroporosas ($30,98 \mu\text{m}$ en MC2-D y $17,18 \mu\text{m}$ en MC2-G). La distribución de los tamaños de poros es similar en las muestras microporosas, siguiendo una campana de gauss claramente sesgada hacia los valores más pequeños. Por su parte, las rocas macroporosas muestran una distribución ligeramente diferente, según se trate de la muestra MC2-D, donde la campana de gauss toma valores máximos en el límite macroporosidad-microporosidad, si bien tiene cierto sesgo hacia los valores superiores a $500 \mu\text{m}$ (límite aleatorio establecido en esta tesis) de dicha distribución, o la muestra MC2-G donde la distribución es totalmente aleatoria y con un claro predominio de los valores mayores. Como en el caso anterior, los factores morfológicos obtenidos, con factores de forma circular muy pequeños, y factores de forma rugosa muy altos evidencian en todos los casos poros poco circulares (muy irregulares) y relativamente poco rugosos.

En lo referente a los conductos que unen los poros, y si en este caso se atiende al volumen de poros alimentados por accesos cuyo radio se sitúa por encima o por debajo de $7,5 \mu\text{m}$, las muestras MC2-E pasaría a considerarse una roca macroporosa, mientras que la muestra MC2-G pasaría a considerarse microporosa. En las cuatro muestras estudiadas en este tramo, los conductos que unen los poros presentan algunos de los radios de acceso más elevados de los medidos a lo largo del sondeo; así se han obtenido valores medios para todo el tramo de próximos a $0,3 \pm 0,2 \mu\text{m}$ (media) y $6 \pm 3 \mu\text{m}$ (mediana). Los mayores valores corresponden a la muestra MC2-E ($0,6 \mu\text{m}$), seguidos de las muestras MC2-D y MC2-G con valores medios de radios de acceso próximos a $0,3 \mu\text{m}$. Algo menores son los valores alcanzados por la

muestra MC2-F, que no alcanza los 0,1 μm de radio medio de acceso de poro. En lo relativo a las medianas, los valores obtenidos se sitúan próximos a 8,4 μm (MC2-D y MC2-E), 4,1 μm y 2,1 μm para las dos restantes (MC2-F y MC2-G respectivamente). En lo referente a la distribución que presentan los mismos, en las muestras MC2-F y MC2-G son unimodales, muy marcada en la primera de ellas, con máximos que se sitúan en el intervalo comprendido entre 1-10 μm . Las otras dos muestras presentan un carácter bimodal (MC2-D) con máximo principal entorno a las 10 μm y uno menor entorno a las 0,3 μm , y polimodal (MC2-E) respectivamente. En todos los casos, las porosidades atrapadas puestas de manifiesto por los ensayos de inyección de mercurio son nuevamente elevadas, con valores medios próximos al 65 % de la porosidad abierta en términos relativos, alcanzando valores próximos al 90 % para las muestras MC2-D y MC2-G y valores de alrededor del 40 % para las otras dos muestras analizadas dentro de esta litofacies.

Por su parte, el tramo inferior del lagoon externo, tal y como lo reflejan las muestras estudiadas, presenta sistemas porosos gobernados por poros más pequeños, donde entre el 75-85 % de los poros presentes han sido identificados como microporos (microporosos), a excepción, claro está, del tramo dolomitizado de la muestra MC2-O con un marcado carácter macroporoso.

El radio medio de poro para todo el tramo se sitúa en $36 \pm 42 \mu\text{m}$, si bien, hay que separar claramente los valores obtenidos dentro del tramo dolomitizado de la muestras MC2-O, cuyos radio medio de poro se sitúa por encima de las 100 μm , del tramo no dolomitizado de la misma, y de las otras dos muestras estudiadas dentro de esta litofacies, cuyos valores alcanzan 10-20 μm . La distribución de los tamaños de las muestras microporosas (MC2-N; MC2-P y el tramo no dolomitizado de MC2-O) sigue una campana de Gauss fuertemente sesgada hacia los valores más pequeños. Por el contrario, el tramo dolomitizado de esta última muestra una distribución aleatoria. Una vez más, los factores morfológicos obtenidos, con factores de forma circular muy pequeños, y factores de forma rugosa muy altos evidencian en todos los casos poros poco circulares (muy irregulares) y relativamente poco rugosos. No obstante destacar que el tramo dolomitizado de la muestra MC2-O presenta los

mayores valores de factor de forma circular, lo que evidenciaría un cierto redondeamiento de los poros durante la dolomitización.

Los poros anteriormente descritos, están unidos por conductos cuyos radios medios alcanzan valores relativamente uniformes para las cuatro muestras estudiadas; $0,22 \pm 0,08 \mu\text{m}$ (media) y $2 \pm 2 \mu\text{m}$ (mediana). Los mayores valores corresponden con la muestra MC2-P, con valores de $0,3 \mu\text{m}$ (media) y $5,5 \mu\text{m}$ (mediana), siendo el resto de valores muy similares en todas las muestras estudiadas. A excepción de la muestras MC2-N, con una marcada distribución bimodal (máximos en 30 y $0,3 \mu\text{m}$ respectivamente), el resto de los histogramas muestran distribuciones polimodales.

Nuevamente, las porosidades atrapadas puestas de manifiesto por los ensayos de inyección de mercurio son elevadas, con valores medios próximos al 65% de la porosidad abierta en términos relativos, alcanzando valores próximos al 80% para las muestras MC2-N y MC2-O (en su tramo no dolomitizado) y valores de alrededor del 50% para las otras dos muestras analizadas dentro de esta litofacies.

✚ Parche arrecifal (PR): las dos muestras analizadas dentro del parche arrecifal (MC2-K y MC2-L) muestran una configuración muy similar en lo que a su sistema porosos se refiere.

Los radios medios de poro alcanzan valores de $9,60 \mu\text{m}$ (MC2-K) y $22,21 \mu\text{m}$ (MC2-L) respectivamente, donde casi el 75% de los mismos han sido identificados como macroporos, que en ninguno de las dos muestras guarda una distribución de tamaños ordenada, sino completamente aleatoria, si bien la primera tiene cierta tendencia gaussiana centrada en los mayores valores. Los factores morfológicos obtenidos, con factores de forma circular muy pequeños, y factores de forma rugosa muy altos evidencian en ambas rocas poros poco circulares (muy irregulares) y relativamente poco rugosos.

Los conductos que unen dichos poros presentan radios de acceso de $0,021$ y $0,012 \mu\text{m}$ (media); $0,087$ y $1,66 \mu\text{m}$ (mediana) para las muestras MC2-K y MC2-L respectivamente, lo que pone de manifiesto que se trata de rocas

microporosas en lo que a los canales de unión de la roca se refiere (predominio de radios de acceso de poro inferiores a las 7,5 μm). En ambos casos, la distribución de los radios de acceso es claramente bimodal, con un máximo principal próximo a 1 μm y uno secundario por encima de las 40-50 μm . Una vez más, los dos ciclos realizados sobre las muestras evidencian porosidades atrapadas próximas al 62 y 73 % respectivamente, coincidiendo con los valores obtenidos en el capítulo 4.2.

✚ Barrera coralina (BC): la muestra estudiada dentro de esta litofacies (MC2-R) presenta un comportamiento muy similar a las dos calizas framestone estudiadas dentro del parche arrecifal. Así, se trata nuevamente de una roca predominantemente macroporosas (71 % de los poros > 500 μm), en lo que a sus tamaños de poro se refiere, que pasa a ser microporosa cuando se hace referencia a sus conductos, ya que la mayor parte de los fluidos acceden al seno de la roca a través de conductos con radios inferiores a las 7,5 μm).

El radio medio de poro medido en esta litofacies alcanza valores de 22,91 μm , mostrando una distribución de tamaños muy irregular, si bien destacando la abundancia de macroporos. Los factores morfológicos obtenidos, con factores de forma circular muy pequeños, y factores de forma rugosa muy altos evidencian en ambas rocas poros poco circulares (muy irregulares) y relativamente poco rugosos.

Los conductos que unen dichos poros presentan radios de acceso de 0,25 μm (media) y 2,67 μm (mediana). La distribución de los radios de acceso es marcadamente polimodal, evidenciando los dos ciclos realizados sobre todas las muestras la presencia de porosidades atrapadas próximas al 56 %.

✚ Talud proximal (TP): La zona proximal del talud, representada por tres muestras (MC2-T; MC2-V y MC2-Y), y a excepción de las calizas rudstone que episódicamente se localizan dentro de esta litofacies, aquí representada por la muestra (MC2-p), muestran sistemas porosos con una configuración muy similar.

Predominan dentro de esta litofacies las calizas microporosas, en lo que a los tamaños de poros de sus poros se refiere, donde aproximadamente entre el 60 y el 90 de los de los poros han sido identificados como microporos. La excepción, como se cita con anterioridad viene dada por la muestra MC2-ρ con un marcado carácter macroporoso (73,59 % poros > 500 μm). El valor medio de radio medio de poro para las muestras microporosas se sitúa en $9 \pm 6 \mu\text{m}$, con valores algo mayores a la media en la muestras más próximas a la litofacies anterior (MC2-T; MC2-V) con valores de $9,68 \mu\text{m}$ y $14,67 \mu\text{m}$ respectivamente, y disminuyendo hacia la base de la litofacies a medida que se aproximan las facies de grano más finas típicas del talud distal (MC2-Y; $3,09 \mu\text{m}$). En los tres casos, la distribución de tamaños, aparece sesgada hacia los valores más pequeños, situados por debajo de las $500 \mu\text{m}$. La muestra macroporosa, presenta valores de radio de acceso de poro próximos a $15 \mu\text{m}$, mostrando igualmente una distribución según una campana de Gauss, en este caso sesgada hacia los mayores tamaños. Una vez más, los factores morfológicos obtenidos, con factores de forma circular muy pequeños, y factores de forma rugosa muy altos evidencian en todos los casos poros poco circulares (muy irregulares) y relativamente poco rugosos.

En lo referente a los conductos que unen los poros, y si en este caso se atiende al volumen de poros alimentados por accesos cuyo radio se sitúe por encima o por debajo de $7,5 \mu\text{m}$, las cuatro muestras analizadas dentro de esta litofacies presentan un comportamiento microporoso. Se han obtenido así valores medios para toda la litofacies de $0,4 \pm 0,3 \mu\text{m}$ (media) y $2 \pm 1 \mu\text{m}$ (mediana). Salvo la muestra MC2-T, con valores de radio medio de acceso de poro inferiores a $0,1 \mu\text{m}$, el resto de las muestras estudiadas presentan valores superiores a las $0,2 \mu\text{m}$, llegando incluso a alcanzar valores próximos a $1 \mu\text{m}$ en el caso de la muestra más profunda de esta litofacies (MC2-Y). Las medianas presentan valores más homogéneos variando entre $3,54$ y $1,27 \mu\text{m}$ para las muestras MC2-V y MC2-ρ respectivamente. En lo referente a como se distribuyen dichos canales en cuanto a su tamaño se refiere, destaca la uniformidad de las tres calizas grainstone, con histogramas unimodales con máximos alrededor de las $5-6 \mu\text{m}$, algo menor en la última de las muestras (MC2-Y) alrededor de las $1-2 \mu\text{m}$. La muestra restante, con textura rustone,

presenta una distribución bimodal con un máximo principal situado alrededor de las 0,5-1 μm , y uno secundario en las decenas de micras (50-60 μm). En todos los casos, las porosidades atrapadas puestas de manifiesto por los ensayos de inyección de mercurio son nuevamente elevadas, con valores medios superiores al 70 % de la porosidad abierta en términos relativos, alcanzando valores próximos al 80 % las muestras MC2-V y MC2- ρ y valores algo menores (50 y 65 % respectivamente) para las otras dos muestras analizadas dentro de esta litofacies.

✚ Talud distal (TD): la muestra estudiada dentro de esta litofacies (MC2-Z) presenta un comportamiento muy similar a la zona más baja de la litofacies anterior. Así, se trata de una roca predominantemente microporosa, tanto desde un punto de vista de sus poros (87,85 % de los poros < 500 μm), como en los que al tamaño de los conductos se refiere, ya que la mayor parte de los fluidos acceden al seno de la roca a través de conductos con radios inferiores a las 7,5 μm .

El radio medio de poro medido en esta litofacies alcanza valores de 4,56 μm , mostrando una distribución de tamaños claramente sesgada hacia los poros más pequeños. Los factores morfológicos obtenidos, con factores de forma circular muy pequeños, y factores de forma rugosa muy altos evidencian en ambas rocas poros poco circulares (muy irregulares) y relativamente poco rugosos.

Los conductos que unen dichos poros presentan radios de acceso de 1,38 μm (media) y 0,89 μm (mediana). La distribución de los radios de acceso es marcadamente unimodal, con un máximo en los valores comprendidos alrededor de 1 μm , evidenciando los dos ciclos realizados sobre todas las muestras la presencia de porosidades atrapadas próximas al 65 %.



5.- INTERPRETACIÓN PETROFÍSICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1.- Propiedades dinámicas

5.1.1.- Velocidad de propagación vs porosidad total

Si se representan gráficamente los valores medios de velocidad de propagación de ondas P medidos según 4 ejes transversales (X-X', Y-Y', XY-XY' y YX-YX') al eje longitudinal de cada testigo de sondeo estudiado (ver capítulo 4.1), frente a los valores medios de porosidad total (ρ) obtenidos mediante picnómetro de Le Chatelier (ver capítulo 4.3.1), se observa una buena relación lineal entre ambos parámetros (Figura 5.1), lo que pone de manifiesto que, como era de esperar, en las calizas estudiadas ambos parámetros están relacionados de una manera prácticamente lineal (R^2 : 0,85).

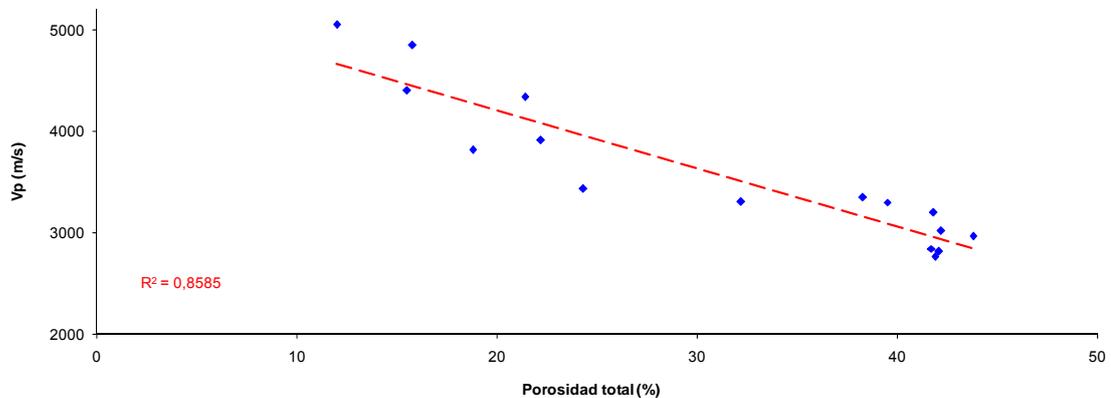


Figura 5.1- Relación lineal obtenida entre velocidad de propagación y porosidad total. La velocidad de propagación representada corresponde con la media de las determinaciones realizadas según las cuatro direcciones del espacio obtenidas transversalmente al eje longitudinal de los testigos de sondeo. El coeficiente de determinación obtenido R^2 alcanza valores de 0,85.

Sin embargo, cuando lo que se representa es la media de la velocidad de propagación de ondas P medidas a lo largo del eje vertical Z-Z' (longitudinalmente al eje del testigo) frente a la porosidad total, la relación lineal obtenida es menor (R^2 : 0,69- (Figura 5.2). Si se analiza el gráfico de esta última figura, se puede observar que esta disminución en el coeficiente de correlación está marcada por la presencia de un punto excepcional, correspondiente con la muestra MC2-O, con valores de Vp mucho menores que los esperados para el valor de porosidad total medido. Si se elimina dicho punto del gráfico de correlación (Figura 5.2) el coeficiente de determinación R^2 se sitúa en 0,93, y con ello se observaría nuevamente una buena relación lineal entre ambos parámetros.

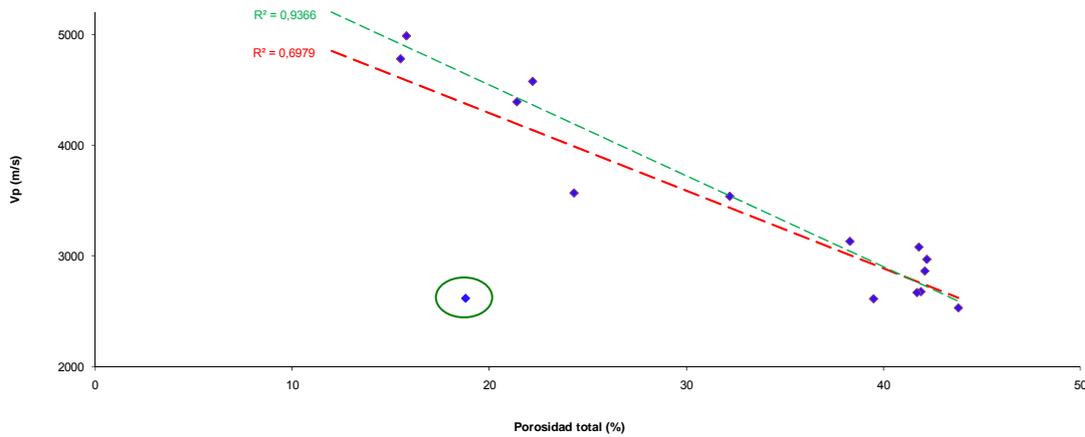


Figura 5.2.- Relación lineal obtenida entre velocidad de propagación y porosidad total. La velocidad de propagación representada corresponde con la media de las determinaciones realizadas según el eje longitudinal del testigo (eje Z). El coeficiente de determinación obtenido R^2 se sitúa en 0,69. Se puede observar que tan sólo uno de los testigos estudiados (círculo verde) se desvía notablemente de la recta de correlación dibujada, mostrando una gran desviación respecto a la misma; si se elimina este valor excepcional punto del gráfico el coeficiente de determinación obtenido se sitúa en 0,93.

La muestra MC2-O se caracteriza por la presencia de una banda de microcavidades asociada a una zona dolomitizada, dispuesta perpendicularmente a su eje axial, que le confiere a la roca una marcada anisotropía según el eje Z-Z' (Figura 5.3). La influencia de esta banda en la media de las medidas realizadas transversalmente al testigo de sondeo es menor, al afectar solamente a las medidas realizadas sobre ese tramo, mientras que a lo largo del eje Z-Z' (vertical) todas las medidas atraviesan este tramo de elevada porosidad.

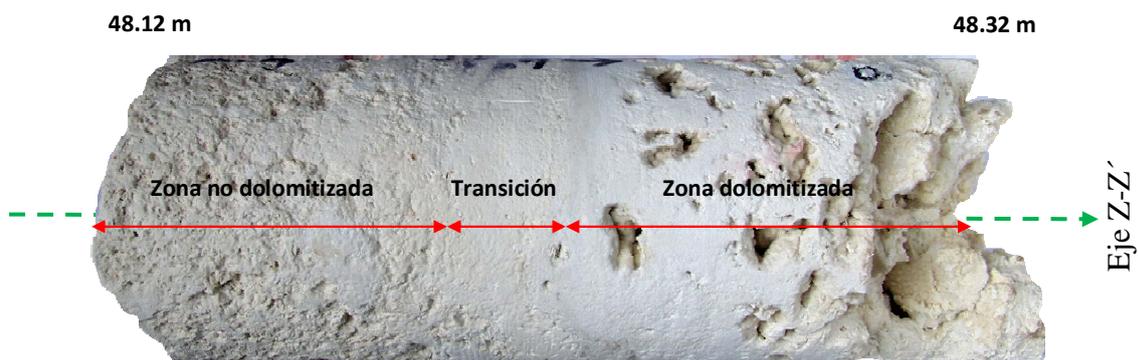


Figura 5.3.- Esquema ilustrativo donde se localizan las zonas dolomitizada, de transición y no dolomitizada observadas dentro de la muestra MC2-O correspondiente al lagoón externo. Mediante una flecha verde se indica la posición del eje Z-Z' a lo largo del eje longitudinal del sondeo.

Los elevados coeficientes de determinación anteriormente obtenidos (eliminada la muestra MC2-O del 2º gráfico) permitirá determinar de manera rápida, sencilla y

económica, la porosidad total, aproximada, de cualquier nuevo testigo del sondeo MC2 o de cualquier otro sondeo con las mismas litofacies petrofísicas implicadas, a partir del valor de V_p obtenido. Sin embargo, a tenor del problema anteriormente recogido será necesario analizar la anisotropía de las muestras antes de determinar la porosidad total de las mismas.

5.1.2.- Velocidad de propagación vs densidad aparente

Si se mantiene el mismo formato que en el caso anterior, representando gráficamente los valores medios de velocidad de propagación de ondas P medidos, según 4 ejes transversales ($X-X'$, $Y-Y'$, $XY-XY'$ y $YX-YX'$) al eje longitudinal de cada testigo (Figura 5.4) y a lo largo del eje vertical $Z-Z'$ (Figura 5.5), frente a los valores medios de densidad aparente (ρ_a) determinados para la totalidad del testigo, obtenidos en los ensayos hidráulicos (ver capítulo 4.2), se observa nuevamente una buena relación lineal entre ambos parámetros, lo que pone de manifiesto que, como en el caso anterior, ambos están relacionados de una manera prácticamente lineal, con valores de coeficientes de determinación (R^2) de 0,90 y 0,97 respectivamente, este último una vez eliminada la muestra MC2-O, tal y como se describe en el punto anterior.

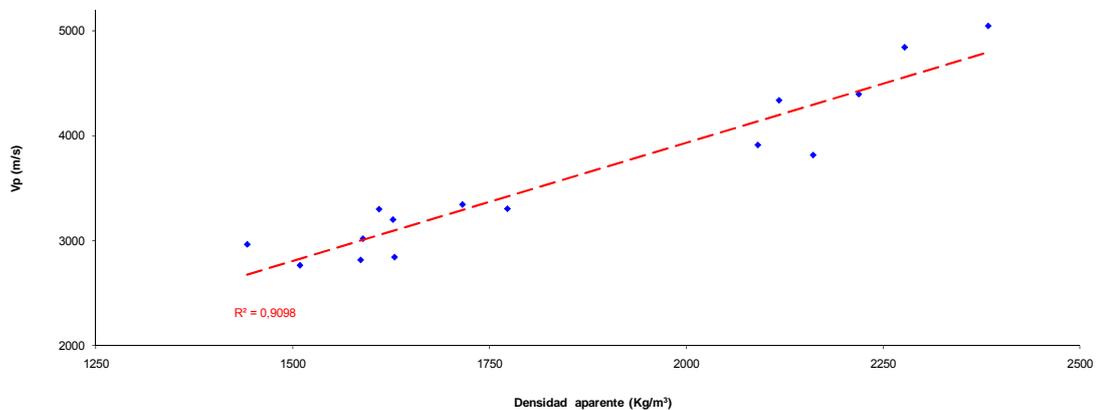


Figura 5.4- Relación lineal obtenida entre velocidad de propagación y densidad aparente. La velocidad de propagación representada corresponde con la media de las determinaciones realizadas según las cuatro direcciones del espacio obtenidas transversalmente al eje longitudinal de los testigos de sondeo. El coeficiente de determinación obtenido R^2 alcanza valores de 0,90.

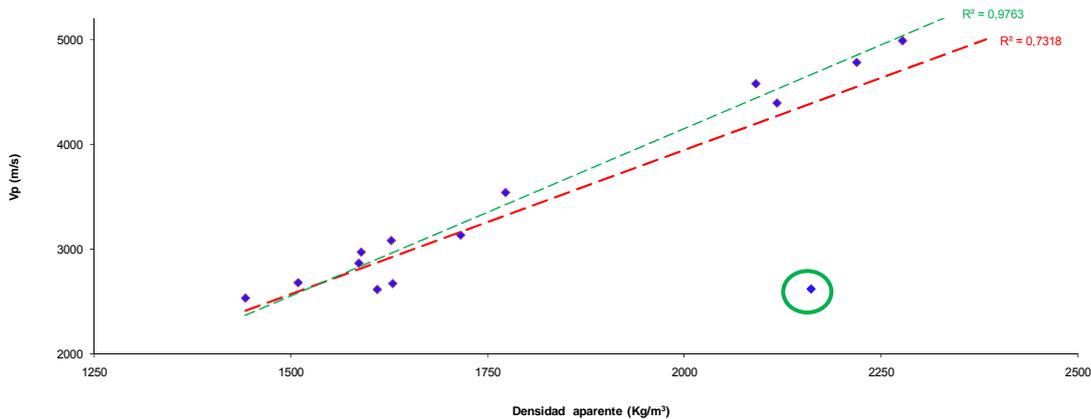


Figura 5.5.- Relación lineal obtenida entre velocidad de propagación y porosidad total. La velocidad de propagación representada corresponde con la media de las determinaciones realizadas según el eje longitudinal del testigo (eje Z). El coeficiente de determinación obtenido R^2 se sitúa en 0,73. Se puede observar que tan sólo uno de los testigos estudiados (círculo verde) se desvía notablemente de la recta de correlación dibujada, mostrando una gran desviación respecto a la misma. Si eliminamos este punto del gráfico el coeficiente de determinación obtenido se sitúa en 0,97.

5.1.3.- Anisotropía y heterogeneidad

La presencia de anisotropías en relación a las cuatro direcciones de medida transversales al eje longitudinal del testigo, pueden considerarse insignificantes y por lo tanto no cabe hablar de planos preferentes dentro del plano horizontal en relación con porosidad o microfisuración orientada, lineaciones preferentes de granos esqueléticos elongados, etc.

Sin embargo, algunos testigos analizados muestran cierta anisotropía según el eje axial del testigo (Z-Z'). Los coeficientes de anisotropía no son muy elevados (1-1,46), y las anisotropías aparecen en ambos sentidos (Figura 4.4); es decir, en unos casos el eje vertical (Z-Z') presenta mayores velocidades de propagación que la media de los ejes horizontales (X-X', Y-Y', XY-XY' y YX-YX') y viceversa. En el primero de los casos la anisotropía viene marcada por la presencia de niveles de alta porosidad perpendiculares al eje axial del testigo, atravesadas por las ondas P al medir en la dirección Z-Z', con la consiguiente atenuación de las ondas, traducidas en un incremento en los tiempos de vuelo, y con ellos una disminución en la velocidad de propagación en esta dirección (Figura 5.6).

En el segundo de los casos, cuando el eje vertical muestra una mayor velocidad de propagación, la anisotropía viene marcada por la presencia de niveles de mayor densidad perpendiculares al eje axial del testigo, atravesadas por las ondas P al medir en la dirección Z-Z', con el consiguiente aumento de las ondas, traducidas en un descenso en los tiempos de vuelo, y con ellos un aumento en la velocidad de propagación en esta dirección (Figura 5.7).

Finalmente, tal y como se cita en el capítulo 4.1, los testigos estudiados muestran una marcada heterogeneidad en la vertical, marcada por la distribución irregular de los espacios vacíos (poros y/o fisuras) a lo largo del eje axial de los testigos, tanto a escala macroscópica como microscópica.

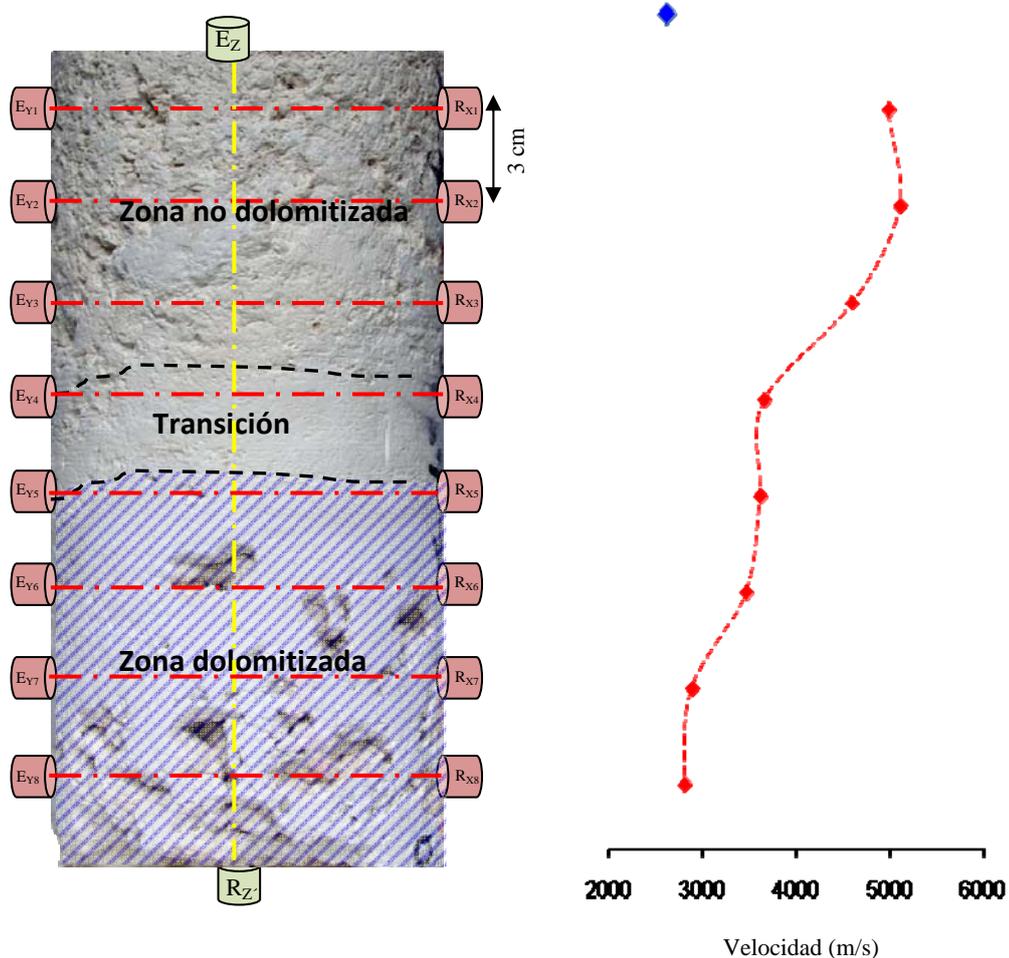


Figura 5.6.- Izquierda; imagen macroscópica del testigo de sondeo MC2-O correspondiente al lagoón externo (LE). En rayado azul se representan la zona dolomitizada de mayor porosidad macroscópica. Todas las medidas ultrasónicas obtenidas según el eje vertical (E_Z-R_Z) atraviesan las zonas subrayadas, por lo que la velocidad de propagación registrada será más pequeña que las registradas transversalmente ($E_{Y1}-R_{X1}$ a $E_{Y8}-R_{X8}$), donde la zona de baja velocidad solamente es atravesada en la mitad de las

mediciones. Derecha; perfil ultrasónico obtenido para el testigo MC2-O. Los puntos rojos corresponden con la media de las medidas transversales. El punto azul, de menor velocidad, corresponde con la media de las medidas del eje vertical.

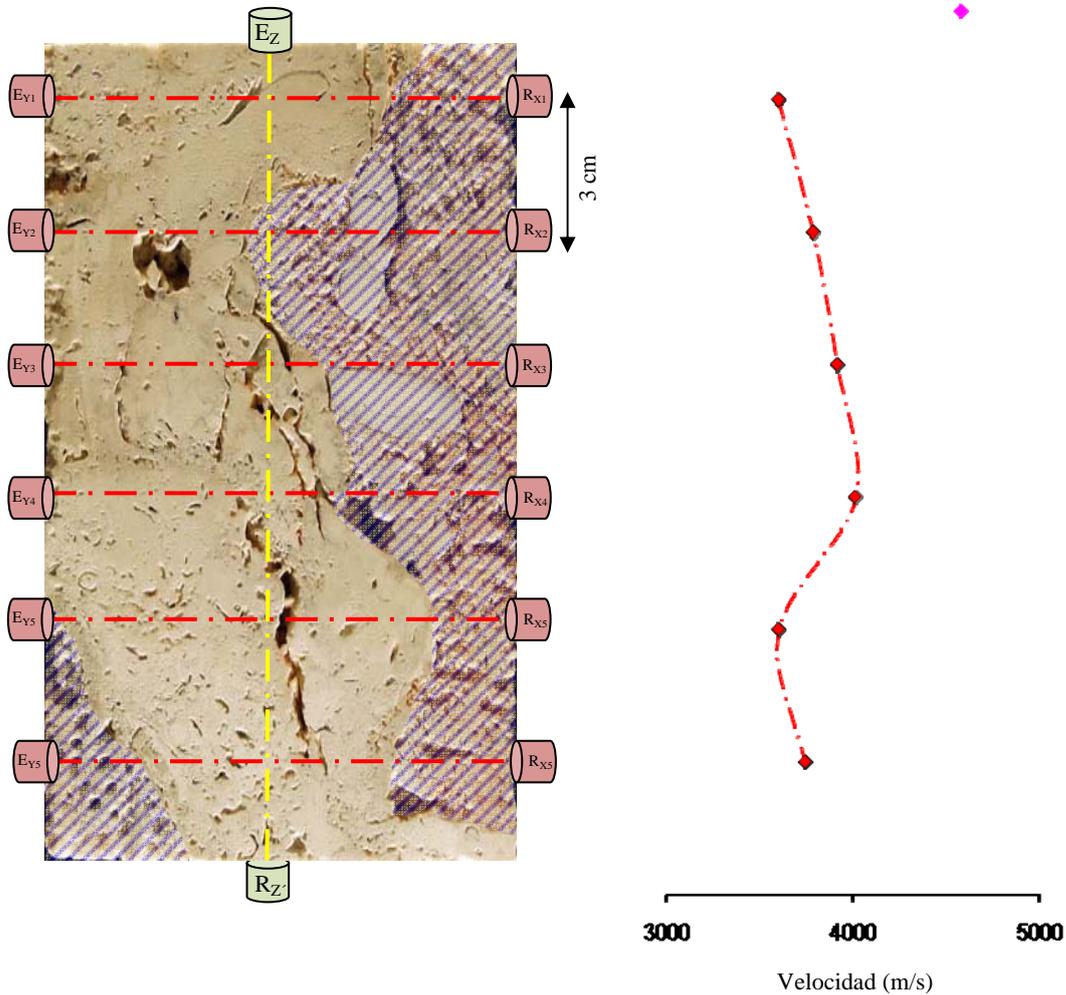


Figura 5.7.- Imagen macroscópica de una de las caras del testigo de sondeo MC2-K correspondiente al parche arrecifal (PA), tras ser cortado longitudinalmente según el eje YX (ver capítulo 4.1). En rayado azul se representan las zonas de mayor porosidad macroscópica. Todas las medidas ultrasónicas obtenidas según el eje YX (E_{Y1} - R_{X1} a E_{Y5} - R_{X5}) atraviesan las zonas subrayadas, por lo que la velocidad de propagación registrada será más pequeña que las registradas según el eje vertical (E_Z - R_Z), donde la onda apenas discurre por la zona de baja velocidad y con ello la velocidad será mayor. Los puntos rojos corresponden con la media de las medidas transversales. El punto rosa, de mayor velocidad, corresponde con la media de las medidas del eje vertical.

5.2.- Funcionalidad hidráulica

5.2.1.- Absorción libre y forzada de agua vs porosidad

En primer término cabe analizar los resultados obtenidos en los ensayos de absorción de agua llevados a cabo sobre los testigos completos. Tal y como se comprueba en el gráfico de la figura 5.8, la relación lineal existente entre la porosidad abierta de la roca

y el contenido en agua en saturación es casi del 100 % (R^2 : 0,989), lo que pone de manifiesto que los ensayos han sido realizados correctamente, y que los vacíos alcanzados han sido suficientes para saturar completamente el sistema poroso comunicado de la roca. Este valor de absorción forzada de agua, sumado a una correcta cubicación, puede proporcionar una valiosa información de la **capacidad máxima de almacenamiento a escala de roca matriz** de las de las distintas litofacies estudiadas, sin considerar la presencia de cavidades y fracturas de orden métrico a kilométrico, que representan importantes volúmenes de almacenamiento.

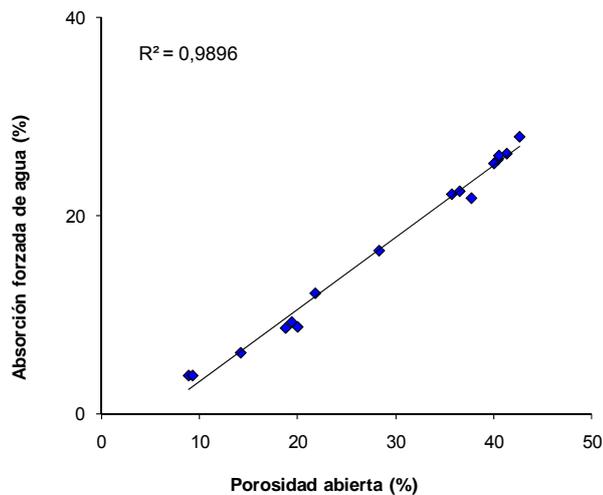


Figura 5.8- Relación lineal obtenida entre absorción forzada de agua y porosidad abierta. Ambos parámetros muestran una relación lineal próxima al 100 % lo que pone de manifiesto que los ensayos han sido realizados correctamente.

En segundo término, cabe plantearse la relación existente entre porosidad abierta y absorción libre de agua, es decir, la cantidad de agua que entra libremente en los testigos cuando son introducidos en agua, en relación con la máxima cantidad de agua que puede albergar una roca al aplicar vacío, es decir, el grado de saturación (S). Los gráficos de la figura 5.9 ponen de manifiesto que aunque existe buena relación lineal entre porosidad abierta y absorción libre de agua (R^2 : 0,83), realmente la cantidad de agua que entra en los testigos está relacionada con la porosidad efectiva (R^2 : 0,95), es decir, la parte de la porosidad abierta a la cual el agua accede con facilidad.

Estos datos proporcionan una primera aproximación de la complejidad del sistema poroso, es decir, de la facilidad de agua para circular por el seno de la roca, e indirectamente de la fracción de porosidad abierta que puede considerarse de fácil acceso (porosidad abierta efectiva o accesible) de la que no lo es (porosidad no

efectiva o atrapada). Junto con otros datos, como la permeabilidad, se puede tener una idea aproximada de la **facilidad/dificultad de los procesos de carga y descarga del acuífero a escala de roca matriz.**

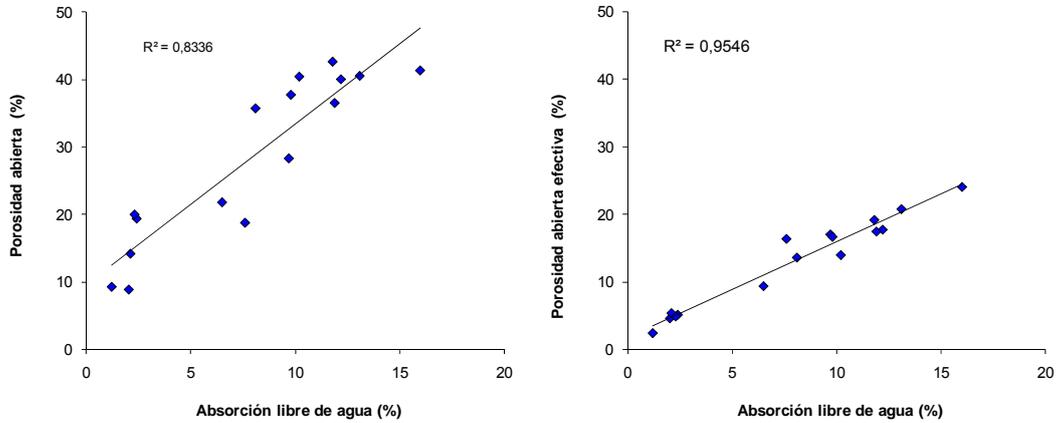


Figura 5.9.- Relación lineal obtenida entre absorción forzada de agua y porosidad abierta (izquierda) y absorción forzada de agua y porosidad abierta accesible. Los coeficientes de determinación ponen de manifiesto que es la porosidad efectiva la que controla la cantidad de agua que accede al interior de la roca, a corto plazo.

Si se comparan los valores obtenidos de absorción libre de agua y absorción forzada de agua mediante la utilización del grado de saturación libre o no forzada de agua (Figura 5.10), cabe destacar un valor medio de saturación próximo al $48 \pm 16 \%$.

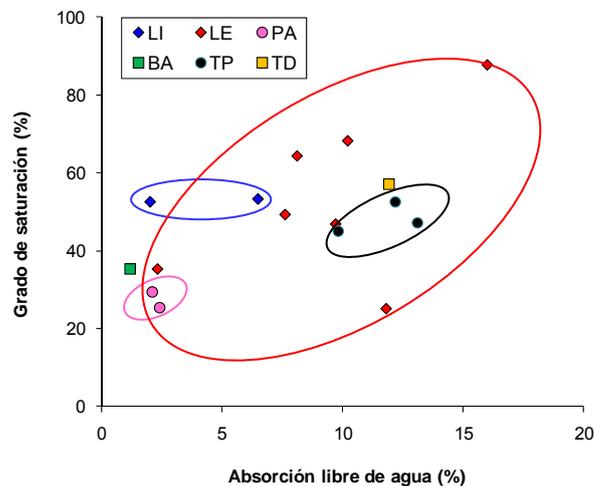


Figura 5.10.- Valores de grado de saturación y absorción libre de agua obtenidos para los diferentes testigos estudiados, distribuidos por colores según las litofacies estudiadas: lagoon interno (LI), lagoon externo (LE), parche arrecifal (PA), barrera arrecifal (BA), talud proximal (TP) y talud distal (TD).

Si se analiza el gráfico anterior, cabe destacar que tan sólo tres de las muestras estudiadas, localizadas dentro del lagoon externo (LE) presentan valores de saturación libre superiores al 60 %, una de las cuales se sitúa próxima al 90 % (MC2-O).

Igualmente resalta que tres de las muestras estudiadas no superan el 30 %, localizándose 2 de éstas en el parche arrecifal (PA) y 1 en el lagoon externo (LE).

Estos generalizados bajos valores de saturación implican necesariamente que un elevado porcentaje de la porosidad abierta de los testigos ensayados, está representada por una porosidad no efectiva o atrapada; donde el agua penetra de manera muy lenta, con suma dificultad y en muchos casos, una vez dentro, será difícil de extraer o de provocar su movilización, incluso bajo elevados gradientes de presión.

5.2.2.- Grado de saturación vs configuración sistemas porosos

Partiendo de la premisa anterior, es decir, el papel fundamental de la porosidad atrapada en los bajos valores de saturación no forzada obtenidos, es necesario analizar de manera detallada la configuración de los sistemas porosos presentes en las distintas litofacies y muestras estudiadas, a fin de establecer si existe algún parámetro al que se le pueda asignar un mayor control sobre el citado grado de saturación.

Tal y como se recoge en la figura 5.9, existe una clara relación lineal entre la cantidad de agua que entra libremente en el seno de la roca y la porosidad efectiva medida en dicha roca. Sin embargo, el grado de saturación alcanzado por una roca no está directamente relacionado con su porcentaje de porosidad efectiva y atrapada (Figura 5.11), tal y como refleja los bajos coeficientes de determinación obtenidos, sino con relación existente entre ambas (P_e/P_t), tal y como se refleja en la figura 5.12.

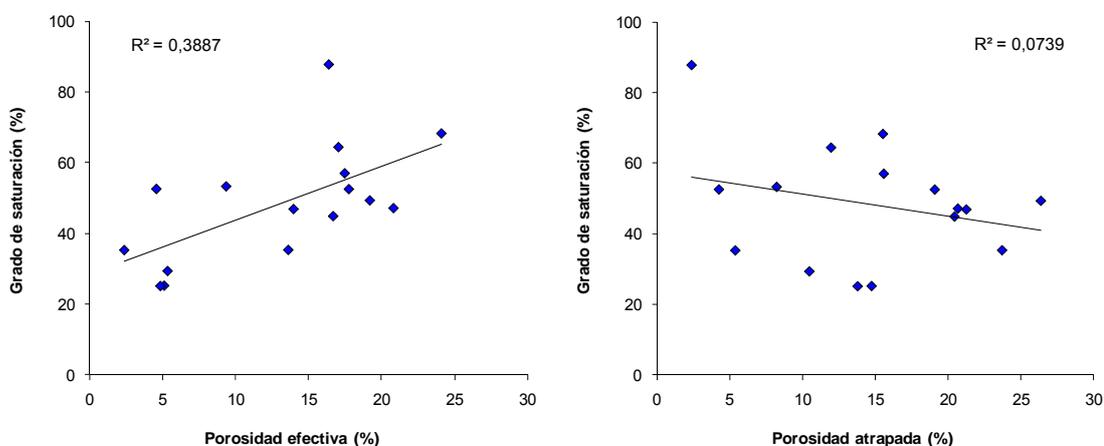


Figura 5.11.- Relación lineal obtenida entre grado de saturación y porosidad abierta efectiva o accesible (izquierda) y grado de saturación y porosidad abierta atrapada o no accesible (derecha). En ambos casos

los coeficientes de determinación obtenidos son bajos (R^2 : 0,38 y 0,07 respectivamente), lo que evidencia que la saturación alcanzada guarda cierta relación con la porosidad efectiva, pero que deben existir otros parámetros con mayor influencia.

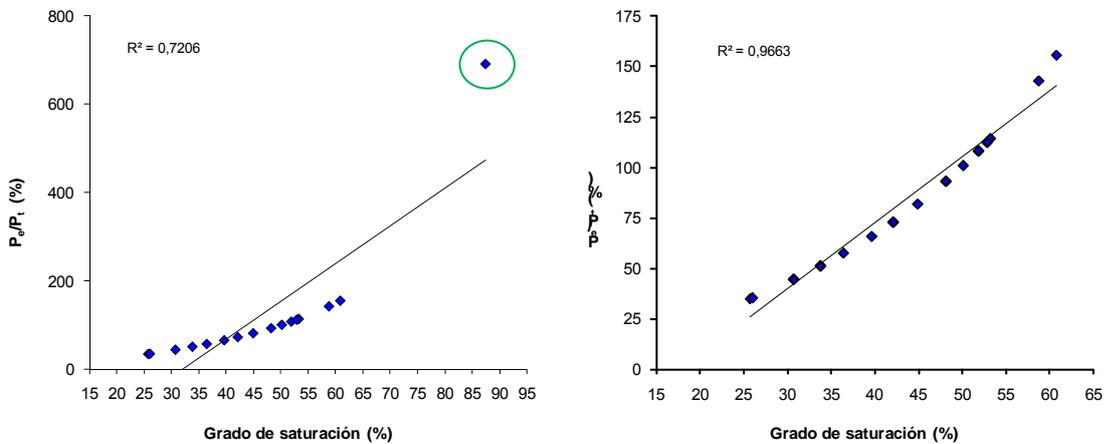


Figura 5.12.- Relación lineal obtenida entre grado de saturación y la relación porosidad efectiva (P_e)/Porosidad atrapada (P_t). Izquierda; se puede observar como la muestra MC2-O (círculo verde) representa una anomalía respecto al resto de las muestras estudiadas. Derecha; eliminada esta muestra de la correlación, el coeficiente de determinación obtenido alcanza valores de 0,96.

Por lo tanto, es necesario determinar cuál/cuáles de los parámetros que definen los sistemas porosos, a escala de roca matriz, controlan que un determinado volumen poroso de una roca se comporte como porosidad accesible o atrapada.

Los sistemas porosos presentan configuraciones generalmente complejas que vienen controladas por dos componentes fundamentales; poros y conductos, mostrando gran importancia los primeros en los que a capacidad de almacenamiento se refiere, y gobernando los segundos, la funcionalidad hidráulica, es decir la circulación de los fluidos en el seno de la roca.

El primero de los componentes, los poros, vienen definidos por parámetros tales como: tipo, volumen, tamaño, distribución, superficie específica y morfología, habiendo sido analizados cualitativa y cuantitativamente a lo largo del presente trabajo (capítulos 4.2, 4.3 y 4.4). Si analizamos la influencia de cada uno de estos parámetros en la porosidad accesible y/o atrapada de la roca, los resultados obtenidos no ponen de manifiesto una clara relación lineal de manera individualizada de ninguno de éstos parámetros (Figura 5.12).

El segundo de los componentes, los conductos que unen dichos poros, viene definidos entre otros por los siguientes parámetros: volumen, tamaño, distribución y superficie

específica, que han sido analizados cuantitativamente mediante el uso de la porosimetría de inyección de mercurio (Capítulo 4.4). Si como en el caso anterior, analizamos la influencia de cada uno de estos parámetros en el grado de saturación de la roca, y con ello, en su influencia en el volumen de espacios vacíos accesibles y atrapados, el resultado obtenido es similar, sin que se obtenga una marcada relación lineal entre los parámetros citados y la saturación (Figura. 5.13).

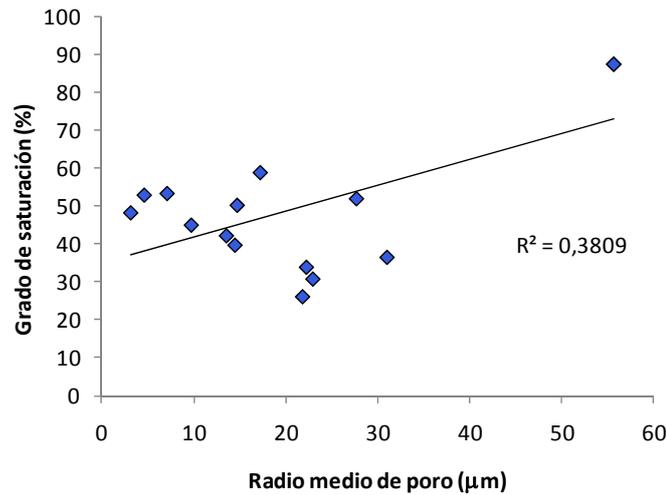


Figura 5.12.- Relación lineal obtenida entre grado de saturación y el radio medio de poro. Aunque es obvia la relación existente entre ambos parámetros; a mayor radio de poro en principio le correspondería mayor grado de saturación, el coeficiente de determinación es bajo (R^2 : 0,308), lo que implica que no hay una relación lineal entre ambos. Existirán otros parámetros o factores, como el radio de acceso de poro, que condiciona la dependencia lineal entre ambos parámetros.

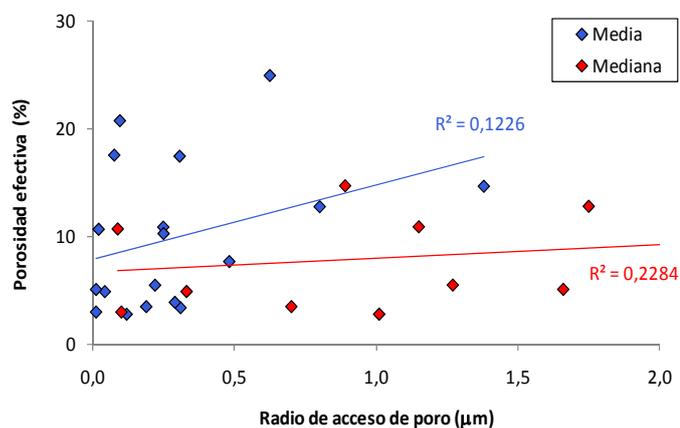


Figura 5.13.- Relación lineal obtenida entre porosidad efectiva y radio de acceso de poro. Como en el caso anterior, aunque se observa cierta relación lineal entre ambos parámetros; a mayor radio de acceso de poro en principio le correspondería mayor porosidad efectiva, los bajos coeficientes de correlación implican que no hay una relación lineal entre ambos. Existirán otros parámetros o factores, como la distribución de los radios de acceso de poro, que condiciona la dependencia lineal entre ambos parámetros.

Recapitulando, parece claro que el grado de saturación libre alcanzando por las muestras estudiadas, está condicionado por la relación entre porosidad accesible y no accesible. Sin embargo, ninguno de los parámetros que gobiernan estos dos tipos de porosidad, y muy especialmente, el radio de poro y el radio de acceso de los conductos que unen los anteriores, presentan, a diferencia de lo que se puede observar en otro tipo de rocas, una marcada relación lineal que permita definir los umbrales de estos dos parámetros en cuanto a porosidad efectiva y no efectiva se refiere, y con ello, en lo referido a la saturación.

Claro está que las correlaciones anteriormente descritas no han tenido en cuenta la distribución de tamaños de poro y radios de acceso sino solamente sus valores medios y/o medianas. El análisis detallado de estos histogramas de distribución de ambos parámetros, junto con otros datos obtenidos, pueden explicar en muchos casos el comportamiento hidráulico observado en los análisis, si bien, éste es diferente para cada uno de los testigos estudiados, dada la mencionada heterogeneidad de las muestras, por lo que sería imposible introducir este tipo de datos en los estudios de correlación realizados. Se podría hablar de una justificación semicuantitativa.

Pero aún es necesario considerar nuevos parámetros a la hora de interpretar la baja funcionalidad hidráulica de los testigos estudiados. Conocido cómo son los poros de las rocas estudiadas en cuanto a volumen, tipos, tamaño, forma y distribución se refiere, y los conductos que unen los anteriores, en términos de tamaño, distribución, superficie específica, etc., falta por analizar el grado de **conectividad** entre ambos sistemas (poros y conductos) y la **tortuosidad** que del sistema poroso en su conjunto.

Partiendo de los datos obtenidos en los análisis de porosimetría de inyección de mercurio, y mediante la utilización de un software avanzado para el análisis de sistemas porosos (Pore-Cor v.6.31) desarrollado por la Universidad de Plymouth (Reino Unido) en el año 2008, se ha procedido al análisis de ambos parámetros.

De una manera extraordinariamente sintética, el procedimiento seguido para cada una de las rocas estudiadas ha sido el siguiente:

- 1) Obtención de la curva media para el 1^{er} y el 2^o ciclo de intrusión realizados, a partir de las diferentes curvas de intrusión obtenidas en los 6-8 ensayos de

porosimetría de inyección de mercurio (2 ciclos) realizados por cada testigo de roca. Volcado de los datos obtenidos al software Pore-Cor v.6.31.

2) Reconstrucción tridimensional simplificada del sistema poroso de las rocas, utilizando para ello una serie de complejos algoritmos, y previa realización de una serie de correcciones y ajustes de los datos procedentes del ensayo de porosimetría de inyección de mercurio. El procedimiento detallado utilizado para dicha reconstrucción aparece recogido en el manual de instrucciones del Pore-Cor V.6.31.

Se obtiene así, la estructura porosa tridimensional de la roca, donde se pueden observar, a modo de cubos, los poros de las rocas, y a modo de cilindros los conductos que unen los anteriores, en ambos casos, con tamaños que obedece a los resultados obtenidos en las porosimetrías de inyección de mercurio (Figura 5.14).

3) Reconstrucción tridimensional simplificada del sistema poroso efectivo y no efectivo de las rocas. Se obtiene así, una visión tridimensional de la parte de la porosidad por donde los fluidos circulan con facilidad y viceversa (Figura 5.15).

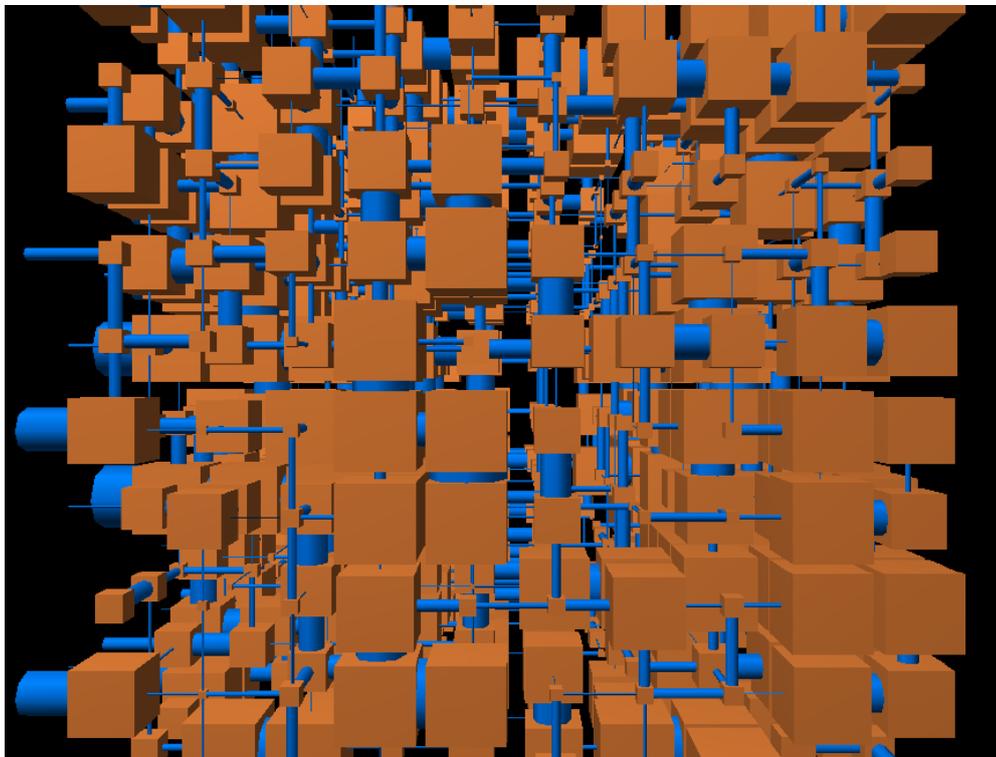


Figura 5.14.- Ejemplo de reconstrucción tridimensional obtenido a partir del software de análisis de sistemas porosos Pore-Cor. La imagen corresponde con la celda unidad cúbica de 5 mm de arista que servirá para la el posterior calculo de parámetros, realización de simulaciones, etc. Los poros aparecen representados como cubos naranjas y los conductos como cilindros azules.

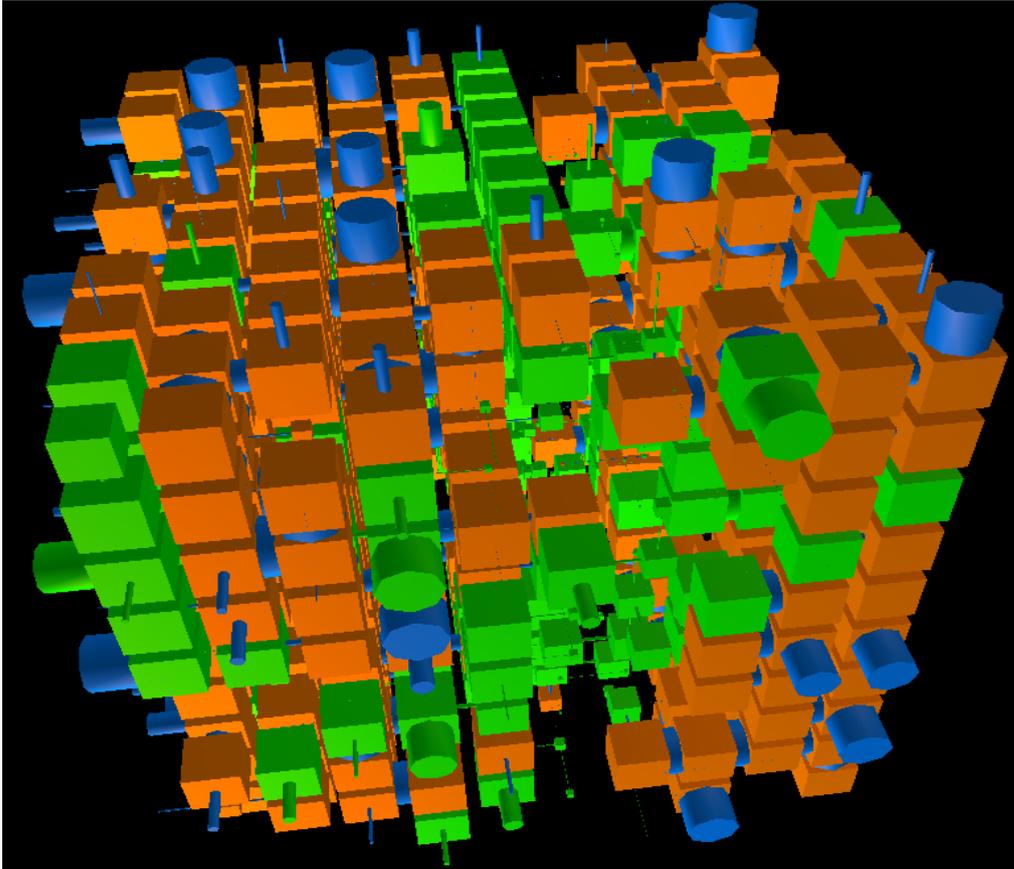


Figura 5.15.- Ejemplo de reconstrucción tridimensional obtenido a partir del software de análisis de sistemas porosos Pore-Cor. La imagen corresponde con la celda unidad cúbica de 5 mm de arista. Se puede distinguir la parte de la porosidad de fácil acceso (porosidad efectiva) de aquella por donde los fluidos circulan con dificultad (atrapada). Los poros aparecen representados como cubos naranjas (porosidad efectiva) y verdes (porosidad atrapada), y los conductos como cilindros azules o verdes según correspondan con accesos efectivos o no efectivos respectivamente.

4) Obtenida la simulación 3D simplificada de la celda unidad del sistema poroso de la roca en estudio, se ha procedido a calcular empíricamente los dos parámetros citados, cuyos resultados aparecen representados en el gráfico de la figura 5.16:

La **conectividad**, representa el número de accesos que pueden estar conectados a un poro. El software modeliza los poros como cubos, así que el valor de la conectividad no puede ser mayor a 6. Pore-Cor solamente trabaja con sistemas porosos comunicados, es decir, no permite la existencia de poros no accesibles o atrapados, por lo que el valor de la conectividad ha de ser $0 < \text{Conectividad} \leq 6$.

La **tortuosidad**, la tortuosidad se define en este software como la trayectoria tortuosa de un ion a través de la celda unidad (una celda llena de cubos conectados por cilindros) dividida por la longitud de la celda unidad. Para simularla se llevan a

cabo 100 trayectorias aleatorias desde el techo hasta la base de la celda unidad. Estos “paseos” aleatorios se ponderan acorde a la expresión con $\text{radio}^2/\text{longitud}$, así como al comportamiento de los iones. Se aplica un campo eléctrico a la simulación para atrapar los iones una vez han alcanzado la siguiente capa inferior (nivel de poros se refiere –como pisos–), y se continua calculando de forma sucesiva. Si el ión no encuentra un camino a través de la celda, vuelve a intentarlo desde el techo de la misma. Si falla muchas veces deja de intentarlo y se calcula un valor cero para la tortuosidad. El algoritmo completo fue dado por Matthews y Spearing (1992). Las celdas que no tienen trayectorias aleatorias suelen presentar bajos valores de conectividad (<2.8). La tortuosidad general de una muestra viene dada por el valor medio, no por la mediana.

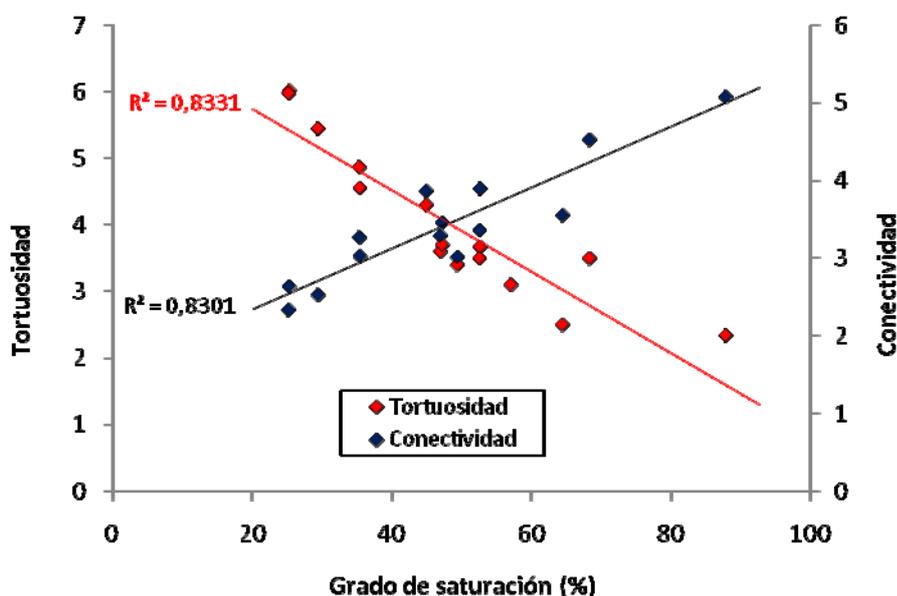


Figura 5.16.- Relación lineal entre el grado de saturación y dos de los parámetros característicos de los sistemas porosos de las rocas; tortuosidad y conectividad. Los coeficientes de determinación obtenidos ponen de manifiesto una buena correlación. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

Por lo tanto, tal y como evidencia este gráfico, parece claro que la baja saturación libre de las muestras estudiadas está condicionada por una baja conectividad y una elevada tortuosidad de poros y conductos de conexión entre éstos.

La afirmación anterior es fácilmente entendible si se analiza con detalle los sistemas porosos de algunos de los testigos de sondeo estudiados. A modo de ejemplo, si en la figura 5.10, se considera una de las muestras con menores valores de grado de

saturación (MC2-N), correspondiente al lagoon externo (LE) y se analiza paso a paso toda la información existente de las mismas, se podrían llegar a la siguiente interpretación de los datos obtenidos:

Se trata de un testigo relativamente homogéneo, y sin marcadas anisotropías, con valores medios de velocidad de propagación de 4337 m/s (ejes horizontales) y 4392 m/s (eje Z) respectivamente. La porosidad abierta se sitúa en 18,66 % distribuida en 4,87 % efectiva y 13,79 % atrapada. El contenido en agua en saturación alcanza valores de 8,81 % (2,30 % libre), lo que se traduce en un bajo grado de saturación libre en agua (26,11 %). Las cinéticas de los ensayos de absorción/evaporación ponen de manifiesto que tras una semana de ensayo, las curvas todavía no se han estabilizado lo que indica la presencia de una porosidad mal comunicada (Figura 5.17). El coeficiente de capilaridad y de permeabilidad al vapor de agua alcanzan valores de 1,56 ($\text{Kg/m}^2\cdot\text{h}^{1/2}$) y 145 ($\text{g/m}^2\cdot 24 \text{ h}$) respectivamente.

En lo referente a la configuración del sistema poroso, se trata de una caliza rudstone, con predominio de porosidad primaria intragranular e intergranular, y porosidad secundaria de tipo móldica. Los poros presentan un tamaño medio próximo a las 22 μm , con una distribución polimodal (Figura 5.18), si bien predomina la microporosidad (76,31 %) frente a la macroporosidad (26,29 %). Los radios de acceso de poro, con valores medios de 0,19 μm y mediana de 0,70 μm respectivamente, presentan una distribución marcadamente bimodal (Figura 5.19). La porosidad atrapada puesta de manifiesto mediante porosimetría de inyección de Hg refleja valores similares a los obtenidos al agua, es decir, próximo al 75 %.

Sumarizando, se puede afirmar que se trata de una roca con una moderada porosidad abierta, donde la elevada microporosidad, baja conectividad y una elevada tortuosidad, se traduce en una lenta circulación de agua en el seno de la roca, y con ello, bajos valores de grado de saturación libre en agua. Gráficamente (Figuras 5.20 y 5.21), esto es entendible si se observan las imágenes tomadas bajo microscopía electrónica de barrido (BSEM) una vez tratadas con proceso digital de imágenes (PDI).

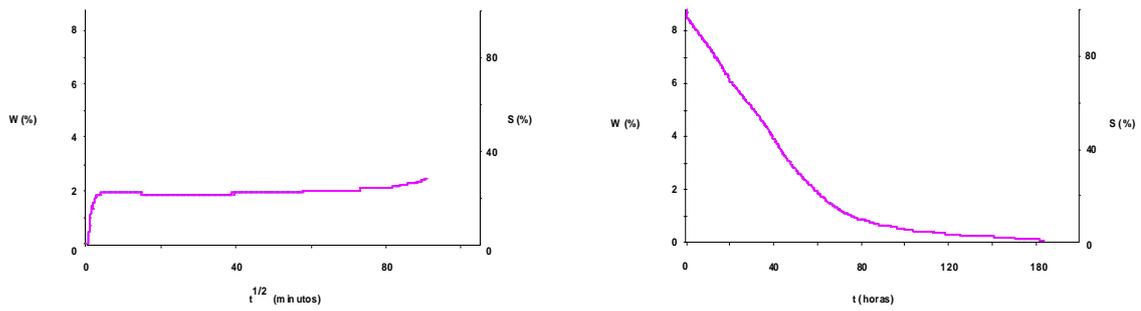


Figura 5.17.- Curvas de absorción libre de agua (izquierda) y evaporación (derecha) obtenidas para el testigo de sondeo MC2-N. Transcurrida más de una semana de ensayo las curvas no se han estabilizado, lo que indica que continúan los procesos de absorción/evaporación, reflejo de la baja conectividad del sistema poroso, elevada tortuosidad, microporosidad dominante, etc.

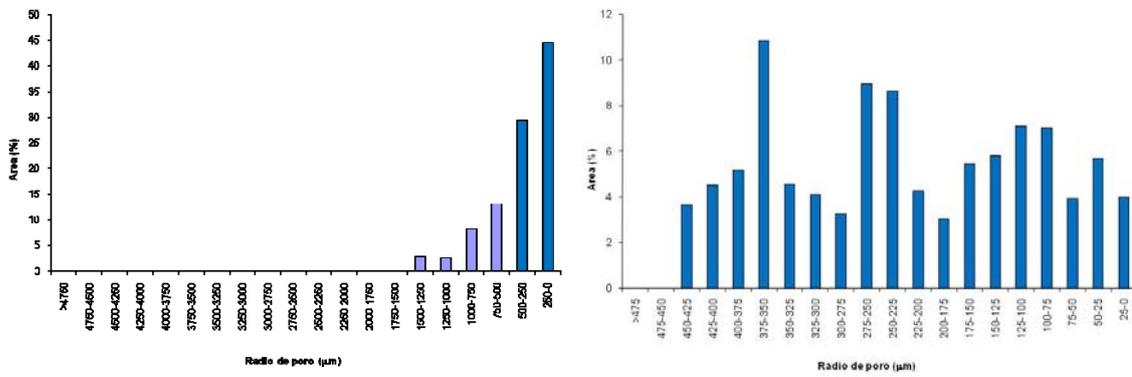


Figura 5.18.- Histogramas de distribución de radio de poro obtenidos para la muestra MC2-N. Izquierda; Se incluye todos los tamaños de poros detectados en la roca, es decir, los valores superiores a 500 µm, obtenidos por procesamiento de imágenes macroscópicas, y los valores inferiores obtenidos a partir de imágenes de SEM. Se puede observar un claro predominio de la microporosidad. Derecha; Detalle de la distribución de la fracción microporosa (< 500 µm) recalculada al 100 % del total de la porosidad.

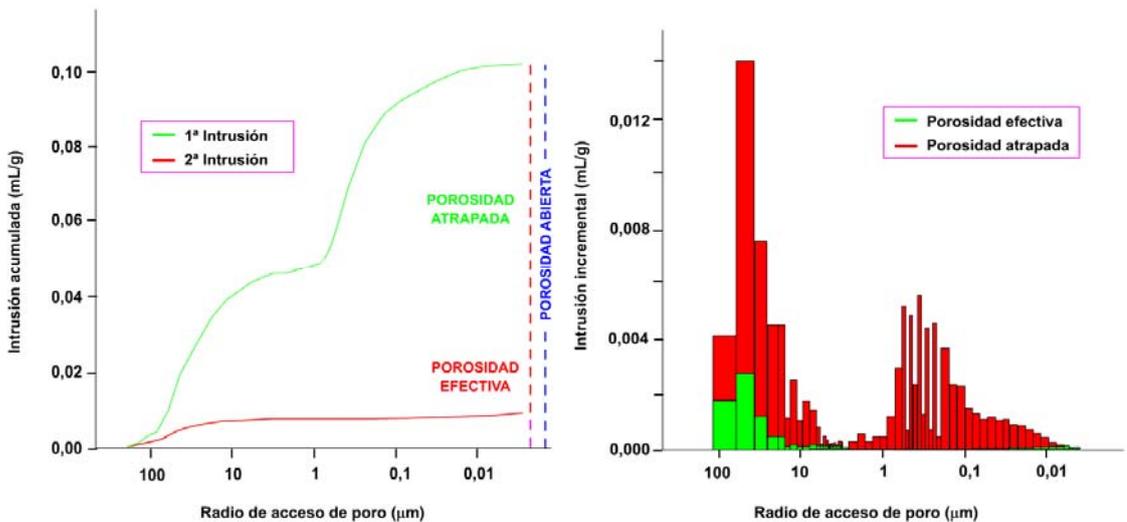


Figura 5.19.- Curva media de intrusión de mercurio (izquierda) e histograma medio de distribución de radios de acceso de poro (derecha) obtenidas para los “plugs” ensayados dentro del testigo MC2-N. La realización de dos ciclos consecutivos de inyección permite obtener la porosidad abierta efectiva y atrapada, en ambos casos a corto plazo. Se puede observar los elevados valores de porosidad atrapada que caracteriza esta roca.

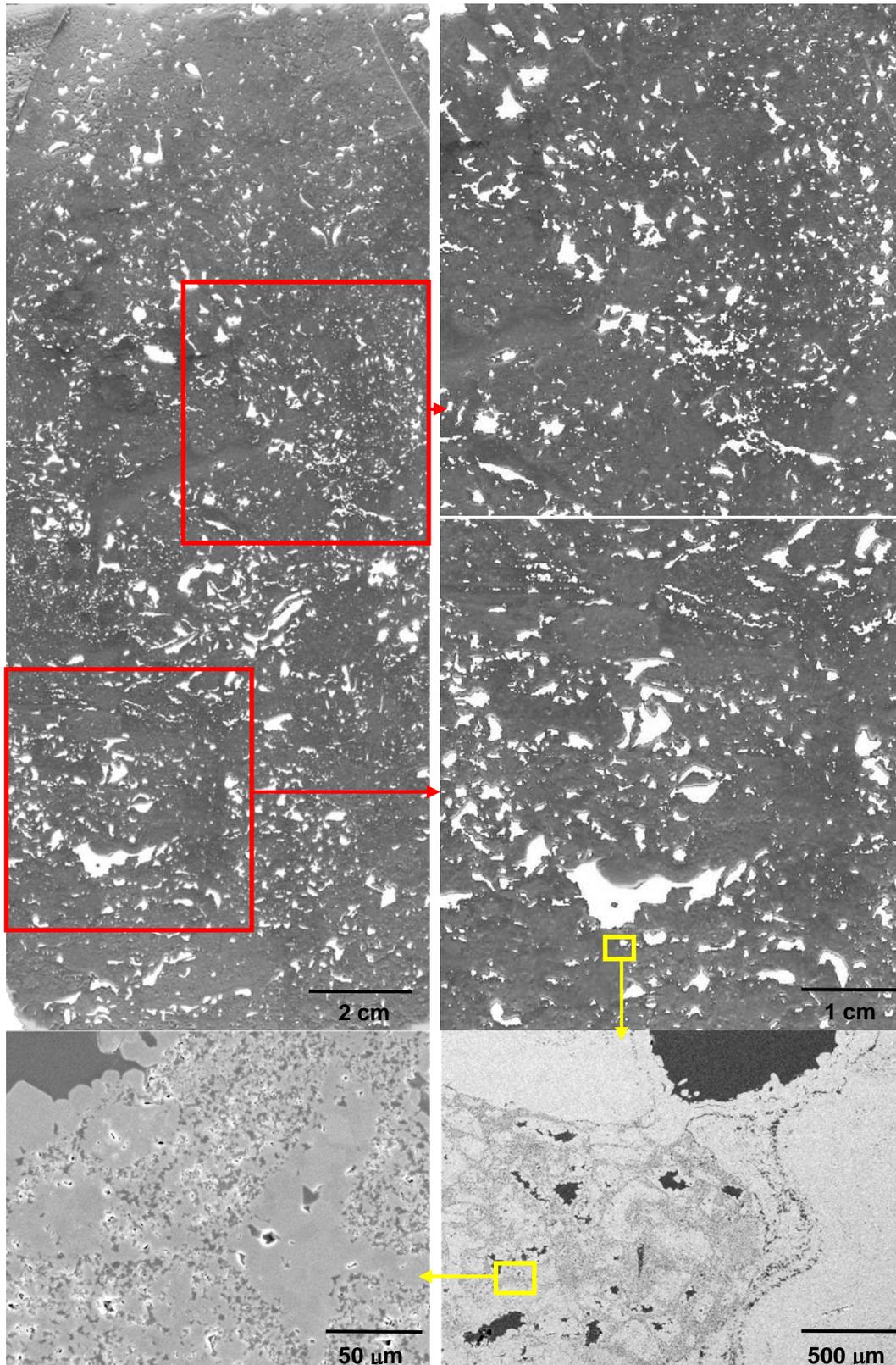


Figura 5.20.- Arriba; General y detalle del procesado digital de la porosidad abierta de la roca (blanco) obtenida a partir de una imagen macroscópica del testigo MC2-N. Abajo; Cartografía digital de los poros de la roca (gris oscuro) obtenidos a partir de imágenes de BSEM. Al observar la roca a grandes aumentos, es posible apreciar la importante microporosidad que presenta la roca a escala de roca matriz.

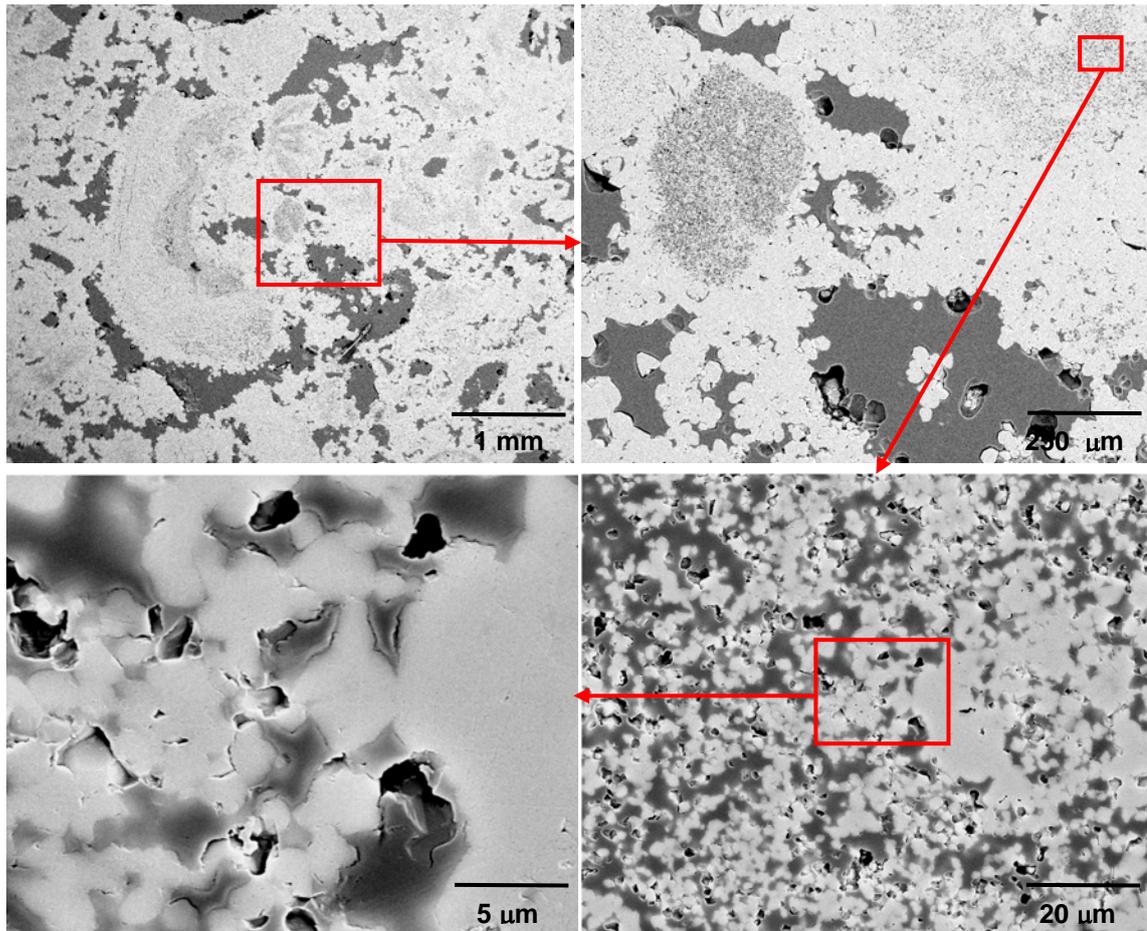


Figura 5.21.- Detalle al microscopio electrónico de barrido con electrones retrodispersados (BSEM) del complejo sistema poroso que forma parte de la muestra MC2-N. Las zonas de color gris oscuro, corresponden con la resina fluorescente inyectada en el sistema poroso de las muestras. A esta escala se puede observar la gran cantidad de microporos presentes en la roca matriz de la roca. Una vez que los grandes poros de la roca son ocupados por un fluido, esta densa microporosidad le confiere a la roca una lenta cinética de absorción/evaporación de los fluidos, es decir, corresponde con una porosidad de difícil acceso donde el agua entra y sales con mucha dificultad. Se corresponde con la porosidad atrapada.

De la misma manera, si mediante la utilización del software Pore-Cor v.6.31 anteriormente descrito, se hace una reconstrucción de la estructura porosa tridimensional de la roca matriz de este testigo de sondeo MC2-N (Figuras 5.22), se pueden observar los siguientes fenómenos:

- Si se visualiza con detalle el interior de la estructura porosa modelizada para la muestra MC2-N, una parte importante de los poros de esta roca muestran un bajo número de conductos de unión (Figura 5.23), si lo comparamos con la muestra MC2-O con un grado de saturación libre mucho mayor (Figura 5.24), lo que implícitamente da lugar a una elevada tortuosidad.

- Esto se traduce, en que dentro de una parte importante de la porosidad comunicada de la roca, los fluidos acceden con suma dificultad, representando una porosidad no efectiva o atrapada (Figura 5.25).

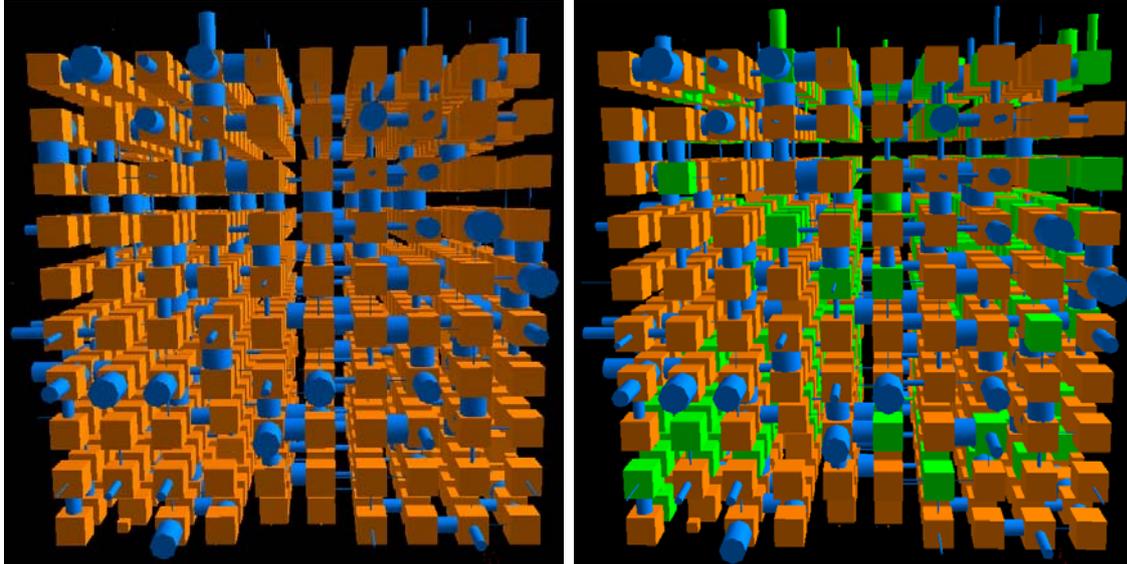


Figura 5.22.- Reconstrucción tridimensional de la estructura porosa a escala de roca matriz del testigo de sondeo MC2-N obtenida a partir del software Pore-Cor. La imagen corresponde con la celda unidad cúbica de 5 mm de arista. A la izquierda; modelo obtenido para la porosidad abierta, donde los poros aparecen como cubos naranjas y los conductos como cilindros azules. A la derecha; modelo donde se separa la porosidad efectiva de la atrapada. Esta última ha sido coloreada de verde para poros y conductos.

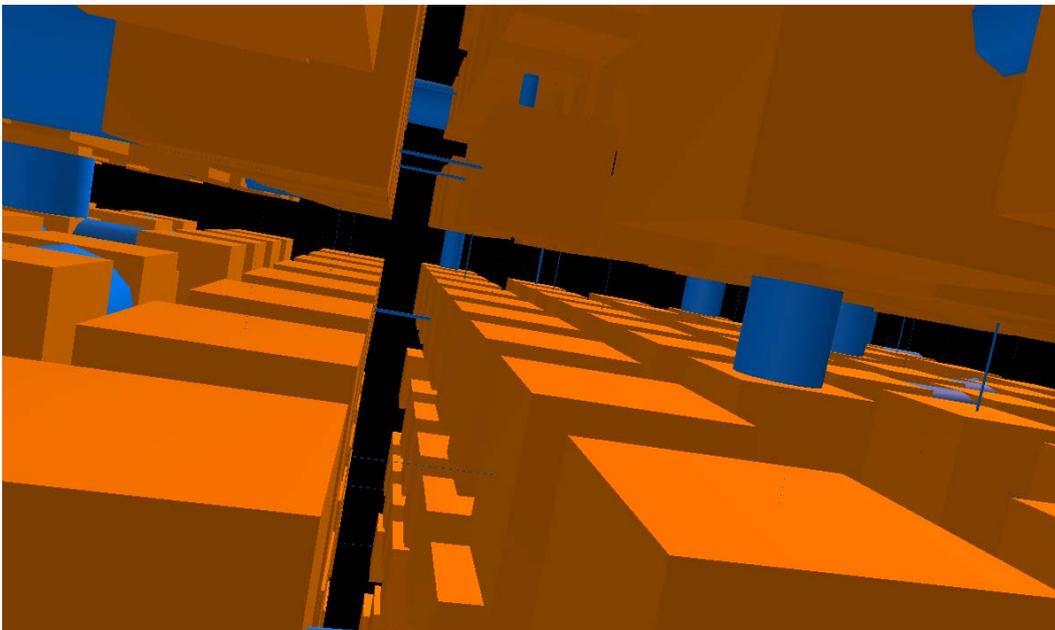


Figura 5.23.- Detalle del interior de la celda unidad tridimensional reconstruida para la muestra MC2-N mediante el software Pore-Cor. Se puede observar como una parte importante de los poros (cubos naranjas) tan sólo muestran 1 ó 2 conductos (cilindros azules) lo que pone de manifiesto la baja conectividad de la roca.

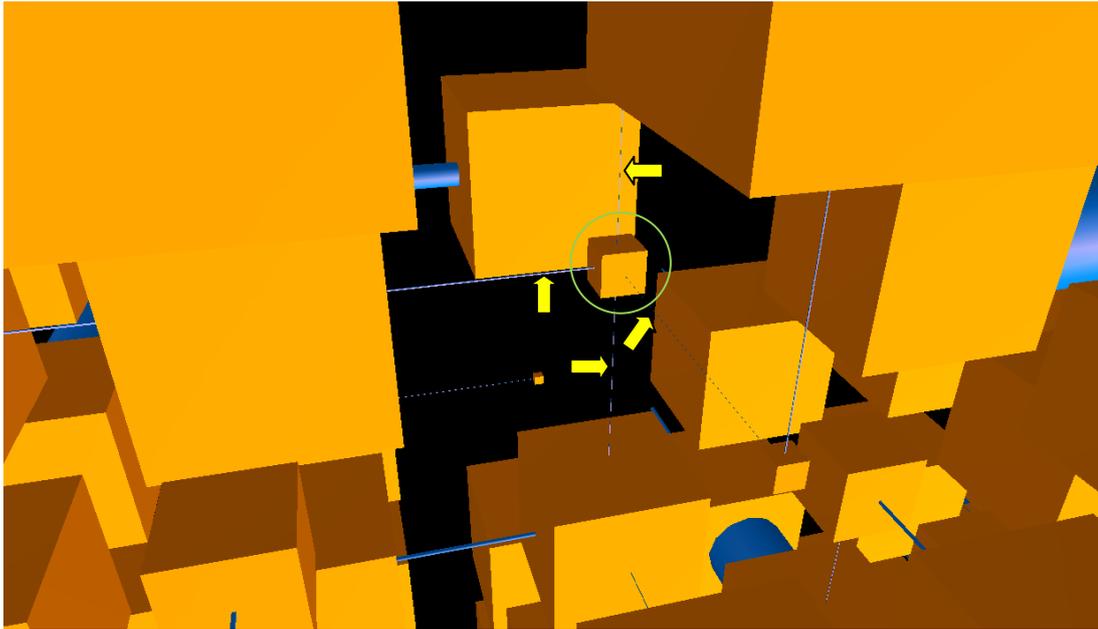


Figura 5.24.- Detalle del interior de la celda unidad tridimensional reconstruida para la muestra MC2-O mediante el software Pore-Cor. Se puede observar como incluso los poros más pequeños (círculo verde) muestran numerosos conductos (flechas amarillas), lo que se traduce en que la mayor parte de la porosidad abierta es efectiva y con ello la saturación libre alcanzada en la muestra será mayor, tal y como han puesto de manifiesto los ensayos hidráulicos realizados..

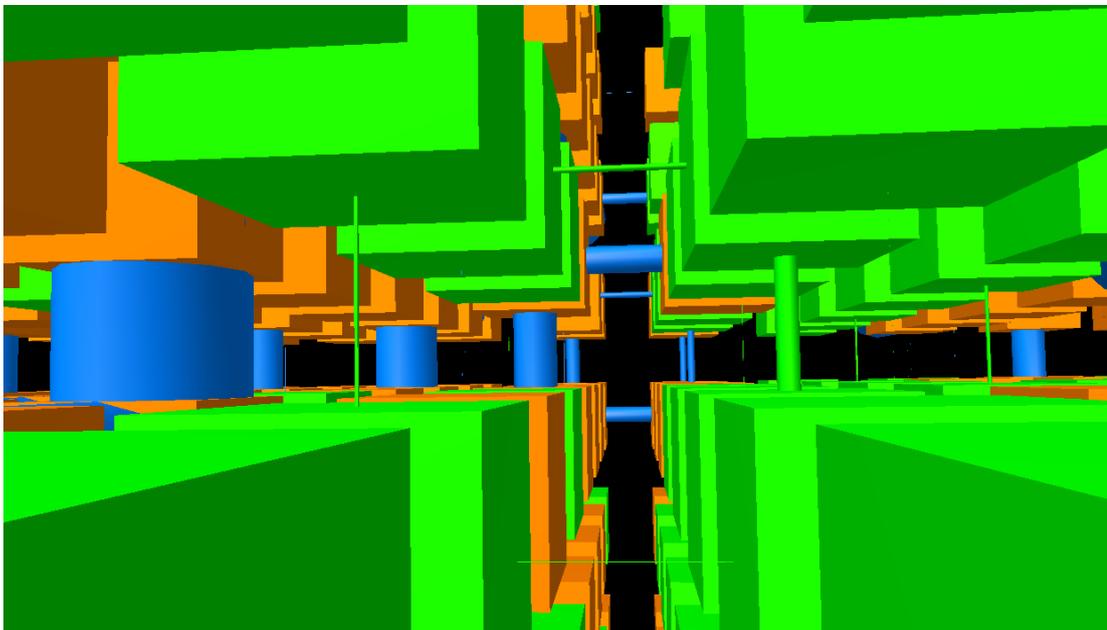


Figura 5.25.- Detalle del interior de la celda unidad tridimensional reconstruida para la muestra MC2-N mediante el software Pore-Cor. Se puede observar como una parte importante de los poros abiertos y de los conductos, representados en color verde, corresponden con porosidad no efectiva o atrapada donde el agua fluye con dificultad dada su baja conectividad.

Por lo tanto, este hecho anteriormente demostrado gráficamente; es decir, la presencia de una microporosidad muy elevada, frecuentemente distribuida de una manera heterogénea en el seno de la masa rocosa, y que se traduce en un sistema poroso de elevada tortuosidad y baja conectividad, le confiere a la muestra estudiada una elevada porosidad atrapada, y con ello una baja funcionalidad hidráulica a escala de roca matriz.

Este fenómeno, observable y reproducible gráficamente en todas y cada una de las muestras estudiadas dentro del sondeo MC2, a excepción de la zona dolomitizada del sondeo MC2-O correspondiente al tramo inferior del lagoon externo, es la principal responsable de los bajos valores de saturación, es decir, de la baja funcionalidad hidráulica observada en éstos testigos de roca.

5.2.3.- Permeabilidad vs configuración sistemas porosos

A lo largo de este trabajo se han recopilado y analizados los valores de permeabilidad horizontal al agua (K) determinados por el Swiss Federal Institute of Technology de Zürich (ETH) y por el Institut des Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Espace de Montpellier (ISTEEM), sobre pequeñas muestras ("plugs") extraídas de las litofacies estudiadas dentro del sondeo MC2. Los resultados obtenidos aparecen recogidos en la tabla 4.11. Este tipo de mediciones a escala de laboratorio son frecuentemente determinadas en numerosos estudios de índole petrofísico, hidrogeológico, etc.

De manera general, y a esta escala de roca matriz, suele afirmarse con toda lógica, que la permeabilidad al agua aumenta al incrementarse tanto la porosidad como el tamaño de grano de la roca, disminuyendo al descender el radio de acceso de poro o al aumentar el grado de compactación o cementación de la misma, siendo también importante entre otros la presencia de determinadas fases minerales arcillosas (Klinkenberg, 1941; Bloomfield y Williams, 1995; Bruha, 2001; Tanikawa y Shimamoto, 2009).

Sin embargo, si se representan gráficamente los datos de permeabilidad al agua (K) obtenidos dentro de las seis litofacies estudiadas frente a los parámetros anteriormente citados, en ninguno de los casos se obtiene una relación directa entre la permeabilidad al agua y alguno de los citados parámetros. A modo de ejemplo, la

figura 5.26 recoge los resultados obtenidos al representar los valores de porosidad abierta frente a los valores de permeabilidad al agua medidos. Tan sólo los valores obtenidos en los plugs correspondientes al talud distal, donde el grado de homogeneidad es superior al resto de las litofacies, parecen mostrar cierta relación lineal con el valor de porosidad abierta medida en los mismos.

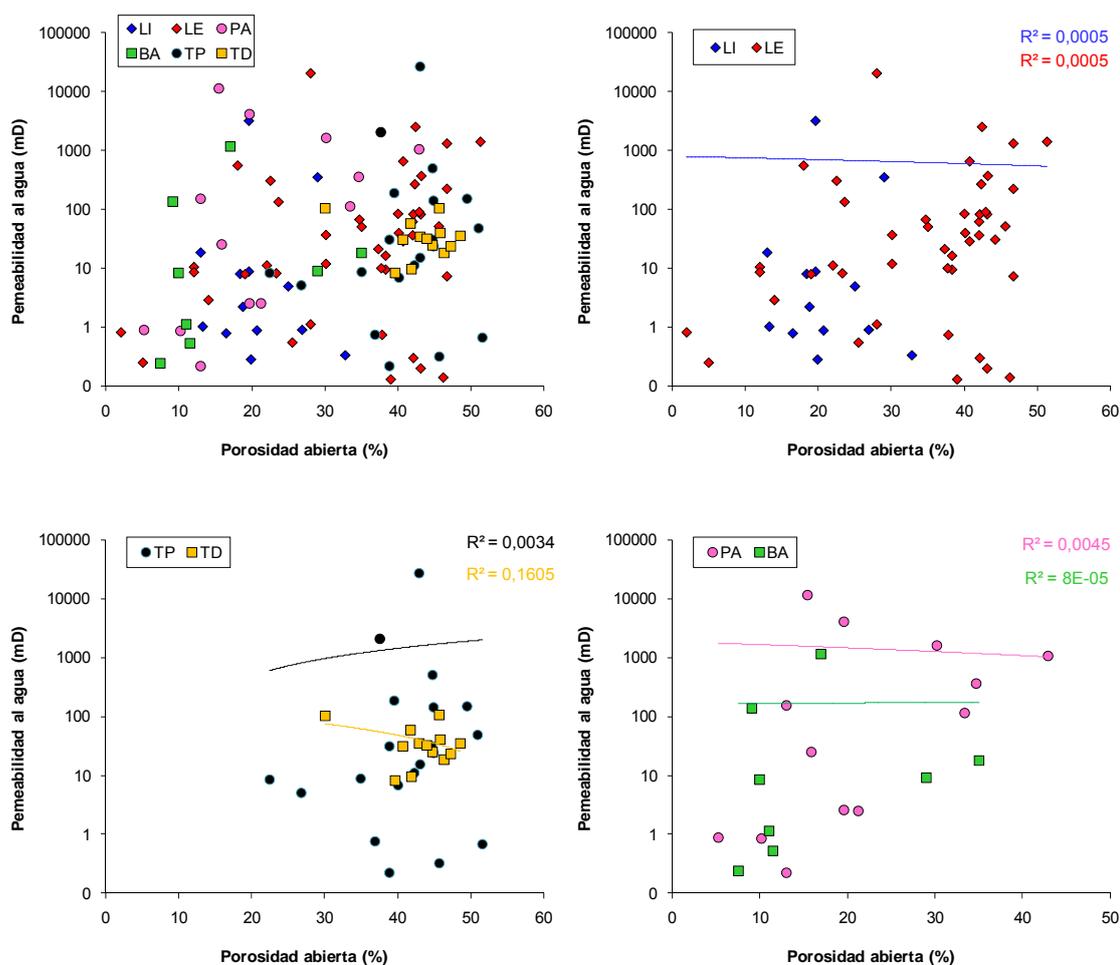


Figura 5.26.- Representación gráfica de la permeabilidad al agua (K) frente a la porosidad abierta. Ambos parámetros han sido obtenidos sobre las mismas muestras ("plugs"), que han sido obtenidas a lo largo de las diferentes litofacies presentes en el sondeo MC2. Se representan todas las muestras juntas, y según las diferentes litofacies definidas en la plataforma arrecifal. En ningún caso se aprecia una correlación entre ambos parámetros.

Sin embargo, y siguiendo la metodología seguida en el capítulo 4.2 se ha procedido a la determinación de la permeabilidad al vapor de agua (K_v'), que refleja el flujo de vapor de agua que atraviesa un volumen específico de roca por unidad de tiempo, al verse sometido a un gradiente de presión en forma de humedad.

En este caso, si representamos gráficamente los coeficientes de permeabilidad al vapor frente a los valores de porosidad abierta, obtenidos ambos sobre los mismos testigos, se obtiene una marcada relación lineal entre ambos parámetros (Figura 5.27). También se cumple parcialmente la premisa anteriormente citada, relativa a la dependencia entre radio de acceso de poro y permeabilidad (Figura 5.27), observándose cierto aumento en los valores de permeabilidad al vapor a medida que aumenta el valor de la mediana del radio de acceso de poro.

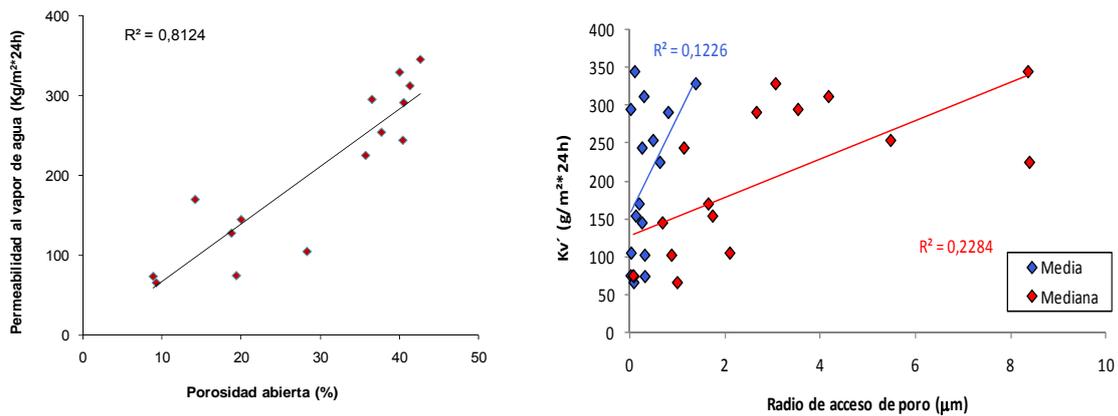


Figura 5.27.- Representación gráfica de la permeabilidad al vapor de agua (Kv') frente a la porosidad abierta (izquierda) y el radio de acceso de poro (derecha). Ambos parámetros han sido obtenidos sobre el mismo testigo de roca. Sendos parámetros guardan cierta relación lineal con los valores de permeabilidad al vapor obtenido.

Los resultados obtenidos en este subcapítulo 5.2.3 ponen de manifiesto serias dudas en la metodología seguida por algunos de los partners del proyecto ALIANCE en lo que a determinación de los valores de permeabilidad al agua se refiere. Los datos obtenidos a escala de roca matriz, parecen indicar que en un medio poroso con una marcada heterogeneidad a escala mm-cm, las medidas de permeabilidad al agua a partir de "plugs", incluso realizando un importante número de medidas, no reflejan la realidad de este parámetro, ni ponen de manifiesto la configuración de los sistemas porosos de las rocas.

Sería temática de otro trabajo la realización de un análisis detallado de la metodología del ensayo de permeabilidad al agua, representatividad de las muestras, utilización de un volumen representativo de roca, influencia de la heterogeneidad, etc. Igualmente, cabría plantearse un estudio comparativo sobre las mismas muestras, considerando ensayos de permeabilidad al agua, gas y vapor de agua.



**6.- POROSIDAD OBTENIDA A PARTIR DE
“LOGGING”**

6.1.- Introducción y metodología

El registro continuo de los parámetros geofísicos o de las propiedades físicas del entorno próximo de las paredes rocosas de un pozo o sondeo reciben genéricamente el nombre de diagrfías o “logs”. Los valores medidos son representados gráficamente de manera continua frente a la profundidad, permitiendo conocer aspectos tales como la composición litológica de las rocas perforadas, los fluidos presentes en las mismas, la geometría del pozo, la porosidad de la roca, etc., así como, deducir las estructuras y secuencias deposicionales de los sedimentos cortados (Figura 6.1).

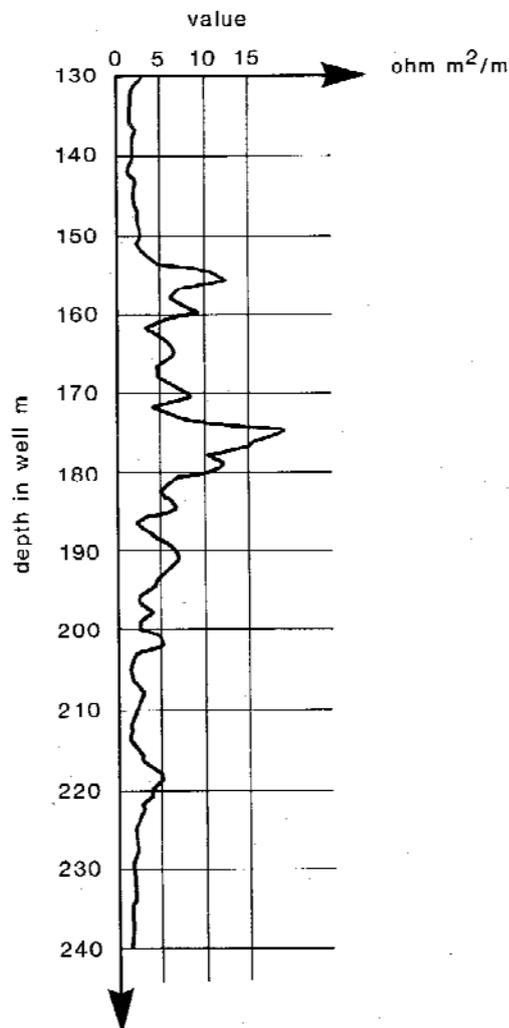


Figura 6.1.- Representación del primer “log” obtenido por Pechelbronn en Alsacia (Francia) en el año 1927 (En Allaud y Martin, 1976). En él se representa la resistividad (ohm m²/m) frente a la profundidad del sondeo.

De los diferentes tipos de “logs” existentes, los más utilizados en el campo de la hidrogeología, al igual que en el de los hidrocarburos, son los conocidos como “open hole logs” o diagráfias en pozo abierto, donde los “logs” son registrados en los tramos no entubados del sondeo, frente a los MWD (measurement while drilling) o LWD (logging while drilling) que comenzaron a utilizarse en la segunda mitad de la década de los 80 y cuya aplicación es mucho más específica.

Tal y como se recoge en la tabla 6.1, los “logs” pueden responder a la medida o registro de un fenómeno espontáneo, tal y como sucede con la radioactividad que emiten las rocas y que se recoge en los denominados “gamma ray log”; o pueden ser inducidos, como ocurre con la medida de la velocidad de propagación de ondas, donde desde un emisor se genera una onda sísmica (P o S) de una determinada frecuencia, que es recogida por un receptor, registrando el “sonic log” los tiempos de tránsito de las citadas ondas. Una tercera familia correspondería con las medidas mecánicas tales como la utilización del “caliper” para obtener un perfil vertical del diámetro del sondeo.

Tabla 6.1.- Diferentes tipos de “logs” que pueden ser obtenidos bajo la modalidad de “open hole” (Rider, M. H. 1986).

Tipo de fuente	Nombre del “log”	Parámetro obtenido
Mecánica	“Caliper”	Diámetro del sondeo
Espontánea	Temperatura	Temperatura del sondeo
	“SP o self-potential”	Corriente eléctrica espontánea
	Gamma ray	Radioactividad natural
Inducida	Resistividad	Resistencia a la corriente eléctrica
	Inducción	Conductividad eléctrica
	Sónico	Velocidad de propagación de ondas sísmicas
	Densidad	Reacción al bombardeo con rayos gamma
	Neutron	Reacción al bombardeo con neutrones

El análisis e interpretación de los parámetros obtenidos a partir de los diferentes tipos de “logs” o la combinación de varios de ellos, permiten obtener una valiosa información de índole geológica, petrofísica, geoquímica, etc. (Tabla 6.2).

De toda esta información, es la de índole petrofísica, y particularmente los valores de porosidad “porosity logs”, los que mayor relevancia presentan en el campo de la hidrogeología, y concretamente en los estudios de intrusiones salinas de acuíferos costeros, tal y como es el caso que nos ocupa en el presente trabajo.

Tabla 6.2.- Principales aplicaciones de los parámetros obtenidos en los “open hole logs” (Rider, M. H. 1986). Bajo diferentes símbolos se indica el carácter de la información obtenida: (-) Cualitativo; (+) Semicuantitativo; (*) Cuantitativo.

	Geología general				Geología del reservorio		Geoquímica	Petrofísica						Sísmica		
	Litología general	Identificación mineralógica	Correlación estratigráfica	Facies deposicionales	Identificación de fracturas	Identificación de sobre-presiones	Identificación de la roca madre	Grado de madurez	Porosidad	Permeabilidad	Volumen de arcillas y pizarras	Salinidad del agua de formación	Saturación en hidrocarburos	Gas identification	Intervalos de velocidad	Impedancia acústica
Caliper					-	-				-						
Temperatura								+						-		
SP			-	-						-	+	*				
Resistividad y conductividad	-		-	-		+	+		+			-	*	-		
Gamma ray	-	-	-	-			+				+					
Spectral gamma ray	-	+		-	-		+				+					
Sónico	+		-		+	+	+		*					-	*	*
Densidad	+	-		-	+	-	+		*					-		*
Neutron	+	-		-					*					-		

Los “porosity logs” o diagrafas de porosidad, pueden ser obtenidos a partir de cuatro tipos de registros o mediciones diferentes, ninguno de los cuales evalúa directamente el valor de la porosidad: dos de ellos corresponden con medidas nucleares (“density log” y “neutron log”). El tercer tipo, el “sonic log”, utiliza las medidas acústicas, y el cuarto y más moderno, el “nuclear magnetic resonance log” conocido usualmente como NMR, responde a la medición de la respuesta magnética.

De los cuatro tipos de log de porosidad anteriormente citados, tan sólo dos de ellos, el log sónico y el log neutrón han sido utilizados a lo largo del sondeo MC2, dentro del proyecto ALIANCE en el cual se enmarca esta Tesis; por consiguiente, este capítulo se centrará en ambos.

Log sónico (Sonic log)

Las diagráfias sónicas o “sonic logs” miden el intervalo de tiempo de tránsito (Δt , delta t o DT) de las ondas sonoras al viajar a través de las formaciones rocosas, es decir, la capacidad de una formación rocosa de transmitir las ondas sonoras compresionales (ondas P). Geológicamente esta capacidad varía con la litología, textura, y notablemente con la porosidad y densidad de las rocas.

Las sondas utilizadas en estas diagráfias simplemente registran el tiempo que tarda una onda sonora en recorrer el espacio existente entre el emisor situado en un extremo de la sonda y los receptores situados al extremo contrario de la misma. Dichas sondas cuentan con una doble matriz de transductores de pulsos sónicos, constando cada una de estas matrices de un emisor y dos receptores. Las ondas sonoras emitidas muestran una frecuencia que oscila entre 20-40 KHz, con una velocidad de registro de unos 1500 m/h, y una resolución vertical próxima a los 15 cm de sondeo. La profundidad de investigación o penetración oscila entre 12 – 100 cm dependiendo de la velocidad de la formación rocosa; a mayor velocidad mayor penetración (Serra, 1979).

El intervalo de tiempo de tránsito (Δt) expresado en μs (escala logarítmica) o $\mu s/m$ (escala métrica) es el recíproco de la velocidad de una onda sonora compresional expresado en m/s.

$$\text{Velocidad (V)} = [1/(\Delta t (\mu s) \times 10^{-6})] \text{ (m/s)}$$

Cuantitativamente, las diagráfias sónicas pueden ser utilizadas para determinar la porosidad total de las formaciones rocosas de un sondeo, siguiendo las siguientes fórmulas:

Wyllie time-average equation (Wyllie et al., 1958):

$$\Phi_S = (\Delta t_{log} - \Delta t_{ma}) / (\Delta t_{fl} - \Delta t_{ma})$$

Raymer-Hunt-Gardner (RGH) equation (Raymer et al., 1980):

$$\Phi_S = 5/8 \times [(\Delta t_{log} - \Delta t_{ma}) / \Delta t_{log}]$$

donde:

Φ_S : porosidad total deducida del sónico

Δt_{ma} : intervalo de tiempo de tránsito en la roca matriz (Tabla 6.3)

Δt_{log} : intervalo de tiempo de tránsito de la formación rocosa

Δt_{fl} : intervalo de tiempo de tránsito en el fluido presente en la formación rocosa (en la roca matriz (agua dulce y lodos: 620 $\mu\text{s/m}$; agua salada y lodo: 607 $\mu\text{s/m}$)

Tabla 6.3.- Velocidades sónicas y intervalos de tiempos de tránsito para diferentes tipos de roca matriz. Estas constantes son usadas en la obtención por fórmula de la porosidad a partir del sónico (after Schlumberger, 1972).

Litología/Fluido	Velocidad de la roca matriz (pies/seg)	Δt_{matriz} ó Δt_{fluido} [Wyllie] ($\mu\text{s/m}$)	Δt_{matriz} [RHG] ($\mu\text{s/m}$)
Areniscas	18.000 – 19.500	182 – 168	184
Calizas	21.000 – 23.000	156	161
Dolomías	23.000 – 26.000	143	144
Anhidrita	20.000	164	---
Sal	15.000	219	---
Entubado de hierro	17.500	187	---
Agua dulce filtrado de lodo	5.280	620	---
Agua salada filtrado de lodo	5.980	607	---

La fórmula de Wyllie (1958) para el cálculo de la porosidad a partir del log sónico puede ser utilizada para calcular la porosidad de areniscas y calizas consolidadas con porosidad intergranular o porosidad intercrystalina. Sin embargo, cuando esta fórmula se aplica en rocas carbonatadas con porosidad de tipo vuggy o de fractura, los valores obtenidos son menores. La razón es que la fórmula de Wyllie solamente considera la porosidad de la roca matriz, y no tiene en cuenta las porosidades secundarias de tipo vuggy o de fractura. El porcentaje en volumen de esta porosidad secundaria puede ser calculada restando la porosidad obtenida con el sónico (porosidad sónica) de la porosidad total. Los valores de porosidad total pueden ser calculados mediante la utilización de algunos de los “logs” nucleares (densidad, neutrón o la combinación de ambos).

Cualitativamente los “sonic logs” pueden aportar información en relación a las litologías, identificación de rocas madre, sobrepresiones y presencia de fracturas extensivas.

Log neutrón (Neutron log)

El log de neutrón proporciona un registro continuo de la reacción de las rocas al bombardeo de neutrones rápidos, expresado en términos de unidades de porosidad de neutrón, directamente relacionadas con índice de hidrógeno de la formación, es decir, de su riqueza en hidrógeno. Los neutrones son partículas subatómicas sin carga eléctrica cuya masa es equivalente a la del núcleo del hidrógeno. En el viaje a través de materia pierden su energía en colisiones con partículas de la misma masa, es decir con los núcleos de hidrógeno.

Las rocas absorben neutrones rápidamente cuando contienen abundantes núcleos de hidrógeno, es decir, cuando la presencia de agua es abundante (H₂O). El registro es por lo tanto, principalmente una medida del contenido de agua de una formación (agua de formación, agua de cristalización o agua libre). La riqueza en hidrógeno, o la cantidad por unidad de volumen, indicada por el índice de hidrógeno, se convierte directamente en unidades de porosidad de neutrones. La porosidad de neutrones es una porosidad real en calizas limpias, necesitando sin embargo, en otras litologías, el uso de factores de conversión.

Las sondas utilizadas en la adquisición de este tipo de log consisten en una fuente de neutrones rápidos y dos detectores. La fuente bombardea la formación con neutrones rápidos, y el detector registra la degradación en energía que sufren dichos neutrones a medida que atraviesan las formaciones. Las fuentes habitualmente utilizadas, como el plutonio-berilio (PuBe) o americio-berilio (AmBe), producen electrones rápidos con una energía de 4-6 MeV.

La resolución vertical de este tipo de log se sitúa entre 40-60 cm, alcanzando la máxima profundidad de investigación o penetración valores de 60 cm, si bien normalmente oscilan entre 15 – 25 cm dependiendo del índice de hidrógeno y con ello de la porosidad de las rocas; a menor índice de hidrógeno (menor porosidad), mayor penetración (Sherman y Locke, 1975).

Cuantitativamente, las diagráfias de neutrón pueden ser utilizadas para determinar la porosidad abierta de las formaciones rocosas de un sondeo. Como se indicaba con anterioridad, la sonda neutrón mide la abundancia en hidrógeno o índice de hidrógeno.

En rocas “limpias”, entendiendo éstas por rocas sin minerales hidratados (micas, arcillas, evaporitas, etc.), los valores medidos corresponden íntegramente al hidrógeno presente en el agua que rellena el espacio poroso de la roca, representando por lo tanto una medida de la porosidad, numéricamente expresada mediante la siguiente expresión:

$$\log_{10}\emptyset = aN + B$$

donde:

\emptyset : porosidad verdadera

a y **B**: constantes

N: índice de hidrógeno (lectura obtenida por la sonda)

Sin embargo, para obtener valores correctos es necesario llevar a cabo una calibración en función de la naturaleza de la roca matriz, pues ésta produce un efecto importante en las medidas de log neutrón. Así, el agua que ocupa el espacio poroso de una arenisca con un 20 % de porosidad da diferentes valores de índice de hidrógeno que la que ocupa el mismo volumen poroso para una roca caliza. La calibración a ejecutar puede ser llevada a cabo por medio de factores de conversión, gráficas y tablas (Figura 6.2), o por comparación respecto a medidas de porosidad medidas directamente en el laboratorio sobre testigos de sondeo.

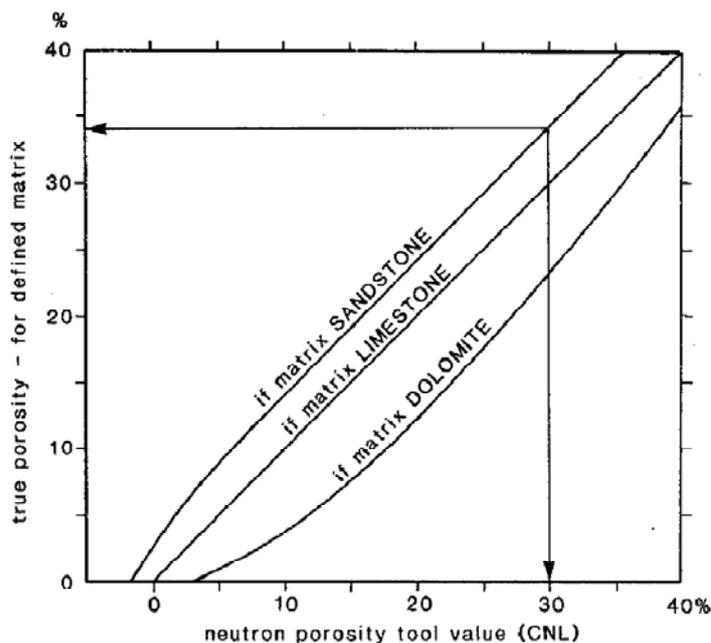


Figura 6.2.- Gráfico para obtener la porosidad verdadera a partir de una sonda neutrón CNL de Schlumberger, en función de un tipo de roca matriz definida: arenisca, caliza o dolomía. Solamente la caliza tiene una relación 1/1. (Schlumberger, 1972).

Consideración aparte merece la presencia de hidrocarburos o de una roca matriz pizarrosa, dadas las grandes desviaciones en los valores de porosidad neutrón obtenidos respecto a las medidas de laboratorio. En estos casos se requiere la aplicación secuencial de factores de conversión, tablas de ajustes, etc.

Cualitativamente, es un excelente discriminador entre el gas y el petróleo. Se puede utilizar geológicamente para identificar litologías, evaporitas, minerales hidratados y rocas volcánicas.

6.2.- Resultados obtenidos

Dentro del Campo de ensayos de Ses Sitjoles (Figura 2.6), algunos de los sondeos con recuperación de testigo perforados (MC1 a MC5) han sido estudiados mediante diferentes herramientas geofísicas asociadas a sondeos (logging), obteniéndose diferentes tipos de logs o diagráfias: sónico, neutrón, caliper, conductividad eléctrica, imágenes acústicas, etc.

Dentro del sondeo MC2, y en lo relativo al tema de la porosidad en la cual se centra la presente Tesis Doctoral, se han llevado a cabo 2 tipos de diagráfias (Figura 2.7); log sónico y log neutrón, descritos en el capítulo 6.1. Las medidas obtenidas se han centrado en los niveles afectados por el acuífero, es decir, zona de agua dulce, zona de mezcla y zona de agua salada, disponiendo por lo tanto únicamente de los datos situados entre la cota de -40 m aproximadamente, donde comienza la lámina de agua, y el final del sondeo a una cota de unos -100 m.

Tanto en el log sónico como en el neutrón, el paso vertical utilizado ha sido de 5 cm, por lo que en principio puede considerarse una escala de trabajo similar a la utilizada en el laboratorio sobre los testigos de sondeo.

Los valores de porosidad total (sónico) y abierta (neutrón) obtenidos mediante la utilización de sendas herramientas geofísicas aparecen recogidos en la figura 6.3.

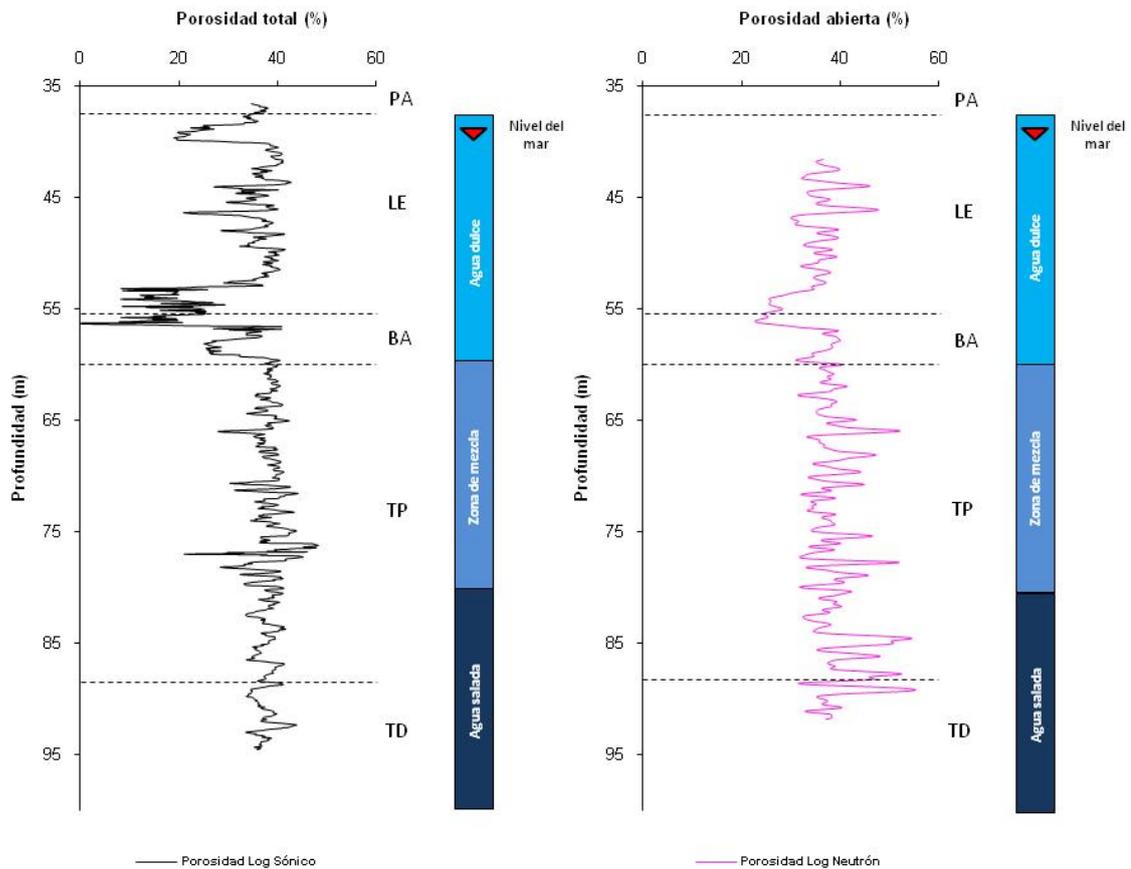


Figura 6.3.- Porosidad total (izquierda) y porosidad abierta (derecha) obtenida a lo largo del sondeo MC2, deducidas de los log sónico y neutrón respectivamente. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

6.3.- Correlación entre porosidad de logging vs laboratorio

Los perfiles de la figura 6.4 muestran una comparativa entre los valores de porosidad obtenidos mediante logging (capítulo 6.1 y 6.2) y los medidos en el laboratorio a partir de los testigos de sondeo (capítulo 4.2).

Cuando se compara de manera detallada los valores de porosidad abierta obtenidos mediante el log neutrón y en el laboratorio, éstos son muy similares, salvo tres excepciones que serán analizadas más adelante (Figura 6.4).

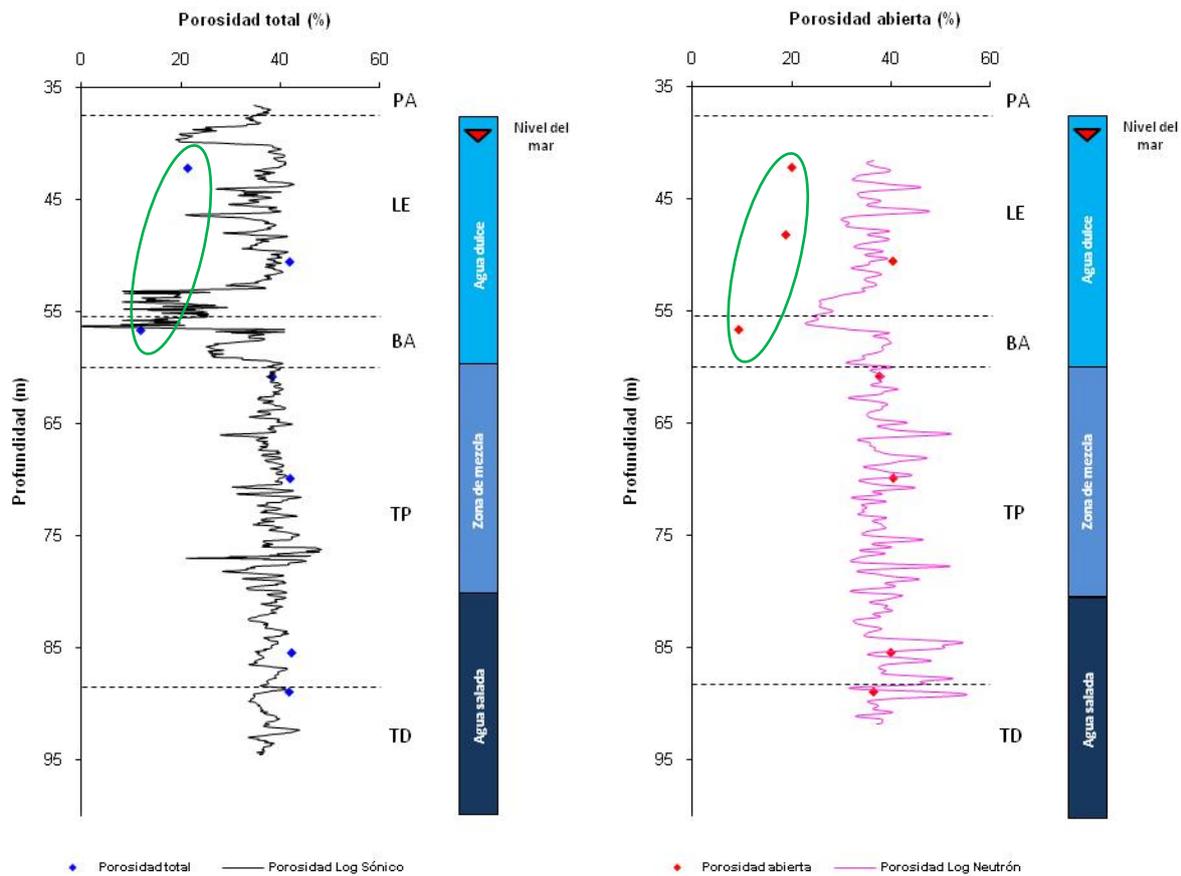


Figura 6.4.- Izquierda; Porosidad total obtenida a lo largo del sondeo MC2, deducidas del log sónico (línea negra) y en el laboratorio sobre testigos de sondeo (puntos azules). Derecha; Porosidad abierta obtenida a lo largo del sondeo MC2, deducidas del log neutrón (línea rosa) y en el laboratorio sobre testigos de sondeo (puntos rojo). Existen zonas donde las diferencias entre ambas técnicas de medición son muy importantes (círculo verde), siendo comunes para los dos tipos de log utilizados. Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

Sin embargo, en el caso del log sónico (Figura 6.4), éste muestra en general, y salvo las dos excepciones que, como en el caso anterior, se comentarán más adelante, valores de porosidad total ligeramente inferiores a los obtenidos en el laboratorio. En principio, esto sería justificable si se tiene en cuenta que la fórmula de Wyllie utilizada para la determinación de la porosidad sónica solamente considera la porosidad de la roca matriz, y no tiene en cuenta las porosidades secundarias (vuggy, disolución, fractura, etc.) frecuentes en la mayor parte de los testigos de sondeo analizados.

Sin embargo, al contrario de lo que se podría esperar, los valores de velocidad de propagación obtenidos mediante la sonda sónica son también menores que las obtenidas en el laboratorio (Figura 6.5).

Este hecho contrasta con lo esperable, ya que en primer lugar, a menor porosidad total se le presupone una mayor velocidad de propagación, y en segundo término, ya que todas las medidas de Vp realizadas a lo largo del sondeo sobre las formaciones geológicas saturadas en agua, deberían mostrar mayores velocidades de propagación que las realizadas en el laboratorio sobre testigos de sondeo completamente secos.

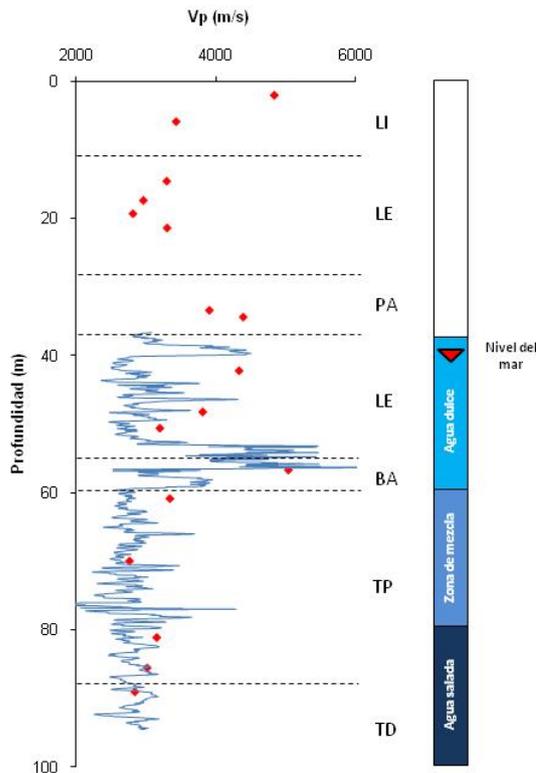


Figura 6.5.- Velocidad de propagación de ondas medidas en el sondeo mediante la utilización de una sonda sónica (gráfico azul) y los valores obtenidos directamente en el laboratorio sobre testigos de sondeo (puntos rojos). Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

Si se analiza la velocidad de propagación de ondas P vs la porosidad total medida en el laboratorio en un caso (Figura 6.6), y deducida del log sónico en otro, se puede observar que de manera individualizada, es decir, para los resultados de laboratorio, por un lado, y para los datos de logging (log sónico) por el otro, existe una marcada relación lineal entre sendos parámetros, si bien, claro está, no se alcanzan los mismos valores con las dos técnicas de análisis utilizadas. Este hecho, podría ser justificado por una de las siguientes causas, o la superposición de varias de ellas:

1) Si se analizan las frecuencias de los transductores utilizados en ambos casos, se puede observar que existe una notable diferencia entre la longitud de onda con la que trabaja la sonda sónica ($\lambda=16,6$ cm; para una frecuencia de 15 KHz y una velocidad media de 2500 m/s) y la obtenida con los transductores de 1 MHz ($\lambda= 2,5$ cm) para una misma velocidad media de trabajo, con los que se ha trabajado en el laboratorio.

Esta notable diferencia en las longitudes de ondas, se puede traducir en una importante diferencia de sensibilidad en los fenómenos de atenuación de las ondas dentro del seno de la masa rocosa.

2) En segundo término, las medidas ultrasónicas llevadas a cabo en el laboratorio han sido realizadas mediante el método de transmisión directa, mientras que en el sondeo las sondas sónicas trabajan por reflexión (Krautkrämer y Krautkrämer, 1983).

3) La mayor penetración en el seno de la masa rocosa de las ondas producidas por la sonda sónica (50-60 cm) en comparación con los espesores de 8,1 cm de los testigos de sondeo, podría representar una mayor atenuación de las ondas en el primer caso, y por lo tanto dar lugar a menores valores de velocidad de propagación.

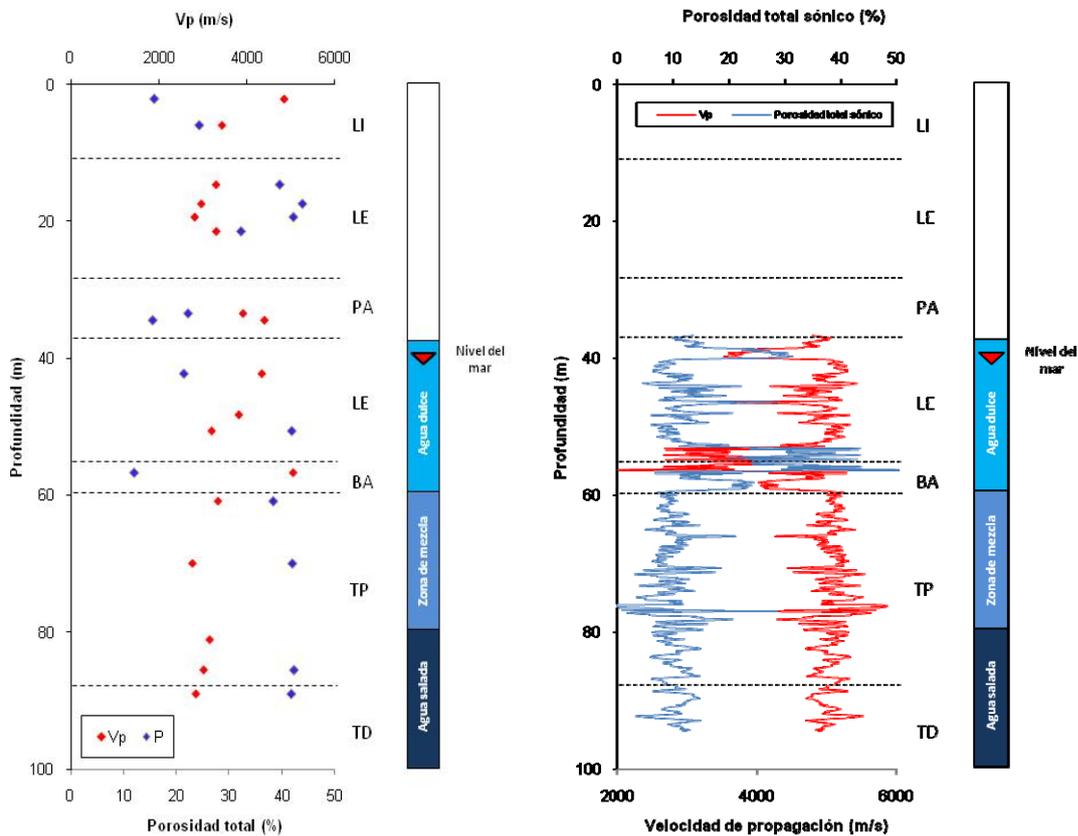


Figura 6.6.- Velocidad de propagación de ondas (V_p) versus porosidad total (P) obtenidas en el sondeo mediante la utilización de una sonda sónica (gráfico derecho) y obtenidos directamente en el laboratorio sobre testigos de sondeo (gráfico izquierdo). Se han separado las distintas facies definidas dentro del sondeo MC2: LI (lagoon interno), LE (lagoon externo), PA (parche arrecifal), BA (barrera arrecifal), TP (talud proximal) y TD (talud distal). Se presenta además la estratificación de las aguas dentro del acuífero costero de Campos, medido en el sondeo MC2 por conductividad eléctrica.

Independientemente de la causa que justifique el fenómeno observado es necesario calibrar los resultados de porosidad total calculada a partir del log sónico considerando los valores obtenidos en el laboratorio.

En relación a los puntos anómalos detectados en los perfiles de la figura 6.4, tal y como se citaba con anterioridad, se pueden observar la presencia de al menos dos puntos donde los valores de porosidad total obtenidos en el laboratorio son mucho más bajos que los obtenidos mediante log sónico (Figura 6.7).

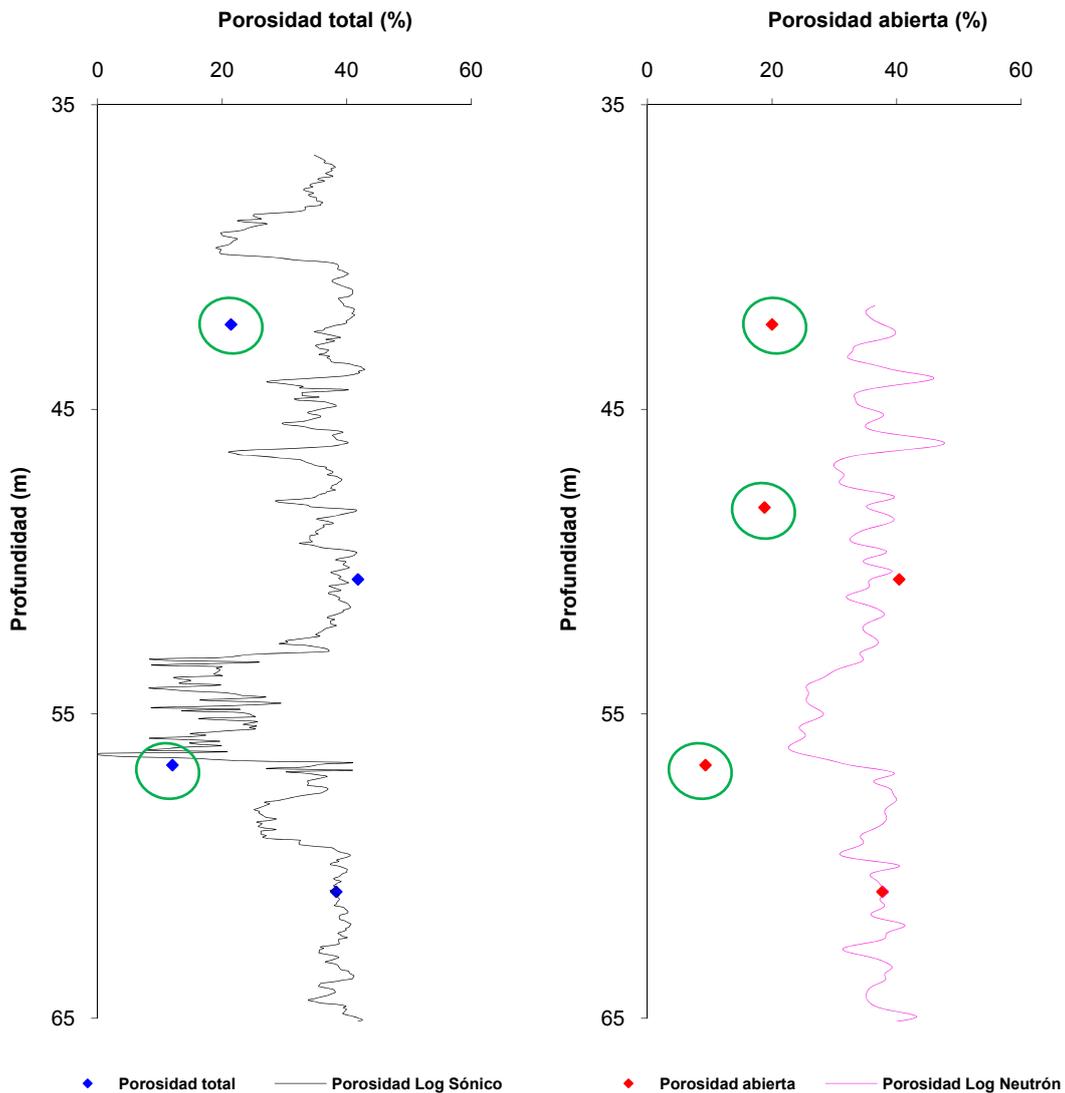


Figura 6.7.- Detalle de la zona de la figura 6.4 donde se observan las mayores discrepancias entre los datos obtenidos en el laboratorio directamente sobre testigos de sondeo y los datos obtenidos mediante logging. Con un círculo verde se localizan los valores medidos en testigos de sondeo con mayores diferencias respecto a los datos de logging.

Esta misma circunstancia puede ser observada en el caso de la porosidad abierta (Figura 6.7). En este caso, son tres los puntos donde los valores de porosidad abierta obtenidos en el laboratorio son mucho menores que los obtenidos mediante el log neutrón. Dos de los puntos coinciden en ambos gráficos, mientras que el tercero, sólo presente en el gráfico de la derecha, no ha sido calculado en el laboratorio por lo que no ha podido ser representado gráficamente. Estas tres muestras corresponden con los testigos MC2-N, MC2-O y MC2-R.

Si observamos con detalle las imágenes ópticas obtenidas (televiewer) de la pared del sondeo MC2, a las cotas correspondientes con las profundidades de los tres testigos citados, se puede observar que en todos los casos corresponden con tramos donde la porosidad se distribuye heterogéneamente a escala cm-dm, por corresponder con niveles de porosidad secundaria asociados a niveles de karstificación, disolución y dolomitización. Macroscópicamente los testigos citados muestran una porosidad muy inferior a la observada en la pared del sondeo (Figuras 6.8 y 6.9). Este hecho podría justificar por sí mismo, los notablemente inferiores valores de porosidad medidos en el laboratorio para estos tres testigos respecto a los obtenidos mediante logging.

En el caso del testigo MC2-O, el mayor valor de porosidad abierta obtenida a esta cota mediante el log neutrón, podría tener además una clara justificación en su composición mineralógica, dado que se trata de un nivel fuertemente dolomitizado.

Tal y como se describe en el capítulo 6.1, para obtener valores de porosidad neutrón correctos es necesario llevar a cabo una calibración en función de la naturaleza de la roca matriz, pues ésta produce un efecto importante en las medidas de log neutrón. Si se considera el gráfico de la figura 6.2, partiendo de una porosidad neutrón del 20 %, la porosidad real para una roca caliza será del 20 % mientras que en el caso de una dolomía disminuirá a casi la mitad (± 10 %).

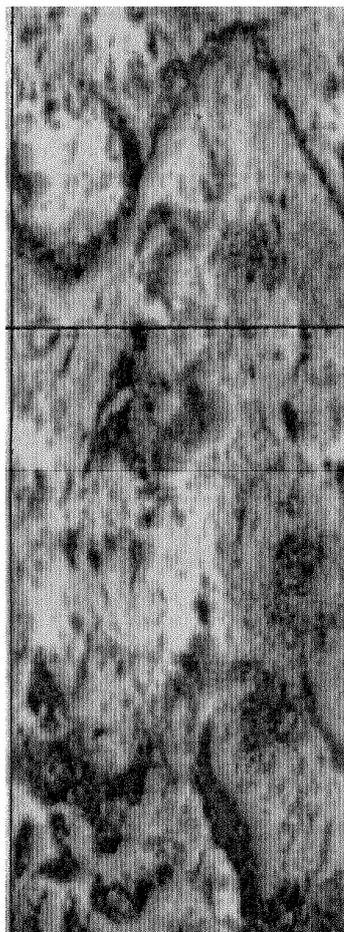
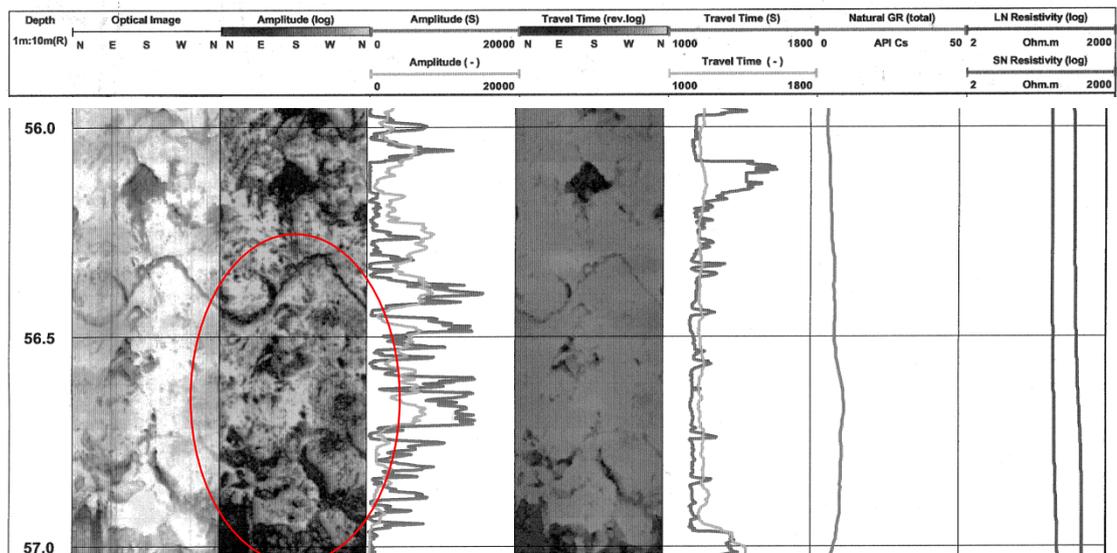
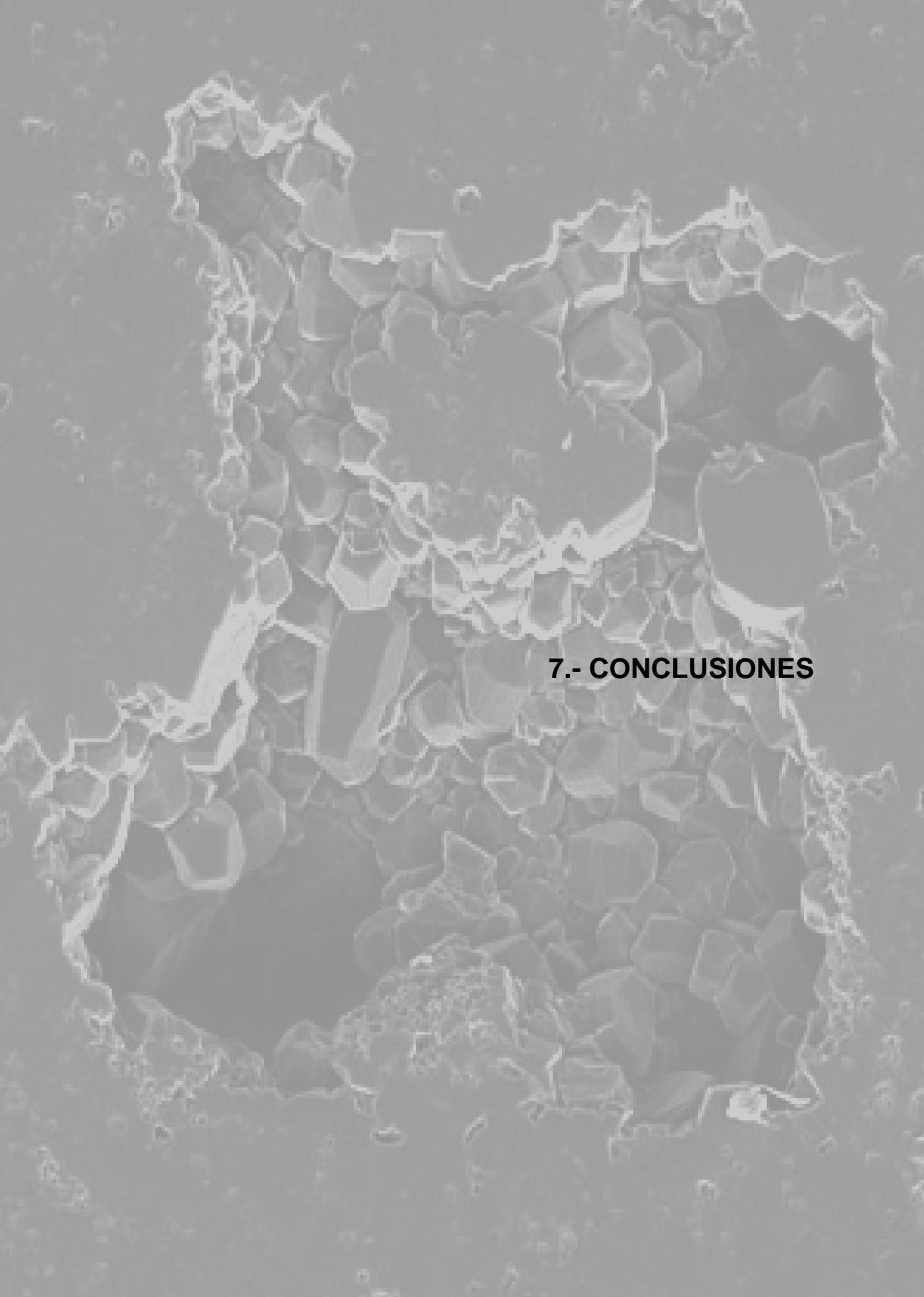


Figura 6.8.- Aspecto macroscópico de la pared del sondeo a la cota -56,48 a -56,83 m (izquierda) y del testigo de sondeo MC2-R extraído a dicha cota. Se puede observar como la pared del sondeo en sus 360 ° presenta una mayor porosidad macroscópica que la detectada en el testigo de sondeo.

A grayscale micrograph showing a cross-section of plant tissue. The image displays a complex arrangement of cells, with some cells appearing larger and more rounded, while others are smaller and more elongated. The overall structure is somewhat irregular and porous, suggesting a spongy or parenchymatous tissue. The text "7.- CONCLUSIONES" is overlaid on the right side of the image.

7.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de esta Tesis Doctoral, temáticamente clasificadas y expresadas de manera sintética aparecen recogidas a continuación:

Estratigrafía: la observación y análisis de los testigos obtenidos en los 5 sondeos perforados en el campo de ensayos de Ses Sitjoles, pone de manifiesto la presencia de 5 litofacies, coincidentes con las tradicionalmente descritas por numerosos autores para la plataforma arrecifal de Lluçmajor, que de techo a muro están representadas por: lagoon externo, lagoon interno, barrera arrecifal o coralina, talud proximal y talud distal. Sin embargo, en cuatro de los cinco sondeos perforados, se ha detectado la presencia de una sexta litofacies, constituida por un parche arrecifal que de manera discontinua aparece localizado dentro del lagoon externo.

Hidrogeología: los datos piezométricos y los análisis hidrogeoquímicos llevados a cabo en los citados sondeos, ponen de manifiesto que el nivel del agua se sitúa actualmente a unos 40 m de la superficie topográfica actual. Hasta los 60 m de profundidad el agua es dulce, abarcando la zona de mezcla desde los 60 hasta los 80 m. Por debajo de esta profundidad el acuífero costero se encuentra ocupado por agua salina, lo que confirma el importante fenómeno de intrusión salina que afecta al mismo, detectable a más de 6 Km de distancia de la línea de costa.

Dentro del complejo arrecifal, y a escala de macizo, es la base de la barrera coralina la que en su conjunto muestra mayores valores de permeabilidad, en relación al extenso karst asociado a este nivel. También el lagoon externo, el parche arrecifal y el talud proximal son altamente permeables, sin embargo, el contraste hidráulico con la base de la barrera coralina sigue siendo considerable. Por el contrario, son la base del lagoon externo y el techo de la barrera arrecifal la que en conjunto constituyen un marcado nivel de baja permeabilidad, al igual que un tramo del lagoon externo situado inmediatamente por debajo del parche arrecifal. No obstante, destaca dentro de este acuífero una marcada heterogeneidad en lo que a la distribución de la permeabilidad se refiere, existiendo dentro de todas las litofacies estudiadas, alternancias decimétricas de niveles de alta/baja permeabilidad.

Petrofísica de la roca matriz: dentro de las diferentes litofacies estudiadas, y cómo temática principal de esta Tesis, cabe destacar los siguientes aspectos:

- Heterogeneidad: los perfiles ultrasónicos obtenidos evidencian una marcada heterogeneidad a tres niveles: a) a lo largo del sondeo, si se comparan las seis litofacies establecidas, b) dentro de una misma litofacies, si se comparan los testigos analizados en cada una de ellas y, c) en relación a cada testigo, a escala mm-cm, cuando se observan los perfiles de velocidad obtenidos en cada testigo. Esta heterogeneidad, reflejada en la porosidad de la roca, es claramente observable a escala macroscópica en muchos de los testigos estudiados y tan sólo a escala microscópica en otros, pero está presente en todos y cada uno de los parámetros determinados a lo largo de esta Tesis.
- Anisotropía: de manera general puede afirmarse que la presencia de anisotropías es poco relevante. Cabría citar tan sólo, la presencia de escasos testigos con una ligera anisotropía según su eje axial, marcadas por la presencia de niveles de alta/baja porosidad perpendiculares a dicha dirección.
- Funcionalidad hidráulica: los parámetros hidráulicos obtenidos y los sistemas porosos observados, ponen de manifiesto importantes diferencias en el comportamiento que, tanto las distintas litofacies como los testigos analizados dentro de una misma litofacies, muestran frente al agua, tanto en lo que a capacidad de almacenamiento se refiere, como en la facilidad de flujo de este fluido. Estas diferencias evidencian claramente configuraciones de sistemas porosos muy distintos en el ámbito geológico estudiado. Los valores obtenidos aparecen ampliamente descritos a lo largo del texto para cada una de las litofacies estudiadas, por lo que, en estas conclusiones, cabe referirse únicamente a la baja funcionalidad hidráulica deducida para la mayor parte de los testigos de sondeo estudiados.

Pese a que la mayor parte de éstos testigos muestran importantes valores de porosidad abierta (20-40%), la funcionalidad hidráulica de ésta es muy limitada, tal y como pone de manifiesto el grado de saturación que alcanzan las muestras a bajos gradientes de presión (presión atmosférica). Estos valores de saturación tan bajos y generalizados ($48 \pm 16\%$) implican necesariamente que un elevado porcentaje de la porosidad abierta es no efectiva o atrapada; es decir, el agua penetra a través de ella de manera muy lenta, con suma dificultad y en muchos casos, una vez dentro, es difícil de extraer o de provocar

su movilización, incluso bajo elevados gradientes de presión. Estos altos valores de porosidad atrapada han sido puestos de manifiesto mediante diferentes técnicas directas (absorción libre/forzada de agua y porosimetría de inyección de mercurio).

Evidenciada la presencia de una elevada porosidad atrapada, y tras un exhaustivo análisis de los posibles parámetros involucrados en la misma (distribución de radios de poro y conductos, superficie específica, etc.), se ha podido determinar que dentro de los complejos sistemas porosos que gobiernan la hidráulica de los testigos analizados al menos una parte importante de dicha porosidad está mal comunicada (baja conectividad); esto es debido, predominantemente, a la existencia de conductos estrechos y tortuosos que dificultan la circulación del agua. Por lo tanto, los principales responsables de las bajas funcionalidades hidráulicas detectadas en estas rocas son: a) predominancia de pequeños tamaños de poros y conductos, con distribuciones generalmente sesgadas hacia los valores más pequeños, b) baja conectividad de los poros y, c) elevada tortuosidad de los conductos.

Si bien las circunstancias mencionadas no son relevantes para determinar la capacidad teórica de almacenamiento del acuífero costero, cuya saturación se obtiene en función del tiempo y de los gradientes de presión existentes, si tienen gran importancia a la hora de planificar los regímenes de su explotación, ya que a escala de roca matriz, controlan la **facilidad/dificultad de los procesos de carga y descarga del acuífero**.

Metodología: la metodología seguida a lo largo del presente trabajo, aún teniendo en cuenta las necesidades y supeditaciones de algunos ensayos, al estar la presente Tesis enmarcada dentro de los objetivos del proyecto europeo ALIANCE, ha de considerarse adecuada, tal y como reflejan los coeficientes de correlación obtenidos al analizar comparativamente los resultados obtenidos para un mismo parámetro mediante diferentes técnicas de estudio y análisis. Cabe sugerir las siguientes matizaciones:

- Las propiedades hidráulicas y dinámicas, tal y como se ha desarrollado en la Tesis, y máxime dada la marcada heterogeneidad dominante, han de ser determinadas preferentemente mediante testigos de sondeo de orden cm-dm. Por ello, los datos de permeabilidad proporcionados por el ETH e ISTEEM,

recogidos en el presente trabajo y que no cumplen dicho requisito, han de considerarse poco representativos.

- Corrobora la afirmación anterior el hecho de que los valores de porosidad abierta obtenidos sobre testigos de sondeo de gran tamaño (varios dm) muestran mejor relación lineal con los parámetros del sistema poroso, que los obtenidos a partir de pequeños plugs utilizados en porosimetría de inyección de mercurio.
- La metodología seguida en el análisis de la configuración del sistema poroso, en lo que se refiere tanto a los poros como a los conductos (tipo, tamaños, distribución, etc.) puede considerarse igualmente correcta. Se ha logrado enlazar perfectamente los datos relativos al tamaño de poro y parámetros derivados, obtenidos a partir del análisis digital de imágenes macroscópicas y microscópicas, aspecto éste habitualmente complicado, al ser detectables determinados rangos de tamaños bajo las dos escalas de observación.

Logging: En lo referente a los datos de logging tomados a lo largo del proyecto y analizados en la presente Tesis, cabe destacar los siguientes aspectos:

- Los datos de porosidad obtenidos mediante los dos tipos de “logs de porosidad” utilizados, muestran cierta controversia. Al contrario de lo que cabría esperar, los valores de porosidad total obtenidos mediante “log sínico”, son normalmente inferiores a los valores de porosidad abierta obtenidos mediante “log neutrón”. Es por tanto evidente que al menos uno de los dos tipos de diagrfías usadas necesita importantes ajustes de calibración.
- A priori, y salvo algunas excepciones justificadas en el capítulo 6, los valores de porosidad abierta calculados a partir del “log neutrón” se ajustan mejor a los valores obtenidos en el laboratorio. Por el contrario, tanto los valores de velocidad de propagación como los de porosidad total deducidos del “log sínico” son inferiores a los determinados en el laboratorio. Parece pues que este tipo último tipo de log es menos fiable a priori. No obstante, este tema muestra la suficiente complejidad para ser tratada exclusivamente por otra Tesis Doctoral.



8. BIBLIOGRAFÍA

Nota: Las referencias bibliográficas de este capítulo siguen el formato recomendado por la APA, recogidas en el libro: American Psychological Association (1994). *Publication Manual of the American Psychological Association*. 4Th. Ed. Washington: APA.

Actualmente la ISO (International Organization for Standardization) reconoce estas recomendaciones como norma estandarizada y puede ser considerada del mismo rango normativo que la ISO 690.

- Abell, A.B.; Willis, K.L.; Lange, D.A. (1999). "Mercury intrusion porosimetry and image analysis of cement-based materials". *Journal of Colloid and Interface Science*. 211. pp. 39-44.
- Adeoti, L.; Alile, O.M.; Uchegbulam, O. (2010). "Geophysical investigation of saline water intrusion into freshwater aquifers: A case study of Oniru, Lagos State Scientific". *Research and Essays*. 5 (3). pp. 248-259.
- Adepelumi, A. A.; Ako, B. D.; Ajayi, T. R.; Afolabi, O.; Omotoso, E. J. (2008). "Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria". *Environmental Geology*. 56 (5). pp. 927-933.
- Ahmed, M. D.; Bastianseen, W. G. M.; Feddes, R. A. (2005). "A new technique to estimate net groundwater use across large irrigated areas by combining remote sensing and water balance approaches". *Hydrogeology Journal*. 13 (5-6). pp. 653-664.
- Allaud, L.; Martin, M. (1976). *Schlumberger: Histoire d'une Technique*. Paris: Berger-Levrault.
- Allman, M.; Lawrence, D.F. (1972). *Geological Laboratory Techniques*. London: Blandford Press.
- Alonso, F. J.; Esbert, R. M.; Ordaz, J. (1986). "Comportamiento hídrico de calizas y dolomías". *Boletín Geológico y Minero*. XCVIII. pp. 555-576.
- Al Suleimani, Z. K.; Al Wohaibi, B. K. (2006). "Water metering pilot Project: a case study of water demand management in the Sultanate of Oman". *Agricultural and Marine Sciences*. 11. pp. 71-76.
- Aracil, E. (2001). "Caracterización de la cuña de intrusión marina mediante tomografía eléctrica. Un ejemplo en la playa de El Gorguel (Murcia)". En: *VII Simposio de Hidrogeología (2001)*. Sevilla. Tomo XXIV. pp. 671-678.
- Aracil, E.; Maruri, U.; Vallés, J.; Porres, J. A.; Martínez-Pagán, P. (2003). "Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica". *Ingeopress*. 1 22. pp 34-39.
- Aracil, E.; Maruri, U.; Vallés, J.; Porres, J. A.; Martínez-Pagán, P. (2004). "Electrical Resistivity Tomography as a technique for studying and modelling saline intrusion". *18th Salt Water Intrusion Meeting (SWIN)*. Cartagena.
- Ardilla, P. L.; Pomar, L. (2000). "Upper Miocene Karst Collapse structures of the East Coast, Mallorca, Spain". *Acta carsológica*. 29 (2). pp. 177-184.
- Arns, C.H.; Knackstedt, M.A.; Pinczewski, W.V.; Garboczi, E.J. (2002). "Computation of linear elastic properties from microtomographic images". *Geophysics*. 67 (5). pp. 1396-1405.
- Asquith, G.; Krygowski, D. (2004). *Basic Well Log Analysis*. Tulsa, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists. (AAPG).

- Assaad, F.; LaMoreaux, P. E.; Hughes, T. H. (2004). *Field Methods for Geologist and Hidrogeologist*. Berlin Heidelberg-New York: Springer-Verag.
- ASTM - D 4404-84. (1998). "Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry". In: *ASTM International. Standard on Disc. Section Four: Construction. Volume 04.08. Soil and Rock (I)*.
- ASTM - D 2216-98. (1998). "Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass". In: *ASTM International. Standard on Disc. Section Four: Construction. Volume 04.08. Soil and Rock (I)*.
- ASTM - D 2845-00. (2000). "Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock". In: *ASTM International. Standard on Disc. Section Four: Construction. Volume 04.08. Soil and Rock (I)*.
- ASTM- D4525 – 08 (2008). "Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air". In: *ASTM International. Standard on Disc. Section Four: Construction. Volume 04.08. Soil and Rock (I)*.
- Barker, R.D. (1996). "The application of electrical tomography in groundwater contamination studies". *EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, P082*.
- Barker, R.D.; Moore, J. (1998). "The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies". *The Leading Edge*. 17. pp. 1454-1458.
- Barker, J. A., Wright, T. E. J.; Fretwell, B. A. (2000). "A pulsed-velocity method of double-porosity solute transport modeling". In: Dassargues, A. (Ed). (2000). *Tracers and Modelling in Hydrogeology*. Liege: IAHS Publications. 262. pp.297-302.
- Barón, A.; González, C. (1987). "Hidrogeología de la isla de Mallorca, Palma de Mallorca". En: *IV Simposio de Hidrogeología*. Palma de Mallorca: Servicio Hidráulico de Baleares. p. 83.
- Barón, A.; González, C.; Rodríguez-Perea, A. (1995). "Karst Hydrology of Mallorca". In: Gines, A.; Gines, J. (Eds). *Karst and caves in Mallorca*. Palma de Mallorca: ENDINIS federacio Balear déspeleologia. 20. p. 216.
- Bassiouni, Z. (1994). *Theory, Measurement and Interpretation of Well Logs. Volumen 4*. Richardson-Texas: SPE Textbook Series.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Elsevier.
- Bear, J.; Verruijt, A. (1987). *Modelling groundwater flow and pollution*. Dordrecht: D. Reidel Publishing.
- Beaudoin, J.J. (1979). "Porosity measurement of some hydrated cementitious systems by high pressure mercury intrusion: Microstructural limitations". *Cement and Concrete Research*. 9. pp. 771-781.

- Belikov, B.P. Zaleskii, B.V., Rozanov, Y.A., Sanina, E.A., Timchenko, I.P. (1967). "Methods of studying the physicommechanical properties of rocks". In: Zaleskii, B.V. (Ed). *Physical and Mechanical Properties of Rocks*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation. pp. 1-58.
- Benavente, D., García del Cura, M.A., Bernabéu, A., Ordoñez, S. (2001). "Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method". *Engineering Geology*. 59 (2-3). pp. 297-312.
- Benavente, D., Lock, P., García del Cura, M. A., Ordoñez, S. (2002). "Predicting the Capillary Imbibition of Porous Rocks from Microstructure". *Transport in Porous Media*. 49 (1). pp. 59-76.
- Bel-Lan, A.; Montoto, L.; Montoto, M. (1978). "Digital processing of microscope images. Quantification of petrographic parameters related to the quality of crystalline stones". In: *International Symposium of Deterioration and protection of the stone monuments*. Paris.
- Ben-Lan, A. (1984). "Análisis de los parámetros petrográficos mediante proceso digital de imágenes". Director, Dr. Modesto Montoto San Miguel. (Tesis doctoral inédita). Universidad de Oviedo. Facultad de Geología.
- Berrezueta, E.; Castroviejo, R. (2007). "Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. I: ensayo metodológico". *Revista de Metalurgia*. 43 (4). pp. 294-309.
- Berryman, J. G.; Wang, H. F.; Tsang, Chin Fu (ed.), Myer, Larry (Ed.). (1997). "Elastic wave propagation and attenuation in a double-porosity dual-permeability medium". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 37 (1-2). pp. 63-78.
- Bertels, S. P.; Di Carlo, D.A.; Blunt, M.J. (2001). "Measurement of aperture distribution, capillary pressure, relative permeability, and in situ saturation in a rock fracture using computed tomography scanning". *Water resources research*. 37 (3). pp. 649-662.
- Bloomfield, J. P.; Williams, A. T. (1995). "An empirical liquid permeability-gas permeability correlation for use in aquifer properties studies". *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 28 (2). pp. 143-150.
- Bosch M.; Zamora, M.; Utama, W. (2002). "Lithology discrimination from physical rock properties". *Geophysics*. 67. pp. 573-781.
- Braithwaite, C. (2005). *Carbonate sediments and rocks: A manual for earth scientist and engineers*. Scotland-UK: Whittles Publishing.
- Brown, E. T. (Ed). (1981). *Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM Suggested methods*. Oxford: Pergamon Press. pp. 81-92.

- Brůha, P.; Březina, M.; Straková, J.; Trčková, J.; Živor, R. (2001). "Laboratory apparatus to measure porous material permeability". *Acta Montana IRSM AS CR*. 18(121). pp. 75-79.
- Brunner, P.; Hendricks-Frannsen, H. J.; Kgotlhang, L.; Kinzelbach, W. (2007). "Remote sensing in groundwater modeling". *Hydrology Journal*. 15 (1). pp. 5-18.
- Calvache, M. L.; Pulido-Bosch, A. (1993). "Effects of geology and human activity on the dynamics of salt-water intrusion in three coastal aquifers in southern Spain". *Environmental Geology*. 30. 215-223.
- Calleja, L.; Montoto, M.; Pérez, B.; Suárez del Río, L. M.; Martínez, A.; Menéndez Villar, B. (1989). "An ultrasonic method to analyse the progress of weathering during cyclic salt crystallization laboratory test". In: Zezza, F. (Ed.). *The Conservation of monuments in the Mediterranean Basin. Proceeding of the 1st International Symposium*. Bari. pp. 313-318.
- Carlson, W.D., Rowe, T., Ketcham, R.A., Colbert, M.W. (2003). "Applications of high-resolution X-ray computed tomography in petrology, meteoritics and palaeontology". In: Mees, F.; Swennen, R.; Van Geet, M.; Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences. Special Publication*. London: Geological Society. 215. pp. 7-22.
- Carmichael, R.S. (1982a). *CRC Handbook of physical properties of rocks. Volume I*. Cleveland: CRC Press.
- Carmichael, R.S. (1982b). *CRC Handbook of physical properties of rocks. Volume II*. Cleveland: CRC Press.
- Carmichael, R.S. (1982c). *CRC Handbook of physical properties of rocks. Volume III*. Cleveland: CRC Press.
- Castroviejo, R.; Berrezueta, E.; Lastra, R. (2002). "Microscopic digital image analysis of gold ores". *Mineral & Metallurgical Processing Journal*. 19 (2). Pp. 120-126.
- Cerepi, A.; Durand, C.; Brosse, E. (2002b). "Pore microgeometry analysis in low-resistivity sandstone reservoirs". *Journal of Petroleum Sciences and Engineering*. 35. pp. 205-232.
- Chen, Y.; Nishiyama, T.; Terada, M.; Iwamoto, W. (2000). "A fluorescent approach to the identification of grout injected into fissures and pore spaces". *Engineering Geology*. 56 (2-3). pp. 395-402.
- Choquette, P.W. y Pray, L.C. (1970). "Geologic nomenclature and classification of Porosity". *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*. (54). pp. 207-250.
- CNR-ICR. (1981). *Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità d'imbibizione. Normal 7/81*. Roma: Istituto Centrale del Restauro.
- CNR-ICR. (1982). *Assorbimento d'acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare. Normal 11/82*. Roma: Istituto Centrale del Restauro.

- CNR-ICR. (1985). *Permeabilità al vapor d'acqua. Normal 21/85*. Roma: Istituto Centrale del Restauro.
- C.N.R-I.C.R (1988). *Misura dell'indice di asciugamento (Drying Index). Normal 29/88*. Roma: Istituto Centrale del Restauro.
- Colantuono, A.; Dal Vecchio, S.; Mascolo, G.; Ferone, C.; Marino, O.; Vitale, A. (1997). "Measuring capillary absorption coefficient of porous materials". *The American Ceramic Society Bulletin*. 76 (10). pp. 67-70.
- Coles, M.E.; Hazlett, R.D.; Spanne, P.; Soll, W.E.; Muegge, E.L.; Jones, K.W.; Forbes, Pierre (Ed.). (1998). "Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography". *Journal of Petroleum Science & Engineering; Progress in core analysis*. 19 (1-2). pp.55-63.
- Cook, R.A. (1991). "Fundamentals of mercury intrusion porosimetry and its application to concrete materials science". Master of Science Thesis. New York: Cornell University.
- Cook, R. A., Hover, K. C. (1999). "Mercury porosimetry of hardened cement pastes". *Cement and Concrete Research*. 29. pp. 933-943.
- Couvreur, J. F.; Thimus, J.F. (1999). "The properties of Coupling Agents in Improving Ultrasonics Transmission". *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 33 (4). pp. 417-424.
- Custodio, E., Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Editorial Omega.
- Custodio, E., Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Madrid: Editorial Omega.
- Degueldre, C.; Pleinert, H.; Maguire, P.; Lehman, E.; Missimer, J.; Hammer, J.; Leenders, K.; Böck, H.; Townsend, D. (1996). "Porosity and pathway determination in crystalline rock by positron emission tomography and neutron radiography". *Earth and Planetary Science Letters*. 104. pp. 213-225.
- Denison, C.; Carlson, W. D.; Ketcham, R.A. (1997a). "Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography: Part I. Methods and techniques". *Journal of Metamorphic Geology*. 15. pp. 29-44.
- Denison, C.; Carlson, W.D. (1997b). "Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography: Part II. Application to natural samples". *Journal of Metamorphic Geology*. 15. pp. 45-57.
- Domenico, P.A.; Schwartz, W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Duliu, O.G. (1999). "Computer axial tomography in geosciences: an overview". *Earth Sciences Reviews*. 48. pp. 265-281.

- Duncan, N. (1969). *Engineering Geology and Rock Mechanics. Volume 2*. London: Leonard Hill.
- Dunham, R. J. (1962). "Classification of carbonate rocks according to depositional texture". In: Ham, W. E. (Ed.). *Classification of carbonate rocks*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir. 1. pp. 108-121.
- Dürrast, H.; Siegesmund, S. (1999). "Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rock". *International Journal of Earth Sciences*. 88. pp. 392-408.
- Embry, A. F.; Klován, J. E. (1971). "A late Devonian reef tract of northeastern Banks Island, NW Territories". *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. 19. pp. 730-781.
- EN-583-5 (2004). "Non-destructive testing - Ultrasonic examination - Part 5: Characterization and sizing of discontinuities". *European Committee for Standardization. (CEN)*.
- EN-1936 (1999). "Determination of a real density and apparent density, and of total and open porosity". *European Committee for Standardization. (CEN)*.
- EN-1925 (1999). "Determination of water absorption coefficient by capillarity". *European Committee for Standardization. (CEN)*.
- EN-13755 (2002). "Determination of water absorption at atmospheric pressure". *European Committee for Standardization. (CEN)*.
- Engelder, T.; Plumb, R. (1984). "Changes in situ ultrasonic properties of strain relaxation". *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geochemical Abstract*. 21. pp. 75-82.
- Esbert, R.M.; Ordaz, J.; Alonso, F.J.; Montoto, M. (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Barcelona: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos.
- Esbert, R.M.; Montoto, M. (1998). "La petrofísica y su aplicación a los estudios de la patología de la piedra". En: *Tratado de Rehabilitación. Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales*. Madrid: Departamento de Construcción. Universidad Politécnica de Madrid. 3. pp. 141-152.
- Etris, E. L.; Brumfield, D. S.; Ehrlich, R.; Sterling, J., Crabtree, Jr. (1988). "Relations between pores, throats and permeability: a petrographic/physical analysis of some carbonate grainstones and packstones". *Carbonates and Evaporites*. 3 (1). pp. 17-32.
- Exadaktylos, G.; Stavropoulou, M.; Papamichos, E.; Larsen, I.; Ringstad, C. (2000). "Rayleigh Wave Propagation in Elastic Continua: Theory and Experiment". In: *EUROMECH 419 Colloquium. "Elastic waves in Nondestructive Testing"*. Prague. pp. 1-22.

- Fitzner, B. (1990). "Porosity analysis: A method for the characterization of building stones in different weathering states". In: Marinos & Koukis (Eds). *Engineering Geology of Ancient Works. Monuments and Historical Sites*. Rotterdam: Balkema. 4. pp. 2031-2037.
- Flint, L.E. (1998). Characterisation of hydrogeologic units using matrix properties, Yucca Mountain, Nevada. US Geological Survey, Water Resources Investigations. Report 97-4243.
- Flint, L.E.; Selker, J. S. (2003a). "Use of porosity to estimate hydraulic properties of volcanic tuffs". *Advances in Water Resources*. 26. pp. 561-571.
- Flint, L.E. (2003b). "Physical and hydraulic properties of volcanic rocks from Yucca Mountain, Nevada". *Water Resources Research*. 39 (5).
- Folk, R.L. (1962). "Spectral subdivision of limestone types". In: Ham, W.E. (Ed.). *Classification of Carbonate Rocks*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir. 1. pp. 62-84.
- Geet, M.V.; Swennen, R.; Wevers, M. (2000). "Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography". *Sedimentary Geology*. 132. pp. 25-36.
- Gelabert, B. (1998). "Estructura geológica de la mitad occidental de la isla de Mallorca". *Colección Memorias Instituto Tecnológico y Geominero de España*.
- Gelabert, B.; Sàbat, F. (2002). "Relaciones entre la hidrología subterránea y la estructura geológica en la Sierra Tramuntana de Mallorca (Islas Baleares)". *Geogaceta*. 31. pp. 107-110.
- Gemitzi, A. (2002). "Simulation of coastal aquifers with the coupled use of finite elements and GIS". PhD. Thesis. Aristotle University of Thessaloniki (Greece). Department of Civil Engineering.
- Gemitzi, A.; Tolikas, D. (2007). "HYDRA model: Simulation of salt intrusion in coastal aquifers using Visual Basic and GIS". *Environmental Modelling and Software*. 22. pp. 924-936.
- Gines, J.; Gines, A. (1995). "Speleochronological aspects of karst in Majorca". In: Gines, A. And Gines, J. (Eds). *Karst and caves in Mallorca*. Palma de Mallorca: ENDINIS federacio Balear despeleologia. 20. pp. 216.
- Glass, R. J.; Nicholl, M. J.; Tidwell, V. C. (1996). "Challenging and Improving Conceptual Models for Isothermal Flow in Unsaturated, Fractured rock through Exploration of Small Scale Processes". In: *Yucca Mountain site characterization project. Sandia Report*. SAND95-1824. UC-814.
- Goodchild, J.S.; Fueten, F. (1998). "Edge detection in petrographic images using the rotating polarizer stage". *Computers and Geosciences*. 24. pp. 745-751.
- Grolier, J.; Fernández, A.; Hucher, M.; Riss, J. (1990). *Les propriétés physiques des roches: Théories et modèles*. Paris : Ed. Masson.

- Guéguen, Y.; Palciauskas, V. (1992). *Introduction à la physique des roches*. Paris: Hermann.
- Guéguen, Y.; Palciauskas, V. (1994). *Introduction to the physics of rocks*. New Jersey: Princeton University Press.
- Gundersen, H. J. G.; Bendtsen, T. F.; Korbo, L.; Marcussen, N.; Moller, A.; Nielsen, K.; Nyengard, J. R.; Pakkenberg, B.; Sorensen, F. B.; Vesterby, A.; West, M. J. (1988). "Some new, simple and efficient stereological methods and their use in pathological research and diagnosis". *Acta Pathologica, Microbiologica et Immunologica Scandinavica*. 96. pp. 379-394.
- Hardy, H.R. Jr. (2003). *Acoustic emission/Microseismic activity, volume 1: Principles, Techniques and Geotechnical Applications*. A. A. Balkema Publishers.
- Haynes, J. M. (1973). "Stereological analysis of pore structure". *Materiaux et Constructions*. 6 (33). pp. 175-179.
- Hellmuth, K-H.; Siitari-Kauppi, M. (1990). *Investigation of the porosity of rocks Impregnation with ¹⁴C-polymethylmethacrylate (PMMA), a new technique*. Helsinki: STUK-B-VALO 63.
- Hellmuth, K.H.; Siitari-Kauppi, M.; Lindberg, A. (1993). "A study of porosity and migration pathways in crystalline rock by impregnation with ¹⁴C-polymethylmethacrylate". *Journal of Contaminant Hydrology*. 13. pp. 403-418.
- Hellmuth, K.H.; Siitari-Kauppi, M.; Klobes, P.; Goebbels, J. (1999). "Imaging and Analyzing Rock Porosity by Autoradiography and Hg- porosimetry/X-ray Computer tomography Applications". *Physics and Chemistry of the Earth (A)*. 24 (7). pp. 569-573.
- Howard, C.V.; Reed, M.G. (1998). *Unbiased Stereology: Three Dimensional Measurement in Microscopy*. New York: Royal Microscopical Society and Springer-Verlag.
- Hilpert, M.; Miller, C.T. (2001). "Pore morphology simulation of drainage in totally wetting porous media". *Advances in Water Resources*. 24. pp. 243-255.
- Hubbert, M. K. (1956). "Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids". *Transaction of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*. 207. pp. 222-239.
- Hudson, J.A. (1989). *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*. London: Butterworths.
- Humphrey, M.D.; Istok, J.D.; Flint, L.E.; Flint, A.L. (1996). "Improved method for measuring water imbibition rates on low-permeability porous media". *Soil Science Society American Journal*. 60. pp. 28-34.
- Humphries, D.W. (1992). *The preparation of thin sections of rocks, minerals and ceramics*. Royal Microscopical Society. Microscopy Handbooks, 24. Oxford: Oxford Science Publications. 24

- Hutchison, C.S. (1974). *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*. New York: John Wiley and Sons.
- ISRM. (1978). "International Society for Rock Mechanics. Methods for the quantitative description of rock masses and discontinuities". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. 15. pp. 319– 368.
- Jacobs, P.; De Cleene, M. (1994). "Interactive physical weathering and bioreceptivity studies on building stones monitored by computerised X-ray tomography (CT) as a potential non-destructive research tool". *EC Workshop on Non-Destructive Testing to Evaluate Damage due to Environmental Effects on Historic Monuments, Preprints*. Trieste. pp. 29-43.
- Jacobs, P. (Eds.) (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215. pp. 69-80.
- Jaeggi, D. (2006). "Multiscalar porosity structure of a Miocene reefal carbonate complex". Doctoral Thesis. Swiss Federal Institute of Technology. Zürich.
- James, N.P. (1984). "Shallowing-upward sequences in carbonates". In: Walker, R.G. (Ed.). *Facies Models*. Canada: Geological Association of Canada. pp. 213–228.
- Janz, M. (1997). "Methods of Measuring the Moisture Diffusivity at High Moisture Levels" Licenciante Thesis. University of Lund.
- Johns, R.A.; Steude, J.S.; Castanier, L.M.; Roberts, P.V. (1993). "Non-destructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography". *Journal of Geophysical Research*. 98 (B2). pp. 1889-1900.
- Jones, K.W.; Feng, H.; Lindquist, W.B.; Adler, P.M.; Thovert, J.F.; Vekemans, B.; Vincze, L.; Szaloki, I.; Van Grieken, R.; Adams, F.; Riekkel, C. (2003). "Study of the microgeometry of porous materials using synchrotron computed microtomography". In: Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M., Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215. pp. 39-49.
- Jorden, J. R.; Campbell, F. L. (1984). *Well logging I. Rock Properties, Borehole Environment, Mud and Temperature Logging*. SPE Monograph Volume 9. Dallas: Society of Petroleum Engineers.
- Jorden, J. R.; Campbell, F. L. (1986). *Well logging II. Electric and Acoustic Logging*. SPE Monograph Volume 10. Dallas: Society of Petroleum Engineers.
- Jorroto, S.; Pulido-Bosch, A.; Gisbert, J.; Sánchez, F. (2005). "Las diagráfias y la caracterización de la influencia de los bombeos de agua de mar sobre el acuífero del delta del Andarax (Almería)". En: López-Geta, J.A.; Rubio, J. C.; Martín Machuca, M. (Eds.). *VI Simposio del Agua en Andalucía*. Sevilla: IGME. pp. 439-449.
- Karlsson, L. M.; Cruz-Orive, L. M. (1992). "The new stereological tools in Metallography: estimation of pore size and number in aluminium". *Journal of Microscopy*. 165 (3). pp. 341-391.

- Keller, A. (1998). "High Resolution, Non-destructive Measurement and Characterization of Fracture Apertures". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 35 (8). pp. 1037-1050.
- Ketcham, R.A.; Carlson, W.D. (2001). "Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences". *Computers and Geosciences*. 27. pp. 381-400.
- Ketcham, R.A.; Iturrino, G.J., (2004). "Non destructive high-resolution visualization and measurement of anisotropic effective porosity in complex lithologies using high-resolution X-ray computed tomography". *Journal of Hydrology*. 302. pp. 92–106.
- Klein, H.; Ullemeyer, K.; Brockmeier, H.G. (1999). "Texture determination with X-rays and neutrons - advanced methods". In: *Textures and Physical Properties of Rocks*. Special Issue. Gottinger: Arbeiten zur Geologie und Paläontologie. pp. 86-88.
- Klinkenberg, L. J. (1941). "The Permeability Of Porous Media To Liquids And Gases". *Drilling and Production Practice*. pp. 41-200, 1941
- Klobes, P.; Riesemeier, H.; Meyer, K.; Goebbels, J.; Hellmuth, K.H. (1997a). "Rock porosity determination by combination of X-ray computerized tomography with mercury porosimetry". *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*. 357. pp. 543-547
- Klobes, P.; Riesemeier, H.; Meyer, K.; Goebbels, J.; Siitari-Kauppi, M.; Hellmuth, K.H. (1997b). "Investigation of rock samples using X-ray microcomputer-tomography before and after mercury intrusion porosimetry". In: *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*. Materials Research Society Symposium Proceedings. Pittsburgh: Materials Research Society. 465. pp. 863-870.
- Kobranova, V.N. (1989). *Petrophysics*. Moscow: Mir Publications.
- Kozaki, T.; Tomioka, S.; Liu, J.; Kozai, N.; Suzuki, S.; Enoto, T.; Sato, S. (2002). "Diffusion of radionuclides and microstructure of compacted bentonite observed with micro-CT". In: *Clays In Natural And Engineered Barriers For Radioactive Waste Confinement*. Reims. pp. 315-316.
- Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H. (1983). *Ultrasonics Testing of Materials*. 3rd Edition. New York: Springer-Verlag.
- Labo, J. (1987). *A practical introduction to borehole geophysics. Volume 2*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
- Lähdemäki, T.; Kelokaski, M.; Siitari-Kauppi, M.; Voutilainen, M.; Myllys, M.; Turpeinen, T.; Timonen, J.; Mateos, F.; Montoto, M. (2007). "Characterizing Low-Permeable Granitic Rock from Micrometer to Centimeter Scale: X-ray Microcomputed Tomography, Confocal Laser Scanning Microscopy and the 14C-PMMA Method". In: Dunn, D.S.; Poinssot, C.; Begg, B. (Eds.). (2007). *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX*. MRS Symposium. Proceeding. 985. pp. 587-592

- Landis, E.N.; Nagy, E.N.; Keane, D.T. (2002). "Microstructure and fracture in three dimensions". *Engineering Fracture Mechanics*. 70. pp. 911-925.
- Lesniak, G. (1999). "Application of computer analysis of microscopic images in petrophysical investigations". *Przeгляд-Geologiczny*. 47 (7). pp.644-651.
- Levine, M. D. (1995). *Vision in Man and Machine*. New York: McGraw-Hill.
- Lucia, F. J. (2007). *Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach*. 2ª Edición. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Mamillan, M. (1981). "Connaissances actualles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs". In: R. Rossi-Manaresi (Ed.). *The Conservation of Stone II*. Bologna. pp. 73-90.
- Martín, J.; Mosquera, M. J.; Alcántara, R. (1997). P9702345. "Un procedimiento para el estudio de procesos de interacción sólido-agua y un aparato para su realización". Fecha de prioridad: 10-11-97. Universidad de Cádiz.
- Martín, J.; Navas, F. J.; Alcántara, R. (2000). 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. 5th-8th, April, 2000, Seville (Spain). 181-183.
- Masciopinto, C. (2006). "Simulation of coastal groundwater remediation: the case of Nardo fractured aquifer in Southern Italy". *Environmental Modelling and Software*. 21 (1). pp. 87-104.
- Masiyandima, M.; Van der Stoep, I.; Mwanasawani, T.; Pfupajena, S. C. (2002). "Groundwater management strategies and their implications on irrigated agricultura: the case of Dendron aquifer in northern Province South Africa". *Physics and Chemistry of the Earth*. 27. pp. 935-940.
- Mateos, F.; Montoto, M. (2004). "Comportamiento hidráulico de la roca matriz en el acuífero costero del área calcárea de Campos (Mallorca)". *Geogaceta*. 36. pp. 127-130.
- Mateos, F.; Esbert, R.Mª.; Rojo, A.; Valdeón, L. (2006). "Evaluación del grado de penetración de tratamientos consolidantes mediante la determinación de las variaciones en la velocidad de propagación de ondas longitudinales". *RECOPAR*. 3. pp. 33-38.
- Mateos, F., Montoto, M., Siitari-Kauppi, Ikonen, J. (2009). Rock matrix characterisation from micro to centimetric scales of selected rock cores from boreholes FUN-05-001 (Grimsel Test Site - Switzerland). 4th. Annual Workshop Proceedings 6TH EC FP - FUNMIG IP. Karlsruhe 24th – 27th November 2008.
- Matthews, G.P.; Spearing, M.C. (1992). "Measurement and modeling of diffusion, porosity and other pore level characteristics of sandstones". *Marine and Petroleum Geology*. 9. pp. 146-154.
- Mauricio, A.; Figueiredo, C. (2000). "Texture analysis of Grey-Tone images by mathematical morphology: A nondestructive tool for the quantitative assessment of stone decay". *Mathematical geology*. 32 (5). pp. 619-642.

- Mees, F.; Swennen, R.; Van Geet, M.; Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215. pp. 39-49.
- Meléndez Asensio M., Arquer F. y Villanueva M. (2007): Investigación en el acuífero carbonatado carbonífero oculto bajo la Cuenca Mesoterciaria de Asturias. XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales, Oviedo, 7 a 11 de Octubre de 2007.
- Mendieta, F. (2001). "Aplicación de las técnicas petroleras de investigación para la búsqueda de aguas subterráneas. Sísmica de alta resolución". En: Porres, J.A.; Ibañez, S. (Eds.). (2001). *El agua subterránea: prospección, captación y repercusiones en la obra civil*. Burgos: Servicio de publicaciones de la Universidad de Burgos.
- Menéndez, B. (1992). Cuantificación de componentes petrográficos mediante técnicas de microscopía y estereología. Director, Dr. Modesto Montoto San Miguel. (Tesis doctoral inédita). Universidad de Oviedo. Facultad de Geología.
- Miaoyue, W.; Qingyum, D. (2001). "Near Surface Geophysical Imaging and its Application to Engineering Geology". *International Society for Rock Mechanics News Journal*. 7.
- Montoto, L.; Montoto, M.; Bel-Lan, A. (1978). "A method to measure pores and fissures in geologic materials under SEM by digital image processing". In: *Proceeding of 9th International Congress on Electron Microscopy*. Toronto. pp. 213-225.
- Montoto, M. (1978a). "Fabric and texture of rock materials in relation to their engineering properties". In: *Proceeding of 3rd Int. Congress of the Association of Engineering Geology*. 10. pp. 79-92.
- Montoto, M.; Bel-Lan, A.; Montoto, L. (1978b). "Microscopic quantification of textures and fissures in rocks by digital image processing". In: *Proceeding of 3rd International Congress of Engineering Geology*. Madrid. 2. pp. 51-60.
- Montoto, M.; Montoto, L.; Roshoff, K.; Leijon, B. (1980). "Microfractographic study of heated and non-heated Stripa granite". *Subsurface Space. Proceeding of International Symposium, Rockstore 80*. Stockholm. 3. pp. 1357-1368.
- Montoto, M.; Bel-Lan, A. (1981b). "A thinning transform for digital images". *Signal Processing*. 3 (1). pp. 37-47.
- Montoto, M.; Bel-Lan, A.; Montoto, L. (1981c). "Quantification of rock microfractography by digital image analysis. *Proceeding of 2nd Scandinavian Congress on Image Analysis*. pp. 189-194.
- Montoto, M.; Montoto, L.; Roshoff, K.; Leijon, B.; Bel-Lan, A. (1981d). "Almacenamiento de residuos radioactivos en macizos graníticos: análisis de la microfisuración térmica". *Memorandum del Symposium Uso Industrial del Subsuelo*. Madrid. 1. 15 pp.

- Montoto, M.; Suárez del Río, L.M.; Khair, W.; Hardy, H. R. (1981f). "Acoustic emission behaviour of sound and weak granites: Petrographic interpretation". *Weak Rock, soft, fractured and weathered rock*. 1. pp. 285-290.
- Montoto, L. (1982). "Digital Multi-Image Analysis: Applications to the quantification of rock microfractography". *IBM Journal of Research and Development*. 26. pp.735-745.
- Montoto, M. (1983). "Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks". *5th. International Congress of the International Society for Rock Mechanics*. Melbourne. B. pp. 93-98.
- Montoto, M.; Suárez del Río, L.M.; Khair, A.W.; Hardy, H.R. (1984b). "Acoustic emission in uniaxially loaded granitic rocks in relation to their petrographic character". In: Hardy, H. R. Jr. (Ed.). *Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*. Clausthal: Trans Tech Publications. pp. 83-100.
- Montoto, M.; Calleja, L.; Pérez, B.; Eibert, R.M. (1991a). "Evaluation in situ of the state of deterioration of Monumental stones by non-destructive ultrasonic techniques". In: Vandiver, P. B.; Druzik, J.; Wheele, G. S. (Eds.). *Materials Issues in Art and Archaeology II*. pp. 273-284.
- Montoto, M.; Calleja, L.; Pérez García, B.; Suárez del Río, L.M.; Ruiz de Argandoña, V.G.; Eibert, R.M.; Grossi, C.M. (1991b). "Non-destructive ultrasonic procedure to evaluate in situ the relative deterioration of Monumental stones: Preliminary results". *Science, Technology and European Cultural Heritage. Commission of the European Communities*. pp. 545-548.
- Montoto, M.; Valdeón, L.; Côtte, P.; Calleja, L.; Corral, N.; López, T.; Sánchez, B.; Eibert, R.M. (1994c). "Non-destructive characterization of the state of deterioration of Megaliths by ultrasonic tomography: a petrophysical interpretation". *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. pp. 3-9.
- Montoto, M.; Valdeón, L.; Eibert, R.M. (1996d). "Non-destructive tests in Stone Conservation: Tomography of the Axeitos (La Coruña, Spain) Megalith". *Degradation and Conservation of granitic rocks in monuments - Protection and Conservation of European Cultural Heritage. European Commission*. pp. 281-287.
- Montoto, M. (1996f). "Técnicas no destructivas aplicadas a la Conservación de Patrimonio Histórico". En: *Técnicas de diagnóstico aplicadas a la Conservación de materiales de construcción en los Edificios Históricos*. Sevilla: Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.
- Montoto, M. (1999a). "Petrophysics: the Petrographic Interpretation of the Physical Properties of the Intact Rock". In: *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie Sb. 4 (210). Special Issue, Textures and Physical Properties of Rocks*. pp. 132-133.
- Montoto, M.; Eibert, R.M. (1999b). "Petrofísica de la roca matriz". *Trabajos de Geología*. 21. pp. 239-252.

- Montoto, M. (2000b). "Non-destructive tests applied to Stone Conservation. Why they are not so much effective? What can be done as a remedy?" In: Galán, E. (Ed.). *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*. Sevilla: Universidad de Sevilla. pp. 185-187.
- Montoto, M. (2003). *Petrophysics at the rock matrix scale: hydraulic properties and petrographic interpretation*. Publicación técnica 11/2003. Madrid: ENRESA.
- Montoto, M.; Rodríguez-Rey, A.; Martínez-Nistal, A.; Autio, J. (2004). "Characterization of the Rock Matrix Porosity in the EDZ by Quantitative Microscopy: Methodology applied to the Experimental Full Scale Deposition Holes in the Research Tunnel at Olkiluoto (Finland)". In: *Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories*. Proceedings of a European Commission CLUSTER Conference held in Luxembourg. EUR Series.
- Montoto, M.; Mateos, F. (2006). "Characterization of water pathways in low permeable rocks at the rock matrix scale: Methodological review". *Journal of Iberian Geology*. 32 (2). pp. 197-213.
- Moore, C. H. (2001). *Carbonate reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework*. London: Ed. Elsevier.
- Morales, M.; Castillo, J. (2000). "Generalidades de los Métodos Geofísicos Aplicados a la Geohidrología". En: *Quinto Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora*. Hermosillo: Universidad de Sonora.
- Möri, A.; Bühler, C.; Haag, P.; Ota, K. (1996). "Connected Porosity (CP) – Visualising the pore space in crystalline rock matrix using fluorescent acrylic resin". Nagra International Report. Wettingen: Nagra.
- Mosquera, M. J.; Alcántara, R.; Martín, J. (1998). "New Procedure for Performing Moisture Absorption Test". *American Ceramic Society Bulletin*. 77 (10). pp. 66-81.
- Mosquera, M.J.; Rivas, T.; Prieto, B.; Silva, B. (2000). "Capillary rise in granitic rock: Interpretation of kinetics on the basis of pore structure". *Journal of Colloid and Interface Science*. 222. pp. 41-45.
- Morel-Seytoux, H.J. (1969). "Introduction to flow of two immiscible liquids in porous media". In: De Wiest, R.J.M (Ed.). *Flow through Porous Media*. Academic Press. pp. 455-516.
- Moura, A.; Morandini, A.; Montoto, M. (2004). "Characterisation and market: the need of simple and reliable devices for product characterisation and quality control. Needs and priorities in stone characterisation". In: Bruno, R.; Montoto, M.; Paspaliaris, (Eds.). *OSNET, Stone Characterisation, Technical Edition 1*. Athens: NTUA.
- N.A.S.A. SP-S113 (1.973).- "Non destructive testing". Ed. N.A.S.A. (Washington D.C.), 282 pp.

- Naji, A.; Chend, A. H.-D.; Ouazar, D. (1999). "BEM solution of stochastic seawater intrusion problem". *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 23. pp. 529-537.
- Navas, F. J. (2005). "Estudio teórico y experimental del proceso de absorción capilar". Director, Dr. Joaquín Martín Calleja. Universidad de Cádiz. Facultad de Ciencias.
- Nistal, A. (1993). "Discriminación, cuantificación y cartografiado de componentes petrográficos mediante proceso digital de multi-imágenes microscópicas". Director, Dr. Modesto Montoto San Miguel. (Tesis doctoral inédita). Universidad de Oviedo. Facultad de Geología.
- Nguyen, F.; Kemna, A.; Antonsson, A.; Engesgaard, P.; Kuras, A.; Ogilvy, R.; Gisbert, J.; Jorreto, S.; Pulido-Bosch, A. (2009). "Characterization of seawater intrusions using 2D electrical Tomography". *Near Surface Geophysics*. 7. pp. 377-390.
- Noetinger, B.; Estebenet, T. (2000). "Up-Scaling of Double Porosity Fractured Media Using Continuous-Time Random Walks Methods". *Transport in Porous Media*. 39. pp. 315-337.
- Ogilvy, R D, Kuras, O, Meldrum, P I, Wilkinson, P B, Chambers J E, Gisbert J., Jorreto S, Pulido Bosch A, Kemna A, Nguyen F., and Tsourlos P (2007). Automated Monitoring of Coastal Aquifers with Electrical Resistivity Tomography. In *Proceedings TIAC'07 International Conference on Technology of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers, Almeria, Spain, 16-19 October 2007*.
- Ogilvy, R D.; Kuras, O.; Meldrum, P I.; Wilkinson, P. B.; Gisbert, J.; Jorreto, S.; Frances, I.; Pulido Bosch, A. (2009). "Automated time-Lapse Electrical Resistivity Tomography (ALERT) for monitoring Coastal Aquifers". *Near Surface Geophysics journal*. 7. pp 367-375.
- Oude, G. H. P. (2001). "Salt water intrusion in a three-dimensional groundwater system in The Netherlands: a numerical study". *Transport in porous media*. 43 (1). pp. 137-158.
- Pérez, J.L.; Bello, M.A. (2001). "Fractal geometry and mercury porosimetry. Comparison and application of proposed models on building stones". *Applied Surface Science*. 185. pp. 99-107.
- Pérez, B.; Montoto, M.; Calleja, L.; Martínez, N., Ordaz, J. (1989). "An ultrasonic method for evaluating the deterioration degree of monumental stones: preliminary results". *Ultrasonics International* 89. Madrid: Butterworth Scientific Ltd. pp. 84-89.
- Petford, N.; Davidson, G.; Miller, J.A. (2001). "Investigation of the petrophysical properties of a porous sandstone sample using scanning laser microscopy". *Petroleum Geoscience*. 7 (2). pp. 99-105.

- Pettyjohn, W. A. (1979). "Groundwater and satellites: An overview/introduction". In: Deutsch, M.; Wiesnet, D.R.; Rango, A. (Eds). *Satellite hydrology. Proceeding of the Fifth Annual William T. Pecora Memorial. Symposium on Remote Sensing*. Minneapolis: American Water resources Association. pp. 385-386.
- Pininska, J. (1982). "Comparison of some dynamic non-destructive tests results for different geological conditions". In: *Proceeding of Conference ESPOT II*. Haga. pp. 7-11.
- Pininska, J. (1986). "Surface wave velocity measurement as a laboratory non-destructive control of the rocks properties". In: *Proceeding of the 5th International Congress of the IAEG*. Buenos Aires: IAEG. pp. 50-65.
- Pleinert, H.; Degueldre, C. (1995). "Neutron radiography measurement of porosity of crystalline rock samples: a feasibility study". *Journal of Contaminant Hydrology*. 19. pp. 29-46.
- Pomar, L.; Ward, W. C. (1995). "Sea-Level Changes, Carbonate Production and Platform Architecture: The Lluçmajor Platform, Mallorca, Spain". In: Haq, B, U. (Ed). *Sequence Stratigraphy and Depositional Response to Eustatic, Tectonic and Climatic Forcing*. Dordrecht: Kluwer academic. pp. 87-112.
- Pomar, L.; Ward, W. C. (1999). "Reservoir Scale Heterogeneity in Depositional Packages and Diagenetic Patterns on a Reef-Rimmed Platform, Upper Miocene, Mallorca, Spain". *AAPG Bulletin*. 83. pp. 1759-1773.
- Pomar, L.; Ward, W. C.; Green, D. G. (1996). "Upper Miocene reef complex of the Lluçmajor area, Mallorca, Spain". In: Franseen, E. K.; Esteban, M.; Ward, W. C.; Rouchy, J. M. (Eds.). *Models for carbonate stratigraphy from Miocene reef complexes of Mediterranean regions. Concepts in Sedimentology and Paleontology*. Tulsa: SEPM. 5. pp. 191-225.
- Pomar, L.; Brandano, M.; Westphal, H. (2004a). "Environmental factors influencing skeletal grain sediment associations: a critical review of Miocene examples from the western Mediterranean". *Sedimentology*. 51. pp. 627-651.
- Popp, T.; Kern, H. (1998). "Ultrasonics Wave Velocities, Gas Permeability and Porosity in Natural and Granular Rock Salt". *Physics and Chemistry of the Earth*. 23 (3). pp. 373-378.
- Pore-Cor. "A new dimension in pore analysis." From: <http://www.pore-cor.com/about.htm>.
- Prasad, M.; Manghnani, M.H. (1997). "Effects of pore and differential pressure on compressional wave velocity and quality factor in Berea and Michigan sandstones". *Geophysics*. 62 (4). pp. 1163-1176.
- Pusch, R. (2001). "The microstructure of MX-80 clay with respect to its bulk physical properties under different environments conditions". *SKB report. TR-01-08*.
- Pyrak-Nolte, L.J.; Xun, L.; Changjiu, X. (2001). "Seismic Imaging of Heterogeneity". *International Society for Rock Mechanics News Journal*. 7.

- Rasilainen, K.; Hellmuth, K.H.; Kivekäs, L.; Melamed, A.; Ruskeeniemi, T.; Siitari-Kauppi, M.; Timonen, J.; Valkiainen, M. (1996). "An interlaboratory comparison of methods for measuring rock matrix porosity". In: *VTT Research Notes 1776*. Espoo: Technical Research Centre of Finland.
- Rasolofosaon, P.N.J.; Weiss, T.; Siegesmund, S. (1999). "Ultrasonic method for the characterization of crack distribution and on matrix anisotropy in rocks considered as arbitrary anisotropic media - Application to sedimentary and crystalline rocks and comparison with fabric analysis". *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie Sb 4. S 210, Special Issue: Textures and Physical Properties of Rocks*. p. 162.
- Raymer, L. L.; Hunt, E. R.; Gadner, J. S. (1980). "An improved sonic transit time-to-porosity transform". Society of Professional Well Log Analysts. XXI Annual Logging Symposium, Transactions, Paper GGG, 9p.
- Raynaud, S.; Fabre, D.; Mazerolle, F.; Geraud, Y.; Latiere, H.J. (1989). "Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry". *Tectonophysics*. 159. pp. 149-159.
- Rider, H. M. (1986). *The Geological Interpretation of Well Logs*. Glasgow: Blackie.
- Rink, M.; Schooper, J. R. (1978). "On the application of image analysis to formation evaluation". *The Log Analyst*. pp. 12-22.
- Roberts, I.M. (2002). "Iso-butanol saturated water: a simple procedure for increasing staining intensity of resin sections for light and electron microscopy". *Journal of Microscopy*. 207. pp. 97-107.
- Rodell, M.; Famiglietti, J. S. (2002). "The potencial for satellite based monitoring groundwater storage changes using GRACE; the High Plains aquifer, central US". *Journal of Hydrology*. 263 (1-4). pp. 245-256.
- Ruiz de Argandoña, V.G.; Rodríguez-Rey, A.; Celorio, C.; Suárez del Río, L.M.; Calleja, L.; Llavona, J. (1999). "Characterization by Computed X-Ray Tomography of the Evolution of the Pore Structure of a Dolomite Rock During Freeze-Thaw Cyclic Tests". *Physics and Chemistry of the Earth (A)*. 24 (7). pp. 633-637.
- Ruiz de Argandoña, V.G.; Rodríguez-Rey, A.; Celorio, C.; Calleja, L.; Suárez del Río, L.M. (2003). "Characterization by X-ray computed tomography of water absorption in a limestone used as a building stone in the Oviedo Cathedral (Spain). In: Mees, F.; Swennen, R.; Van Geet, M.; Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215. pp. 127-134.
- Russ, J. C. (1990). *Computer-Assisted Microscopy: The Measurement and Analysis of Images*. New York: Plenum Press.
- Russ, J.; DeHoff, R. (2000). *Practical Stereology*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

- Sahimi, M. (1995). *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock, From Classical Methods to Modern Approaches*. Weinheim: VCH. 482 pp.
- Sakaki, T.; Sugihara, K.; Adachi, T.; Nishida, K.; Lin, W. (1998). "Application of the time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock". *Water Resources Research*. 34 (10). pp. 2623-2631.
- Sakr, S. A. (1999). "Validity of a sharp-interface model in a confined coastal aquifer". *Hidrogeology Journal*. 7 (2). pp. 155-160.
- Sankar, N.; Hari, P.; Shamsuddin, S. (2000). *Geophysical prospecting for Groundwater*. Rotterdam: Ed. Balkema.
- Sanz, E. (1996). "Hidrodinámica de los acuíferos karsticos de las Sierras de Urbión y Neila (Burgos)". *Estudios geológicos*. 52 (5-6). pp. 279-305.
- Schlumberger. (1972). *Log interpretation. Volume 1: Principles*. New York: Schlumberger Publications.
- Sree Devi, P.D.; Srinivasulu, S.; Raju, Kesava K. (2001). "Delineation of groundwater potential zones and electrical resistivity studies for groundwater exploration". *Environmental Geology*. 40. pp. 1252-1264.
- Sellers, E.; Vervoort, A.; Van Cleynenbreugel, J. (2003). "Three-dimensional visualization of fractures in rock test samples, simulating deep level mining excavations using X-ray computed tomography. From: Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M.; Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215.
- Sherman, H.; Locke, S.; Schlumberger-Doll Research Center (1975). "Depth of investigations of neutron and density sondes for 35 percent porosity sand". Society of Petrophysicists & Well Log Analysts. 16th Annual Logging Symposium. pp. 1-14.
- Serra, J.; Kolomenski, E.N. (1976). "La quantification en pétrographie". *Bulletin de l'Associat. Internationale de Géologie de l'Ingénieur*. 13. pp. 83-97.
- Serra, O. (1979). "Diagraphies différées. Bases de l'interprétation. Tome 1: Acquisition des données diagraphiques". *Bulletin des centres de recherches exploration-production Elf-Aquitaine*. Paris: Technip.
- Schild, M.; Siegesmund, S.; Vollbrecht, A.; Mazurek, M. (2001). "Characterization of granite matrix porosity and pore-space geometry by in situ and laboratory methods". *Geophysical Journal International*. 146. pp. 111-125.
- Schön, J.H. (1996). *Physical properties of rocks: fundamentals and principles of Petrophysics*. Oxford: Pergamon Elsevier.
- Scott, C. A.; Shah, T. (2004). "Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: insights from India and Mexico". *Water Resources Development*. 20. pp. 149-164.

- Schultz, G.A., Engman, T. (Eds) 2000. Remote sensing in hydrology and water management, Springer Verlag.
- Shatilo, A.P.; Sondergeld, C.; Rai, C.S. (1998). "Ultrasonics attenuation in Glenn Pool Rocks, northeastern Oklahoma". *Geophysics*. 63 (2). pp. 465-478.
- Siegesmund, S.; Vollbrecht, A.; Chlupac, T.; Nover, G.; Dürrast, H.; Müller, J.; Weber, K. (1993). "Fabric-controlled anisotropy of petrophysical properties observed in KTB core samples". *Scientific Drilling*. 4. pp. 31-54.
- Siegesmund, S.; Dahms, M. (1994). "Fabric-controlled anisotropy of elastic, magnetic, and thermal properties of rocks". In: Bunge, H.J.; Siegesmund, S.; Skrotzki, W.; Weber, K. (Eds.). *Textures of Geological Materials*. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft Verlag. pp. 353-381.
- Siegesmund, S. (1996). "The significance of rock fabrics for the geological interpretation of geophysical anisotropies". *Geotekt. Forschungen*. 85. pp. 1-123.
- Siitari-Kauppi, M. (1996). *Investigation of porosity and microfracturing in a disturbed zone with the ¹⁴C-PMMA method based on samples from full-scale experimental deposition holes of the TVO research tunnel*. AR D-96-001. Stockholm: SKB.
- Siitari-Kauppi, M.; Lindberg, A.; Hellmuth, K.H.; Timonen, J.; Vaatainen, K.; Hartikainen, J.; Hartikainen, K. (1997). "The effect of microscale pore structure on matrix diffusion-a site-specific study on tonalite". *Journal of Contaminant Hydrology*. 26 (1-4). pp. 147-158.
- Siitari-Kauppi, M.; Flitsiyan, E.S.; Klobes, P.; Meyer, K.; Hellmuth, K.H. (1998). "Progress in physical rock matrix characterization: Structure of the pore space". In: *Symposium Proceedings 506. Scientific Basis for Nuclear Waste Management*. Warrendale: Materials Research Society. pp. 671-678.
- Stroeven, P. (1987). "Prospects of stereology in civil engineering". *Acta Stereology*. 6/Suppl II. ISS Commemorative Memorial Volume. pp. 147-156
- Suárez del Río, L. M. (1982). Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes. Tesis doctoral. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. 241 p.
- Tanikawa, W.; Shimamoto, T. (2009). "Correction to comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 46 (8). pp. 1394-1395.
- Tiab, D.; Donaldson, E. C. (2004). *Petrophysics. Theory and practice of measuring reservoir and fluid transport properties*. Amsterdam: Elsevier. Gulf Professional Publishing.
- Todd, D.; Mays, L. (2005). *Groundwater Hydrology*. Wiley. 2005.

- Toledo, P. (2002). "Modelación y simulación numérica del fenómeno de intrusión salina en acuíferos basada en el método de volúmenes finitos". Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile.
- Torraca, G. (1980). *Solubilité et solvants utilisés pour la conservation des biens culturels*. Roma: International Centre for the Preservation and Restoration of Cultural Property. ICCROM.
- Torraca, G. (1982). *Porous building materials: Materials science for architectural conservation*. Roma: International Centre for the Preservation and Restoration of Cultural Property. ICCROM.
- Torraca, G. (1986). Porous building materials. ICCROM, Technical Notes. 149 pp.
- Touloukian, Y.S.; Judd, W.R.; Roy, R.F. (1981). *Physical properties of rocks and minerals. Data series on materials properties. Vol II-2*. New York: McGraw-Hill.
- Tournier, B.; Jeannette, D.; Destrigneville, C. (2000). *Stone drying: an approach of the effective evaporating surface area*. Strasbourg: Centre de Géochimie de la Surface.
- Tsakiroglou, C.D; Payatakes; A.C. (2000). "Characterization of the pore structure of reservoir rocks with the aid of serial sectioning analysis, mercury porosimetry and network simulation". *Advances in water resources*. 23. pp. 773-789.
- Valdeón, L.; Eibert, R.M.; Grossi, C. (1992). "Hydric properties of some Spanish building stones: a petrophysical interpretation". *Material Research Society. Symposium Proceeding*. 267. pp. 911-916.
- Valdeón, L.; Montoto, M.; Eibert, R.M. (1996). "Tomography of the Axeitos Megalith (La Coruña, Spain): Practical procedures and instrumentation". *Degradation and Conservation of granitic rocks in monuments - Protection and Conservation of European Cultural Heritage. European Commission*. pp. 275-279.
- Valdeón, L.; Freitas, M. H.; King, M.S. (1996). "Assessment of the quality of building stones using signal processing procedures". *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 29 (4). pp. 299-308.
- Valdeón, L.; Montoto, M.; Calleja, L.; Eibert, R.M.; Corral, N.; López, T. (1997). "A method to assess spatial coordinates in Art and Archaeological objects: application of tomography to a Dolmen". *Journal of Archaeological Sciences*. 24. pp. 337-346.
- Vandersteen, K.; Busselen, B.; Van den Abeele, K.; Carmeliet, J. (2003). "Quantitative characterization of fracture apertures using microfocus computed tomography". In: Mees, F.; Swennen, R.; Van Geet, M.; Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215. pp. 61-68.
- Van Geet, M.; Roels, S.; Swennen, R.; Dereeper, B.; Maes, N.; Put, M. (2002). "Petrophysical characterisation of natural and engineered clay barriers with microfocus x-ray computer tomography (μ ct)". In: *Clays In Natural And Engineered Barriers For Radioactive Waste Confinement*. International Meeting. Reims. pp. 17-18.

- Van Geet, M.; Lagrou, D.; Swennen, R. (2003). "Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography (μ CT)". In: Mees, F.; Swennen, R.; Van Geet, M.; Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215. pp. 51-60.
- Van Brakel, J.; Modrý, S.; Svatá, M. (1981). "Mercury porosimetry: state of the art". *Powder Technology*. 29. pp.1-12.
- Van Meir, N.; Jaeggi, D.; Herfort, M.; Loew, S.; Pezard, P.; Gouze, P.; Lods, G. (2005). "Development of a European test site in a coastal limestone aquifer at Campos (Mallorca, Spain)". In: Araguás L.; Custodio, E.; Manzano, M. (Eds.). Groundwater and saline intrusion. Selected paper from 18th Salt Water Intrusion Meeting: Hidrogeología y aguas subterráneas. 15: Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Vinegar, H.J. (1986). "X-ray CT and NMR imaging of rocks". *Journal of Petroleum Technology*. 38 (3). pp. 257-259.
- Vogel, J.R.; Brown, G.O. (2003). "Geostatistics and the representative elementary volume of gamma ray tomography attenuation in rock cores". In: Mees, F.; Swennen, R.; Van Geet, M.; Jacobs, P. (Eds.). (2003). *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*. Special Publications. London: Geological Society. 215. pp. 81-93.
- Vollbrecht, A.; Dürrast, H.; Kraus, J.; Weber, K. (1994). "Paleostress directions deduced from microcrack fabrics in KTB core samples and granites from the surrounding area". *Scientific Drilling*. 4. pp. 233-241.
- Volter, R.; Rushton, K. (1982). "An assessment of the importance of some parameters for seawater intrusion in aquifers and a comparison of dispersive and sharp interface modeling approaches". *Journal of Hydrology*. 56 (3-4). pp. 239-250.
- Voss, C. I.; Souza, W. R. (1987). "Variable density flow and solute transport simulation or regional aquifers containing a narrow fresh-water-saltwater transition zone". *Water Resources Research*. 23 (10). pp. 1851-1866.
- Wang, W. X.; Jia, Z.P. (2009). "Rock Porosity and Fracture Parameter Estimation by Image Technique,". Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2009 pp.563-566.
- Washburn, E.W. (1921). "Note on a Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 7. pp. 115-116.
- Wei, Z. Q.; Egger, P.; Descoedres, F. (1995). "Permeability predictions for jointed rockmass". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract*. 32. pp. 251-261.
- Wyllie, M. R. J.; Gregory, A. R.; Gardner, G. H. F. (1958). "An experimental investigations of the factors affecting elastic wave velocities in porous media". *Geophysics*. 23. pp. 459-493.

- Winkler, E. M. (1997). *Stone in Architecture. Properties. Durability*. New York: Springer-Verlag.
- Winslow, D.N.; Diamond, S. (1970). "A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in cement". *ASTM Journal of Materials*. 5 (3). pp. 564–585.
- World Bank (2004). *Water resources sector strategy: Strategic directions for World bank engagement*. The World Bank.
- Worthington, S.H.R.; Ford, D. C.; Davies; G. J.; Sasowsky, Ira. D. (Ed.). (2000). "Matrix, fracture and channel components of storage and flow in a Paleozoic limestone aquifer". In: *Groundwater Flow and Contaminant Transport in Carbonate Aquifers*. Rotterdam: A. A. Balkema. pp. 113-128.
- Zaleskii, B.V. (Ed.). (1967). *Physical and mechanical properties of rocks*. Israel program for scientific translations.
- Zamora, M.; Sartoris, G.; Chelini, W. (1994). "Laboratory Measurements of Ultrasonic Wave Velocities in Rocks from the Campi Flegrei Volcanic System and Their Relation to Other Field Data". *Journal of Geophysical Research*. 99. pp. 13553-13561.
- Zamora, M.; Yven, B.; Jorand, R.; Amiral, A. (2002). "Physical properties of Callovo - Oxfordian argillites and Oxfordian limestones from a borehole of the M/h - m underground laboratory site". In: *Clays In Natural And Engineered Barriers For Radioactive Waste Confinement. International Meeting*. Reims. pp. 283-284.
- Zhang, M., Takahashi, M., Morin, R.H., Endo, H., Esaki, T. (2002). "Determining the Hydraulic Properties of Saturated, Low-Permeability Geological Materials in the Laboratory: Advances in Theory and Practice". In: M. N. Sara and L. G. Everett, (Eds). *Evaluation and Remediation of Low Permeability and Dual Porosity Environments*. ASTM, STP 1415. West Conshohocken: ASTM International. pp. 83-98.
- Zhou, W.; Beck, B.F.; Stephenson, B.J. (1999). "Investigation of groundwater flow in karst areas using component separation of natural potential measurements". *Environmental Geology*. 37(1-2). pp. 19-25.
- Zimmerle, W. (1991). "Thin-section petrography of pelites, a promising approach in sedimentology". *Geologie en. Mijnbouw*. 70. pp. 163-164.
- Zimmerle, W. (1993). "Thin-section petrography of argillaceous rocks". *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*. pp. 365-390.
- Zimmerman, G.; Burkhardt, H.; Melchert, M. (1992). "Estimation of Porosity in Crystalline Rock by a Multivariate Statistical Approach". *Scientific Drilling*. 3. pp. 27-35.
- Zinszner, B.; and Pellerin, F.M. (2007). *A geoscientist's guide to petrophysics*. Paris: IFP Publications.