



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS Y RECURSOS MINERALES

**CARACTERIZACIÓN ESTRATIGRÁFICA,
PETROGRÁFICA Y PETROFÍSICA DE LAS EVAPORITAS
DE LA FORMACIÓN VILLALBA DE LA SIERRA
(DEPRESIÓN INTERMEDIA, CUENCA) PARA SU
EVALUACIÓN COMO ROCA SELLO.**

*STRATIGRAPHIC, PETROGRAPHIC AND PETROPHYSICAL
CHARACTERIZATION OF THE EVAPORITES FROM VILLALBA
DE LA SIERRA FORMATION (DEPRESIÓN INTERMEDIA BASIN,
CUENCA) FOR ITS EVALUATION AS SEAL ROCK*

ASIER ROJAS HERRÁIZ

TUTORES DEL TRABAJO:

Dra. D. ^a MARÍA JOSEFA HERRERO FERNÁNDEZ

Dra. D. ^a MARÍA JOSEFA VARAS MURIEL

Dr. D. RAÚL DE LA HORRA DEL BARCO

Julio de 2025



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS Y RECURSOS MINERALES

**CARACTERIZACIÓN ESTRATIGRÁFICA,
PETROGRÁFICA Y PETROFÍSICA DE LAS EVAPORITAS
DE LA FORMACIÓN VILLALBA DE LA SIERRA
(DEPRESIÓN INTERMEDIA, CUENCA) PARA SU
EVALUACIÓN COMO ROCA SELLO.**

*STRATIGRAPHIC, PETROGRAPHIC AND PETROPHYSICAL
CHARACTERIZATION OF THE EVAPORITES FROM VILLALBA
DE LA SIERRA FORMATION (DEPRESIÓN INTERMEDIA BASIN,
CUENCA) FOR ITS EVALUATION AS SEAL ROCK*

ASIER ROJAS HERRÁIZ

TUTORES DEL TRABAJO:

**Dra. María Josefa
Herrero Fernández**

Fdo.

**Dra. María Josefa
Varas Muriel**

Fdo.

**Dr. Raúl
De la Horra del Barco**

Fdo.

Julio de 2025



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Yo, Asier Rojas Herráiz, con NIF 03209481S, estudiante del Máster Universitario en Exploración de hidrocarburos y recursos minerales en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2024 – 2025, como autor del trabajo de fin de máster titulado «*Caracterización estratigráfica, petrográfica y petrofísica de las evaporitas de la Formación Villalba de la Sierra (Depresión Intermedia, Cuenca) para su evaluación como roca sello*» y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyos tutores son D.^a María Josefa Herrero Fernández, D.^a María Josefa Varas Muriel y D. Raúl de la Horra del Barco,

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Guadalajara, a 29 de julio de 2025.

Fdo.:

†

A.M.D.G. *et* B.M.V.

*«Age quasi totum a te penderet,
sciendo tamen totum a Deo pendere»*

Sancti Ignatii Loiolani

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo de fin de máster no habría sido posible sin la ayuda de distintas personas a las que quisiera dar fe de mi gratitud por su apoyo en este año que culmina representado por este proyecto.

Primeramente, me gustaría agradecer a mis tutores, Pepa Herrero, María José Varas y Raúl de la Horra, por la inestimable ayuda que me han brindado, por sus conocimientos, su tiempo, dedicación e interés y por todo lo que gracias a ellos y a través de este trabajo he aprendido.

También quisiera dar las gracias al Dr. José Ignacio Escavy por las nociones que compartió conmigo para mostrarme cómo usar el programa *Match!*

En el ámbito académico, me gustaría mencionar, además, a Marián Barajas y Carmen Valdehita, del Laboratorio de Petrología y Geoquímica de la Facultad, por ayudarme con la preparación de las láminas delgadas y de las muestras para la DRX, respectivamente.

Por supuesto, también quisiera mostrar mi agradecimiento a mi familia, a mis padres, mi hermana y a Tania, por su paciencia e inestimable apoyo.

Sin la ayuda de todos ellos, de todos vosotros, la realización de este trabajo no habría sido posible.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Planteamiento y objetivos.....	1
1.2.	Situación geográfica	1
1.3.	Contexto geológico.....	3
1.4.	Antecedentes	7
2.	METODOLOGÍA	9
2.1.	Trabajo de campo	9
2.2.	Trabajo de laboratorio: técnicas y ensayos.....	10
2.2.1.	Caracterización petrográfica	10
2.2.1.1.	Descripción macroscópica	10
2.2.1.2.	Descripción microscópica (petrográfica y de fluorescencia)	11
2.2.1.3.	Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X	11
2.2.2.	Caracterización petrofísica	12
2.2.2.1.	Propiedades dinámicas.....	13
2.2.2.1.1.	Propagación ultrasónica	13
2.2.2.1.2.	Anisotropía	13
2.2.2.2.	Propiedades estructurales.....	14
2.2.2.2.1.	Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)	14
2.2.2.3.	Propiedades hídricas	14
2.2.2.3.1.	Saturación al agua.....	15
2.2.2.3.2.	Absorción y desorción de agua.....	15
2.2.2.3.3.	Permeabilidad al vapor de agua	16
2.2.2.3.4.	Permeabilidad al aire	16
2.2.2.4.	Propiedades mecánicas.....	17
2.2.2.4.1.	Resistencia al rebote o dureza superficial de Schmidt	17
3.	RESULTADOS.....	18
3.1.	Trabajo de campo	18
3.2.	Trabajo de laboratorio	25

3.2.1.	Caracterización petrográfica	25
3.2.2.	Caracterización petrofísica	31
3.2.2.1.	Propiedades dinámicas	31
3.2.2.1.1.	Propagación ultrasónica y anisotropía	31
3.2.2.2.	Propiedades estructurales.....	32
3.2.2.2.1.	Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)	32
3.2.2.3.	Propiedades hídricas	34
3.2.2.3.1.	Saturación al agua.....	34
3.2.2.3.2.	Absorción-desorción de agua	35
3.2.2.3.3.	Permeabilidad al vapor de agua	37
3.2.2.3.4.	Permeabilidad al aire	37
3.2.2.4.	Propiedades mecánicas.....	38
3.2.2.4.1.	Resistencia al rebote. Dureza superficial de Schmidt	38
4.	DISCUSIÓN	39
5.	CONCLUSIONES	47
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	48

RESUMEN

Las evaporitas, lutitas y margas son, por lo general, rocas impermeables y dúctiles, lo que las convierte en las rocas más idóneas como roca sello para almacenamiento.

La Formación Margas, arcillas y yesos de Villalba de la Sierra, asociada a las etapas finales del Cretácico de la Depresión Intermedia (Guadalajara y Cuenca), consta de un tramo basal compuesto por evaporitas alternadas con margas cuyo potencial como roca sello se pretende evaluar. Para ello, se realizó una caracterización estratigráfica de un afloramiento, y una caracterización petrográfica y petrofísica de diversas muestras tomadas en campo. Esta última cuenta con diversos ensayos para evaluar las distintas propiedades dinámicas, estructurales, hídricas y mecánicas de las muestras analizadas.

Estos análisis tienen por objetivo establecer las dimensiones de la Formación Villalba de la Sierra y sus propiedades petrográficas y petrofísicas para, así, evaluar las evaporitas de esta unidad litoestratigráfica como roca sello a partir de sus a sus dimensiones, su petrología y sus características de porosidad y permeabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento y objetivos

La Formación Margas, arcillas y yesos de Villalba de la Sierra (Vilas *et al.*, 1982) representa la etapa terminal del Cretácico en la zona centro y este de Iberia y se compone, a grandes rasgos, de tres subunidades: una inferior de yesos y margas, una intermedia con mayor presencia de carbonatos y una superior siliciclástica, con lutitas rojas en las que se ha preservado un conjunto de restos de huevos de dinosaurio de gran relevancia (Sanguino *et al.*, 2025).

Desde el punto de vista de la geología aplicada, los materiales evaporíticos y lutíticos de esta Formación (Fm.) podrían resultar interesantes por su potencial como roca sello para el almacenamiento de recursos geológicos como el CO₂ o el gas natural, al tratarse de lutitas, margas y evaporitas (Escavy *et al.* 2012). Estas son rocas generalmente dúctiles e impermeables, siendo ambas características de gran importancia para que un sello sea efectivo (Skerlek, 1999), tanto para impedir el escape de los recursos almacenados como para evitar emplear como sello materiales con comportamiento frágil que sean susceptibles de ser afectados por deformaciones tectónicas, respectivamente.

Con este pretexto, se ha realizado un estudio estratigráfico y una caracterización petrográfica y petrofísica de las litologías evaporíticas de la Formación Villalba de la Sierra para establecer sus principales características intrínsecas y, así, evaluar la posibilidad de que puedan actuar como material sello en un almacén de CO₂ o gas.

De esta forma, no sólo se propone un posible sello para el almacenamiento de recursos geológicos, sino que se pretende establecer una metodología de caracterización de materiales para este fin.

Por tanto, este estudio tiene como objetivo la caracterización del tramo inferior evaporítico de la Fm. Villalba de la Sierra para evaluar su eficacia como barrera para la migración de fluidos y su uso como sello de almacenamiento de recursos energéticos. Además, esta Formación ha sido generalmente poco estudiada, por lo que las descripciones que en este trabajo se han realizado son novedosas y podrían resultar de interés para un mejor conocimiento y estudio de la unidad.

1.2. Situación geográfica

La zona de estudio se encuentra al norte del municipio de Buendía, que a su vez se sitúa al norte de la provincia de Cuenca (Fig. 1A).

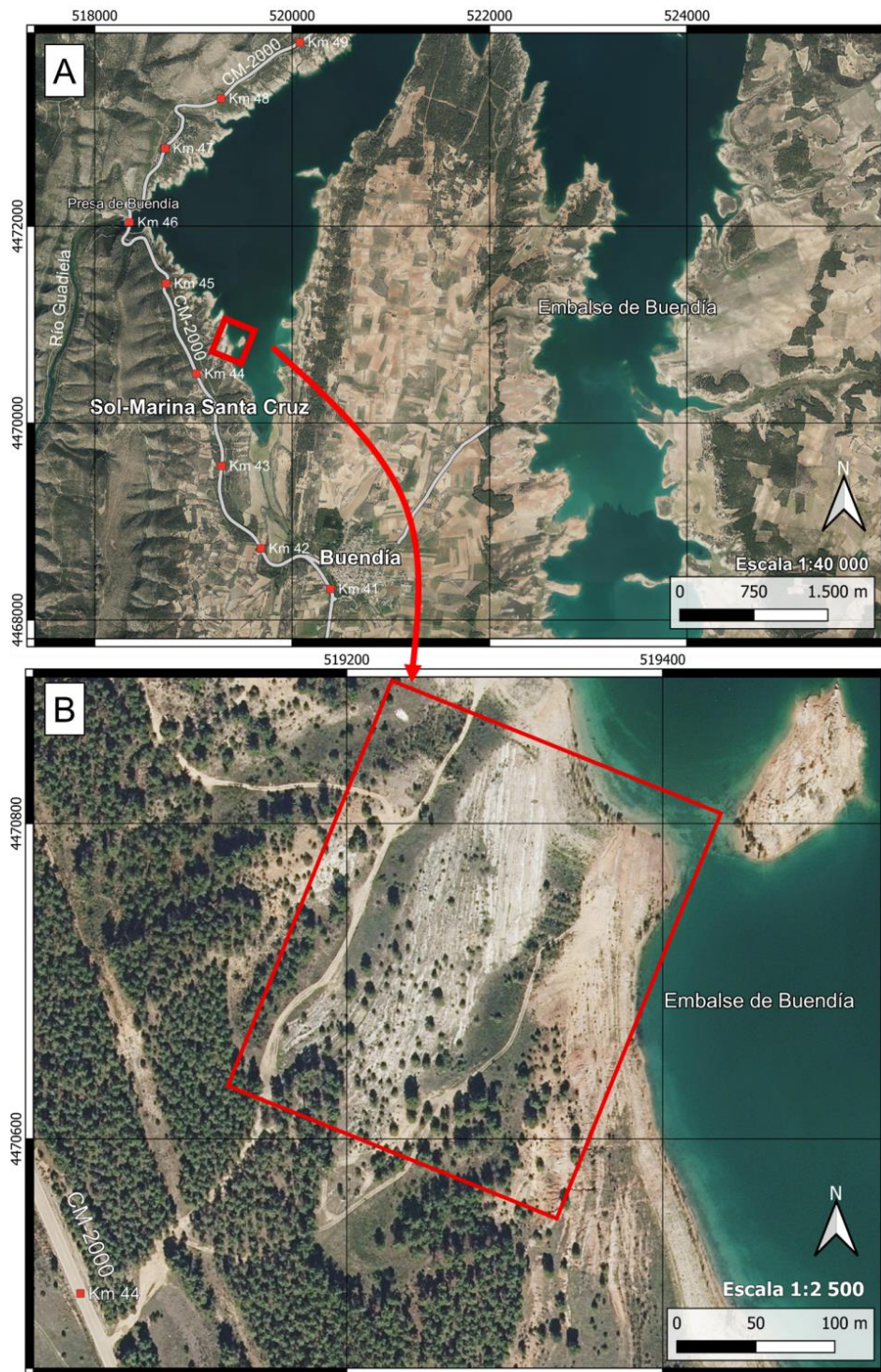


Figura 1. A) Situación general del afloramiento «Buendía Sol-Marina»; B) Localización en ortofoto y delimitación de la zona estudiada. Modificado de PNOA de máxima actualidad (IGN).

Se localiza en la hoja 562 (Sacedón) del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000, y más específicamente en la hoja 562-III (Buendía) del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000.

El afloramiento en el que se fundamenta este trabajo está a orillas del embalse de Buendía, por lo que se encuentra condicionado por la fluctuación del nivel del agua del embalse, pudiendo variar el área de la superficie de afloramiento expuesta por este

motivo. A él se accede por la carretera autonómica CM-2000, mediante un camino que parte próximo al punto kilométrico 44 (Fig. 1B). Cerca de este punto se encuentra un núcleo de población denominado «Sol-Marina Santa Cruz», cuya toponimia viene recogida en el Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000 nº 562 III (Buendía). Por ello, el afloramiento estudiado se ha nombrado como «Buendía Sol-Marina», denominación que se emplea a lo largo de este trabajo.

En el embalse de Buendía se acumulan las aguas del río Guadiela, afluente del río Tajo, por lo que la zona estudiada se encuentra en la cuenca hidrográfica del río Tajo.

1.3. Contexto geológico

La zona de estudio se encuentra en el suroeste de la Cordillera Ibérica, en el contacto de la cuenca cenozoica de la Depresión Intermedia, más recientemente conocida como Cuenca de Loranca, con el cinturón de cabalgamientos mesozoicos de la Sierra de Altomira.

La Depresión Intermedia es una cuenca cenozoica de tipo *piggy-back* que forma parte de la Cuenca del Tajo junto con la Cuenca de Madrid (Civis, 2004). Presenta forma elipsoidal, con su eje mayor orientado Norte-Sur. Limita con la Sierra de Altomira al oeste, con la Cordillera Ibérica al este, con el Sistema Central al norte y con la llanura de La Mancha al sur (Fig. 2).

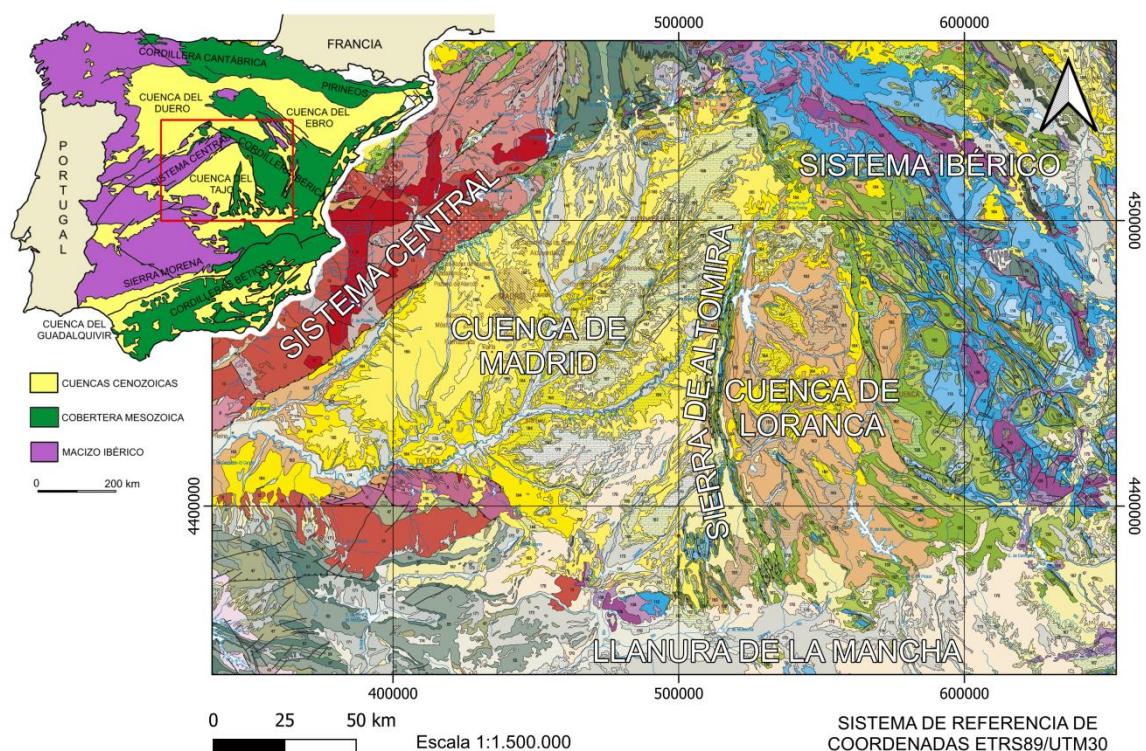


Figura 2. Localización y contexto geológico de la sierra de Altomira y la Cuenca de Loranca en relación con el mapa de las principales regiones geológicas de España (basado en Vera, 2004) y al mapa geológico de la zona centroibérica (modificado de Rodríguez Fernández *et al.*, 2015).

La Sierra de Altomira separa la cuenca de Loranca de la de Madrid, aunque, dado que los materiales mesozoicos presentan inmersión hacia el norte, estos se disponen bajo los sedimentos sin- y post-tectónicos de edad cenozoica a la altura del pueblo de Durón (Guadalajara), permitiendo que las dos cuencas se unan hacia el norte (Muñoz Martín y De Vicente, 1996).

La evolución geotectónica de la Depresión Intermedia y la Sierra de Altomira es consecuencia de las deformaciones tectónicas que tuvieron lugar durante la orogenia Alpina. La transmisión de esfuerzos compresivos afectó a la cobertera mesozoica-cenozoica durante el Oligoceno y Mioceno Medio, dando lugar a cinturones de pliegues y cabalgamientos enraizados en las *facies Keuper* (Torres Pérez-Hidalgo *et al.*, 1997), como es el caso de la Sierra de Altomira o el anticlinal de Pareja, situado al este de la primera, ambas estructuras con vergencia hacia el oeste y dirección principal norte-sur (De Vicente *et al.* 1994).

En publicaciones más antiguas, la actividad tectónica fue clasificada en diferentes fases de deformación definidas como Intra-Arverniense, Intra-Ageniense, Intra-Aragoniense e Intra-Vallesiense (Torres y Zapata, 1987). No obstante, trabajos más recientes proponen una sola fase de deformación (De Vicente, 2009; De Vicente y Vegas, 2009).

La estratigrafía de la Depresión Intermedia consta de materiales cretácicos a base y continúa con sedimentos cenozoicos, que son los que forman la mayor parte del relleno de la cuenca. Este ha sido clasificado, entre otros autores, por Hernaiz *et al.* (1998), quien considera como unidades la Fm. Villalba de la Sierra, la Unidad Paleógena, la Unidad Paleógena-Neógena, y las unidades Primera, Segunda, Tercera y Cuarta Unidad Neógena (Tabla 1).

La Fm. Villalba de la Sierra representa un evento de regresión marina del Cretácico Superior. A techo de esta, se dispone en discordancia regional (Torres y Zapata, 1987) la Unidad Paleógena, que supone el inicio de la instauración de condiciones de sedimentación continental en la zona. De forma coetánea a la sedimentación de esta unidad comenzó el levantamiento de la Sierra de Altomira durante el Oligoceno, dividiendo la cuenca del Tajo en las de Madrid y Loranca. Esto condicionó la sedimentación de las cinco unidades sedimentarias posteriores, en las que se encuentran litologías siliciclásticas, carbonáticas y evaporíticas.

El levantamiento de la Sierra de Altomira se prolongó hasta el Mioceno medio, cuando se acabó de restringir la Depresión Intermedia (Torres Pérez-Hidalgo *et al.*, 1997).

EDAD			UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS		
CENOZOICO	NEÓGENO	PLIOCENO		Unidad Pliocena	
		MIOCENO	SUPERIOR	Cuarta Unidad Neógena	
			MEDIO	Tercera Unidad Neógena	Subunidad Superior
					Subunidad Inferior
		INFERIOR	Segunda Unidad Neógena		
		PALEÓGENO	OLIGOCENO	Primera Unidad Neógena	Subunidad Aluvial
	Subunidad Fluvial				
	MESOZOICO	CRETÁCICO	EOCENO		Unidad Paleógena
SUPERIOR			Fm. Villalba de la Sierra		

Tabla 1. Clasificación de unidades litoestratigráficas para la Depresión Intermedia de Hernaiz *et al.* (1998)

La Fm. Villalba de la Sierra es la última unidad litoestratigráfica del Cretácico Superior. Es una unidad con un espesor muy variable que puede alcanzar los 500 metros de potencia, habiéndose establecido el máximo espesor en el pueblo de La Frontera (Cuenca). En el entorno del embalse de Buendía el espesor se ha estimado superior a 200 metros (Gabaldón López, 1998).

Esta unidad se sitúa sobre la Formación Brechas Dolomíticas de Cuenca (Vilas *et al.*, 1982; Gabaldón López, 1998) y a techo presenta la primera unidad litológica cenozoica (base de la Unidad Paleógena), compuesta por areniscas, lutitas y calizas. Este límite a techo, que se ha observado en el yacimiento de Poyos (situado a aproximadamente 6 km en dirección NNE desde el afloramiento de «Buendía Sol-Marina») viene marcado por un contacto erosivo con las lutitas rojas y verdes de la Formación Villalba de la Sierra a base y un nivel conglomerático a techo a partir del cual se observa un cambio en la litología, de grano más grueso, y en la coloración, que pasa a ser más anaranjada. A escala de afloramiento el contacto es concordante, si bien se ha establecido que el contacto a escala regional viene marcado por una discordancia (Torres y Zapata, 1987), habiéndose descrito una superficie erosiva a techo de la Formación Villalba de la Sierra (Sanguino *et al.*, 2025). Esto mismo se observó tras visitar, junto al afloramiento de Buendía Sol-Marina, el de Poyos (Sacedón) en el entorno del embalse de Entrepeñas.

La Formación Villalba de la Sierra tiene un carácter local y está asociada a la Sierra de Altomira, la Serranía de Cuenca y los Montes Universales, aflorando en los bordes de la Depresión Intermedia (Vilas *et al.* 1982; Fig. 3).

Las litologías de esta Formación se han relacionado con *facies* de *sabkha* (Hernaiz *et al.*, 1998), representando la regresión marina finicretácica, a las que estarían asociadas las litologías evaporíticas.

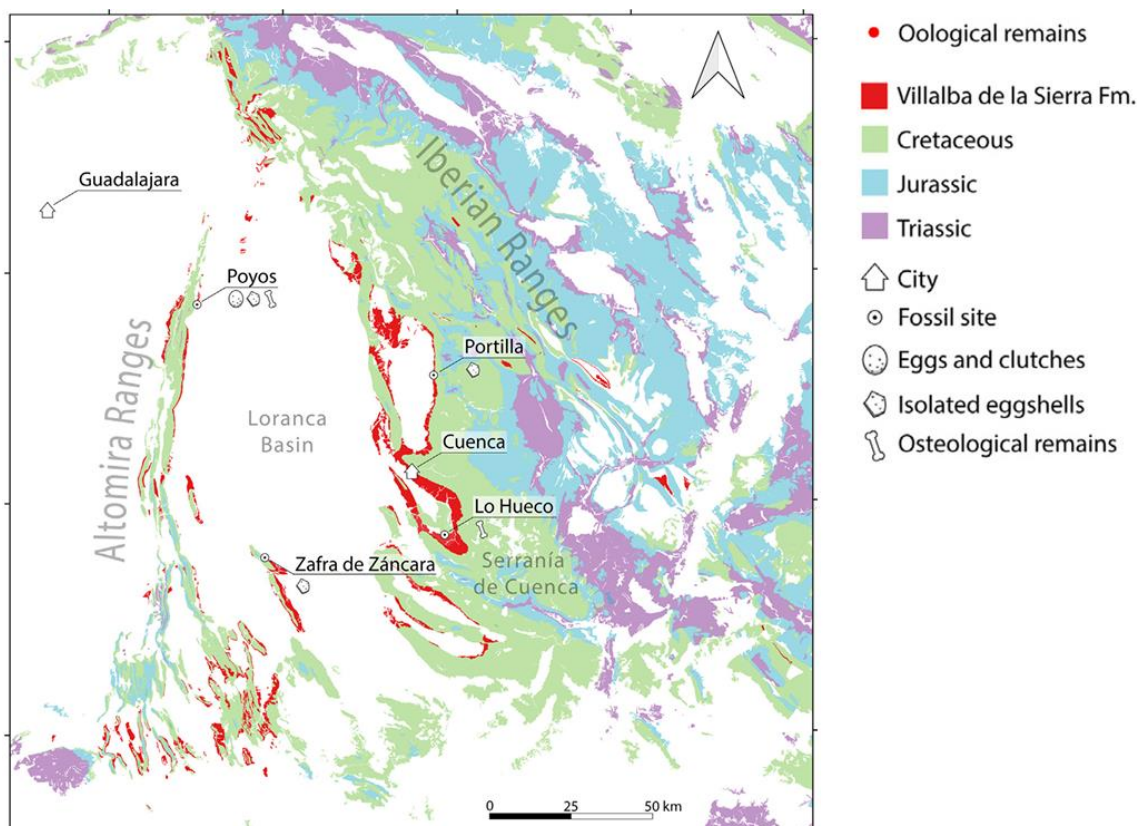


Figura 3. Distribución de la Formación Villalba de la Sierra en la Depresión Intermedia (modificado de Sanguino *et al.*, 2025).

En Iberia, el Cretácico Superior está caracterizado por plataformas carbonáticas formadas en condiciones de clima cálido y nivel de base del mar alto. Durante este periodo, el territorio emergido se componía de dos grandes masas, el Macizo Ibérico o Hespérico y el Macizo del Ebro. Entre estos se situaba la Cuenca Ibérica, una zona marina que conectaba el mar de Tethys con la Bahía de Vizcaya (Fig. 4A). La Cuenca Ibérica presentaba dos partes, la Rampa Castellana, al norte, y la Rampa Sur-Ibérica, al Sur (Martín-Chivelet *et al.*, 2019). Ambas estaban separadas por el Umbral Central (Floquet, 2004; Fig. 4B), una zona de baja subsidencia donde el basamento Varisco era somero, aunque permitía la conexión marina entre la Bahía de Vizcaya y el mar de Tethys.

La rampa Sur-Ibérica, en la que se encontraba la zona de estudio, consistía en un mar interior somero en el que se desarrollaron *facies* de plataformas carbonáticas, a las que están asociadas las unidades infrayacentes a la Formación Villalba de la Sierra.

La convergencia entre la placa de Nubia, de Iberia y Europea, que probablemente empezó en el Santoniense, provocó el comienzo de la regresión marina (Martín-Chivelet

et al., 2019). Esta continentalización provocó el paso de condiciones de formación de carbonatos marinos someros a ambientes de *sabkha*, representados por la Formación Villalba de la Sierra.

Este acercamiento prosiguió durante el Cenozoico y fue el causante de la generación de las cordilleras Béticas y Pirenaica, en el sureste y noreste respectivamente, así como de la inversión de las cuencas mesozoicas ibéricas y el levantamiento de la Cordillera Ibérica, el Sistema Central y la Cordillera Costero-Catalana.

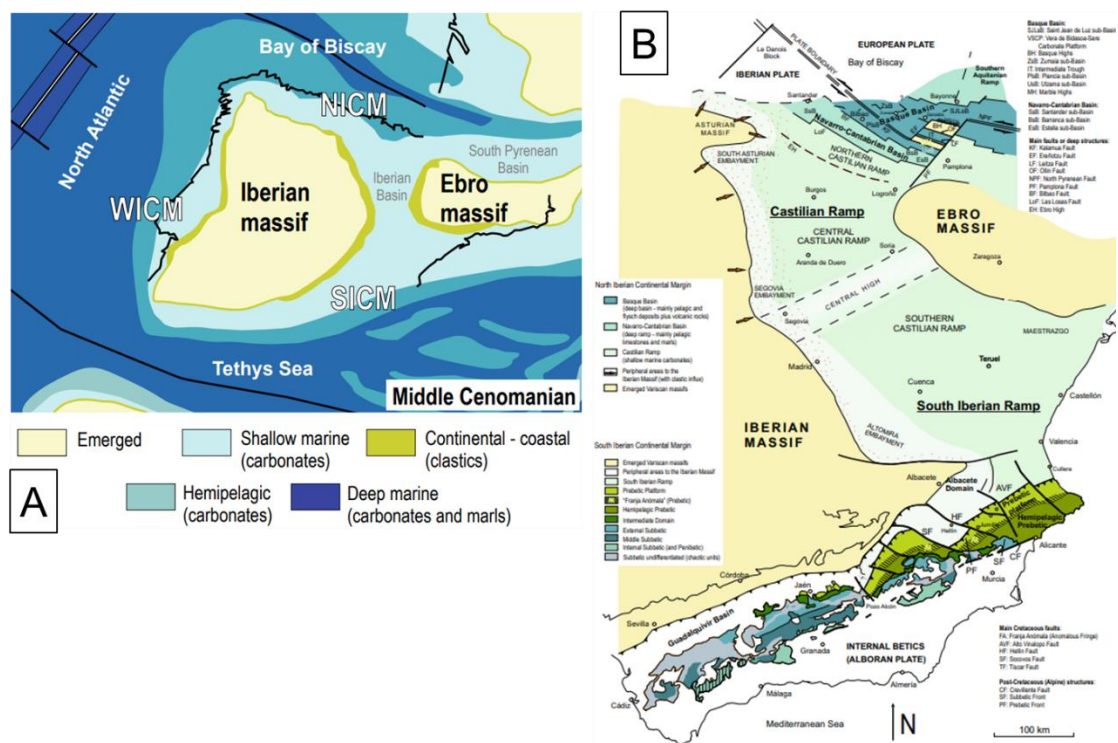


Figura 4. A) Mapa paleogeográfico de Iberia durante el Cenomaniense inferior-medio. B) Mapa paleogeográfico de los principales dominios del este de Iberia durante el Santoniense, momento en que se dio la máxima extensión marina de todo el Cretácico (Martín-Chivelet, et al., 2019).

1.4. Antecedentes

Los trabajos realizados en la Formación Villalba de la Sierra son escasos. Inicialmente, sus materiales se denominaron de forma genérica como *facies Garum* (Díaz Molina, 1978) o *Garumnense* (Ramírez del Pozo y Meléndez Hevia, 1972). Actualmente es un término informal para referirse a margas, arcillas y yesos formados en ambientes marinos someros, continentales o costeros durante el Cretácico Superior y el Paleógeno inferior, y no fue hasta 1982 cuando Vilas et al. describieron formalmente la Formación Margas, arcillas y yesos de Villalba de la Sierra, aunque la descripción que realizan de la Formación es escueta. Estos autores marcan la edad de la Formación Villalba de la Sierra como Campaniense-Maastrichtiense.

Anteriormente, Ramírez del Pozo y Meléndez Hevia (1972) habían establecido el techo para las *facies Garumnense* en el Paleoceno por la presencia del género de ostrácodos

Neocyprideis. Más tarde, Ramírez Merino (1989) situó el techo de esta Formación en el Eoceno medio por la presencia de determinadas especies de carófitas de esta época, lo cual describe en la memoria de la Hoja nº587 (Las Majadas) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, en la que se encuentra el municipio de Villalba de la Sierra y, con ello, el corte tipo de la Formación. No obstante, esta conclusión resultaría contraria a la presencia de restos de huevos de dinosaurios, que ya se describen en la misma memoria, teniendo en cuenta que son de edad cretácica (Sanguino *et al.*, 2025) y no afloran en niveles posteriores por la extinción finicretácica.

El estudio en la actualidad de esta Formación se debe en gran parte a su importante contenido paleontológico presente en el tramo superior, compuesto por arcillas. En él se ha dado el hallazgo de varios yacimientos, entre ellos a destacar el de Poyos (Sacedón, Guadalajara) y Lo Hueco (Fuentes, Cuenca). En el yacimiento de Poyos se han localizado abundantes restos de cáscaras de huevo de saurópodos, nidos de huevos y restos óseos de saurópodos titanosaurios, terópodo, cocodriliformes y tortugas (Ortega y Pérez García, 2009; Pérez-García *et al.*, 2018; Ortega *et al.* 2019). En el yacimiento de Lo Hueco se han encontrado restos vegetales como fragmentos de tallos y hojas de plantas herbáceas, troncos y ramas de leñosas conservados como restos carbonizados y reemplazados interiormente por yeso. En cuanto a invertebrados, se dan bivalvos y gasterópodos como moldes internos lutíticos y de yeso. En lo relativo a vertebrados, destacan fósiles óseos, dentales y osteodermos (Barroso-Barcenilla *et al.*, 2010), correspondientes a cocodriliformes, saurópodos, tortugas y peces (Ortega *et al.* 2015). El yacimiento de Lo Hueco destaca por ser uno de los más relevantes en cuanto a vertebrados continentales del tramo entre el Campaniense superior y el Maastrichtiense inferior (Ortega y Pérez García, 2009).

En cuanto a estudios relacionados con el almacenamiento de recursos geológicos, el uso de las *facies Garum* (equivalente a la Formación Villalba de la Sierra) como roca sello ya se ha contemplado en el caso de un posible almacén propuesto en el anticlinal de Baidés (Guadalajara), que abarcaría la Fm. Utrillas y los materiales carbonáticos suprayacentes a esta y limitados a techo por la Formación Villalba de la Sierra (INYPESA, 2010). Asimismo, en el sondeo El Campillo-1 (Cuenca del Duero) se han propuesto las *facies Garum* como sello al haberse identificado un tramo arcilloso de 36 m de potencia (Zapatero Rodríguez *et al.*, 2009).

2. METODOLOGÍA

El trabajo ha consistido en un análisis de la bibliografía existente sobre esta Formación, en el trabajo de campo con un muestreo detallado de las principales litologías identificadas para su posterior análisis de las muestras en laboratorio. El trabajo de campo derivó en un estudio de la estratigrafía y la sedimentología de la Formación, que se ha completado con datos petrográficos, que conllevaron el establecimiento de procesos diagenéticos sucedidos, y la caracterización petrofísica de las litologías definidas para determinar su tipo y grado de porosidad y permeabilidad (trabajo de laboratorio).

La elección de la Fm. Villalba de la Sierra se fundamenta en su importante contenido en evaporitas y margas, litologías que, aparentemente, podrían ser favorables como roca sello. A techo de estos materiales hay un conjunto siliciclástico en el que destacan fragmentos de cáscaras de huevos de saurópodos Titanosauria (Sanguino *et al.*, 2025). Dado que los yesos de la Fm. Villalba de la Sierra guardan similitud con los yesos miocenos encuadrados en la Segunda Unidad Neógena definida por Hernaiz *et al.* (1998) en su distinción de unidades sedimentarias para la Depresión Intermedia (Tabla 1), se buscó la presencia de los restos fósiles anteriormente mencionados como prueba de que los yesos infrayacentes son de edad cretácica, sin que haya posibilidad de confundirlos con los yesos neógenos.

Para el estudio de la Fm. Villalba de la Sierra se eligió el afloramiento de «Buendía Sol-Marina», donde se basó el estudio al encontrar una secuencia estratigráfica más completa que en otras zonas. Además, en este afloramiento se hallaron los restos paleontológicos anteriormente mencionados, que permitieron determinar sin duda que las litologías observadas se corresponden con la Fm. Villalba de la Sierra.

2.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en un estudio de la estratigrafía y la sedimentología del afloramiento denominado como «Buendía Sol-Marina», cuyas coordenadas geográficas son: 40°23'15.3"N y 2°46'21.5"O. Para ello, se realizó una columna estratigráfica de detalle a escala 1:100, midiendo la potencia de los estratos diferenciados con una vara de Jacob, a la vez que se describieron pormenorizadamente las facies observadas. Posteriormente, a partir de la columna estratigráfica de detalle se generó una columna sintética a escala 1:500.

Tanto para la elaboración de la columna estratigráfica como para la descripción de *facies* se observó con especial detalle el tipo de litología, textura, coloración, tipo de contacto

entre distintas litologías y cambios laterales de *facies* para estudiar los diferentes tipos de evaporitas y cómo estas se relacionan entre sí.

Asimismo, se recogieron hasta catorce muestras representativas de los tramos diferenciables en campo dentro de la columna geológica. El muestreo se realizó en base a la aparición de tramos distintos entre sí. No obstante, en aquellos tramos aparentemente homogéneos se tomaron varias muestras por si más adelante fuesen de interés para observar en laboratorio posibles diferencias que no fuesen apreciables en campo.

2.2. Trabajo de laboratorio: técnicas y ensayos

El trabajo de laboratorio tiene como objetivo estudiar la Fm. Villalba de la Sierra realizando una caracterización petrográfica y petrofísica de sus principales litofacies, para lo que se emplearon seis muestras.

La elección de las muestras se realizó en base a la representatividad que ofrecen del afloramiento tras describirlas desde el punto de vista macroscópico. La litología predominante son los yesos, por lo que, de las seis muestras, cinco corresponden a yesos o presentan un contenido importante en yeso (muestras BSM-1, BSM-5, BSM-8, BSM-11 y BSM-12), y la sexta a una *facies* de carbonatos (BSM-9). Las seis muestras fueron estudiadas en el Área de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas.

2.2.1. Caracterización petrográfica

La caracterización petrográfica permite identificar los aspectos texturales más característicos de las muestras, así como su composición mineralógica. A partir de estos datos, se estableció la evolución diagenética y, juntamente con el estudio estratigráfico, se determinaron los ambientes deposicionales y diagenéticos.

La caracterización petrográfica incluye una descripción macroscópica seguida de una descripción microscópica. Esta última permite profundizar y detallar más la descripción de las muestras al tratarse de rocas microcristalinas. Este estudio petrográfico se ve complementado con la técnica mineralógica de difracción de rayos X (DRX).

2.2.1.1. Descripción macroscópica

La descripción macroscópica se realizó tomando como base las observaciones de campo y, muy especialmente, a partir de las secciones obtenidas después del corte de las probetas con las que se ha trabajado en laboratorio, y en las que se observó con mayor detalle la coloración y textura en los cortes frescos de la roca.

Para este tipo de estudio se empleó una lupa de geólogo y ácido clorhídrico (10%) para la identificación de la presencia de calcita.

2.2.1.2. Descripción microscópica (petrográfica y de fluorescencia)

Para la descripción microscópica se empleó un microscopio óptico, modelo OLYMPUS BX51 U-LH100HG con cámara digital y software CellSens Entry v.2, y con dos fuentes de luz distintas. Con luz natural polarizada, este microscopio funciona como un microscopio petrográfico y permite el estudio detallado de la mineralogía, las texturas y la porosidad de las muestras. Con luz ultravioleta (lámpara de mercurio Olympus U-RFL-T), el microscopio actúa como un microscopio de fluorescencia y permite la observación de la estructura porosa de la muestra.

Se elaboraron seis láminas delgadas de 3 x 2 cm y 30 μm de espesor a partir de las seis muestras anteriormente mencionadas (Fig. 5).



Figura 5. Láminas delgadas realizadas para el estudio microscópico de las muestras.

Adicionalmente, durante la preparación de las láminas de aquellas muestras que inicialmente se clasificaron como yesos (BSM-1, BSM-5, BSM-8 y BSM-11), se añadió fluoresceína a la resina de embutido para poder realizar un análisis detallado de la porosidad utilizando el microscopio de fluorescencia. También se aplicó a las láminas la tinción de alizarina roja y ferricianuro potásico de Lindholm y Finkelman (1972) para diferenciar calcita de dolomita y su contenido en hierro ferroso.

2.2.1.3. Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X

Para complementar el estudio mineralógico al microscopio se realizó la difracción de rayos X. Es una técnica que permite determinar las fases minerales bien cristalizadas. Se analizaron 2 g de la fracción polvo total (<53 μm) de las seis muestras anteriores. El difractómetro utilizado es un Bruker D8 Advance con un tubo de ánodo de $\text{CuK}\alpha$ y monocromador de grafito que funciona en un rango de 2° - 90° y un intervalo de $0,02^\circ$ - 2° /min de forma continua, presente en el Centro de Asistencia a la Investigación CAI de la Facultad de Ciencias Químicas (UCM).

Del análisis de difracción de rayos X se obtuvieron difractogramas de cada muestra, que fueron analizados con el *software* «Match!» para poder obtener las fases minerales presentes en cada una de ellas.

2.2.2. Caracterización petrofísica

La caracterización petrofísica ha consistido en el estudio de las propiedades dinámicas, estructurales, hídricas y mecánicas de las muestras de yeso más representativas del afloramiento en estudio (BSM-1, BSM-5, BSM-8 y BSM-11). Para ello, a partir de dichas muestras se prepararon tres tipos probetas de cada una de las muestras. Primeramente, se cortaron entre 4 y 5 probetas cúbicas por muestra, con dimensiones de $70 \times 70 \times 70 \pm 5$ mm (Fig. 6A). En segundo lugar, se cortaron 3 probetas planas por muestra con dimensiones de $50 \times 50 \times 10 \pm 5$ mm (Fig. 6B). Por último, se talló por cada muestra una probeta cilíndrica de $1,8 \text{ cm}^3$, una por cada muestra (Fig. 6C).

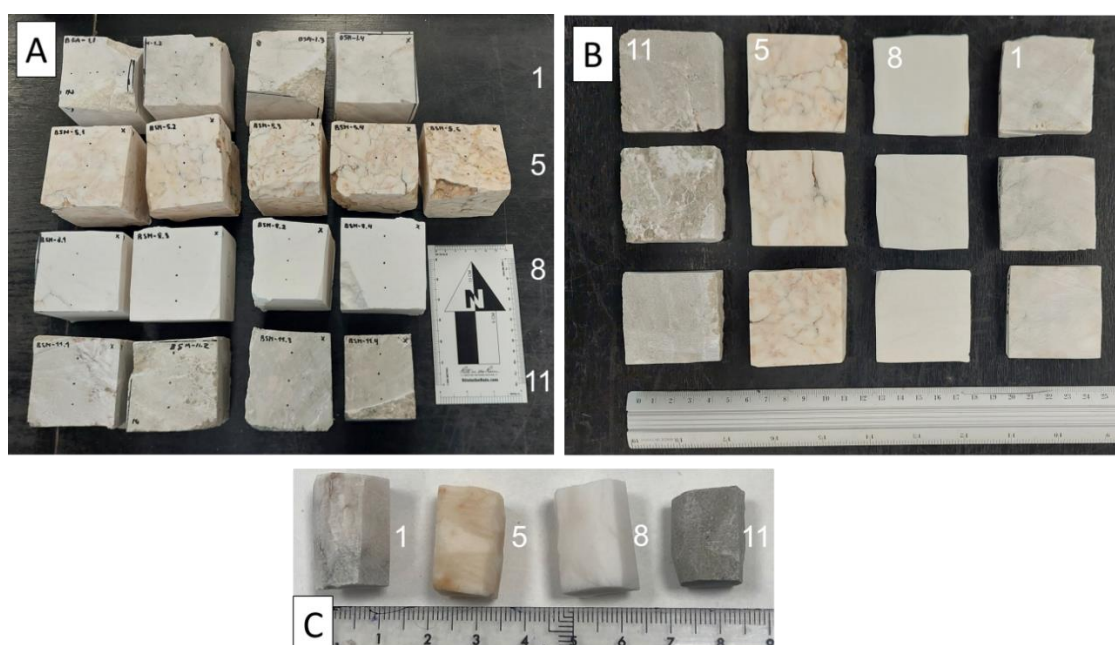


Figura 6. Probetas de las muestras utilizadas para la caracterización petrofísica. A) Probetas cúbicas. B) Probetas planas. C) Probetas cilíndricas. Muestras 1: BSM-1, 5: BSM-5, 8: BSM-8, 11: BSM-11).

El tipo de probeta depende del ensayo a realizar. Las probetas cúbicas se emplearon para los ensayos de propagación ultrasónica y anisotropía, absorción-desorción, saturación, permeabilidad al aire y resistencia al rebote; las probetas planas se usaron para el ensayo de permeabilidad al vapor de agua y las probetas cilíndricas sirvieron para el ensayo de porosimetría de mercurio.

Todos los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de Petrofísica de la Facultad de Ciencias Geológicas, a excepción del ensayo de porosimetría de mercurio, que se realizó en el laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geociencias (CSIC-UCM).

2.2.2.1. Propiedades dinámicas

Las propiedades dinámicas se han estudiado aplicando ondas ultrasónicas a través de un material con el fin de conocer su comportamiento y estructura interna al paso de estas y en función de cómo interactúan con las distintas fases de estado (sólido, líquido y gaseoso) que pueden estar presentes (minerales, agua y poros).

2.2.2.1.1. Propagación ultrasónica

El ensayo de propagación ultrasónica consiste en hacer pasar una onda longitudinal P por el material ensayado para conocer el tiempo de propagación a lo largo de una distancia conocida, que se traduce en la velocidad de propagación (V_p , m/s).

La velocidad de propagación de la onda P depende de la densidad de la muestra, de su textura, grado de anisotropía, porosidad, mineralogía y contenido en fluidos (Fort *et al.*, 2008, 2011). Los valores de V_p disminuyen progresivamente según el contenido en cementos, arcillas, soluciones fluidas, agua o aire.

Para este ensayo se utilizó un equipo de ultrasonidos Pundit Lab+ de la marca Proceq con dos transductores de 250 kHz de frecuencia y 28 mm de diámetro (Fig. 7AB), siguiendo la norma UNE-EN 14579 (2005). Se empleó en modo de transmisión-recepción directo, posicionando los transductores enfrentados en caras opuestas.

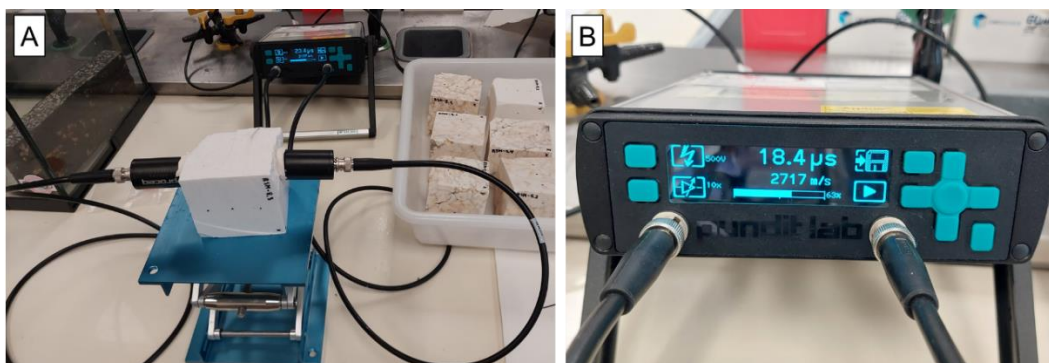


Figura 7. A) Equipo de ultrasonidos con los transductores enfrentados en una probeta cúbica. B) Resultado del tiempo de propagación en μ s.

2.2.2.1.2. Anisotropía

La anisotropía es una propiedad interna que refleja el grado de heterogeneidad de la estructura composicional de un material. Indica la existencia de orientaciones preferentes de debilidad estructural, textural y/o mineralógica a favor de uno o varios de los ejes ortogonales «X», «Y» y «Z».

Para el cálculo de este parámetro se emplearon los dos índices de anisotropía propuestos por Guydader y Denis (1986) (Fort *et al.*, 2011), para los que se usaron las velocidades de propagación de las ondas P (V_p) calculadas anteriormente en las tres

direcciones espaciales. Estos índices son el de anisotropía total (dM%), donde se consideran los tres ejes espaciales, y el de anisotropía relativa (dm%), donde se consideran los dos ejes espaciales de mayor velocidad de propagación (Fort *et al.*, 2008).

$$dM \% = \left[1 - \left(\frac{2V_p \text{ min}}{V_p \text{ med} + V_p \text{ max}} \right) \right] \cdot 100$$

$$dm \% = \left[2 \cdot \frac{(V_p \text{ max} - V_p \text{ med})}{(V_p \text{ max} + V_p \text{ med})} \right] \cdot 100$$

- dM = Anisotropía total (%).
- dm = Anisotropía relativa (%).
- Vp min/med/max = Valores mínimo, medio y máximo de velocidad de propagación (m/s), respectivamente, en los tres ejes espaciales.

Aplicado a este caso de estudio, el análisis de la anisotropía permite conocer la posible existencia de direcciones preferentes por las que puede haber circulación de fluidos o gases, y cuyo conocimiento es de interés en este trabajo al proponerse las rocas evaporíticas de la Formación Villalba de la Sierra como potencial sello.

2.2.2.2. Propiedades estructurales

Las propiedades estructurales son aquellas referentes a la estructura interna de los materiales, considerando, especialmente, la estructura porosa y su distribución.

2.2.2.2.1. Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)

La porosimetría por intrusión de mercurio (PIM) es una técnica que consiste en introducir mercurio en la porosidad de un material en condiciones de presión para determinar parámetros físicos tales como las densidades real y aparente, la porosidad total, el tamaño medio de los poros, su forma, la distribución de los distintos tamaños de poro, la relación entre la microporosidad y la macroporosidad –estableciendo la barrera a 5µm (Rodríguez y Sebastián, 1994)– y la conexión capilar entre los poros.

Se trata de una técnica que sigue la norma ASTM D 4404-10 (2010). El porosímetro usado es un Micromeritics Autopore IV, con un rango de tamaño de poro de 0,001-500µm de diámetro. Para el ensayo se utilizaron las cuatro probetas cilíndricas, de 10 mm de diámetro y 15 mm de altura.

2.2.2.3. Propiedades hídricas

Los ensayos referentes a las propiedades hídricas son aquellos que estudian el comportamiento de un material ante la entrada de un fluido acuoso o gaseoso en su

sistema poroso. El estudio de las propiedades hídricas incluye los ensayos de saturación, absorción-desorción, permeabilidad al vapor de agua y permeabilidad al aire.

2.2.2.3.1. Saturación al agua

El ensayo de saturación permite conocer las densidades real y aparente, el índice de compacidad, las porosidades total, abierta y atrapada y el grado de saturación en agua de los materiales estudiados. Este ensayo se realiza sobre las probetas cúbicas.

El ensayo modificado sigue las normas UNE-EN 1936 (2007) y RILEM (1980).

Para conocer los parámetros mencionados, se emplearon las siguientes fórmulas:

$$Dr = \frac{Md}{(Md - Mh)} \qquad Da = \frac{Md}{(Ms - Mh)} \cdot \rho \text{ agua (20°C)}$$

$$C = \frac{Da}{Dr} \qquad Pa = \left[\frac{Ms - Md}{Ms - Mh} \right] \cdot 100 \qquad Pt = \left[1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right) \right] \cdot 100$$

$$Pr = Pt - Pa \qquad Sat = \left[\frac{Ms - Md}{Md} \right] \cdot 100$$

- Md = Peso seco (g)
- Ms = Peso saturado (g)
- Mh = Peso hidrostático (g)
- Dr = Densidad real (kg/m³)
- Da = Densidad aparente (kg/m³)
- ρ agua a 20°C = 998 (kg/m³)
- C = Índice de compacidad (0-1)
- Pa = Porosidad abierta (%)
- Pt = Porosidad total (%)
- Pr = Porosidad atrapada (%)
- Sat = Saturación de agua (%)

2.2.2.3.2. Absorción y desorción de agua

Son dos ensayos, uno de absorción de agua por inmersión y otro de desorción de agua por evaporación, ambos a presión atmosférica. Su objetivo es conocer el comportamiento cinético de un material frente a la movilización en su interior de un fluido.

El ensayo de absorción (ABS%) se realizó de acuerdo con las normas UNE-EN 13755 (2008) y la norma italiana NORMAL 7/81. Este ensayo refleja la velocidad de captación del agua por parte de las probetas cúbicas ensayadas. También se calculó el coeficiente de absorción a las 48 horas.

$$ABS = \left[\frac{Ms - Md}{Md} \right] \cdot 100$$

- Md = Peso seco inicial (g)
- Ms = Peso saturado a distintos tiempos (g)

El ensayo de desorción (DES%) viene determinado por la norma italiana NORMAL 7/81. Muestra la velocidad de pérdida de agua por evaporación.

$$DES = \left[\frac{M_s - M_d}{M_d} \right] \cdot 100$$

- M_d = Peso seco inicial (g)
- M_s = Peso de desorción a distintos tiempos (g)

2.2.2.3.3. Permeabilidad al vapor de agua

El ensayo de permeabilidad al vapor de agua consiste en determinar el caudal (kg/s), la velocidad (kg/s·m²) y la capacidad (kg/m·s·Pa) de transmisión de la fase gaseosa al atravesar un material, cuyo espesor es conocido, y de acuerdo con su porosidad.

Para este ensayo, en el que se siguió la norma UNE-EN 15803 (2010), se hizo uso de las probetas planas, las cuales se introdujeron en unas cubetas cilíndricas normalizadas de PVC y aluminio, con una cámara donde se añadieron 10 ml de agua desionizada. (Fig. 8A y B).

Esta técnica calcula la cantidad de vapor de agua que fluye por unidad de tiempo a través de la superficie del material, el cual posee un espesor determinado. Para ello, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\delta_p = W_p \cdot D$$

- δ_p = Permeabilidad al vapor de agua en cuanto a la presión parcial del vapor (kg/m·s·Pa).
- W_p = Penetración del vapor de agua (kg/m²·s·Pa).
- D = Espesor de la probeta (m).

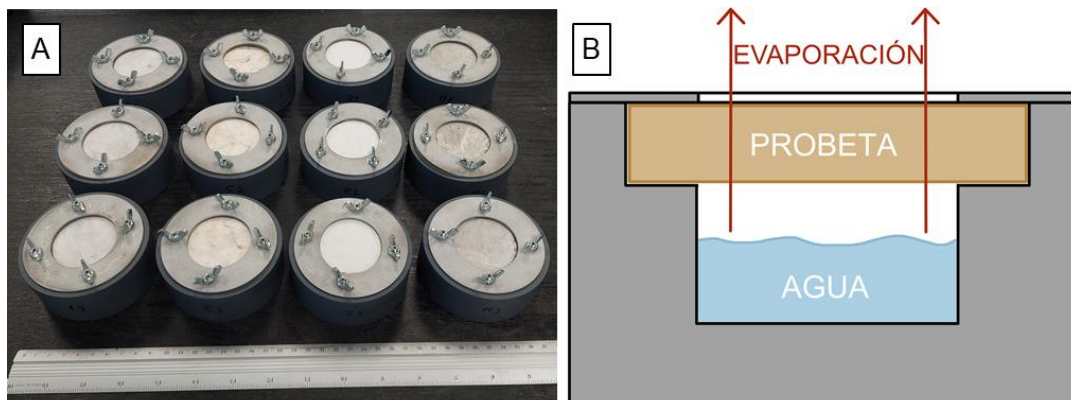


Figura 8. A) Cubetas cilíndricas con las probetas planas colocadas para el ensayo. B) Esquema de un corte transversal de una cubeta. La evaporación del fluido desde la cámara se produce a través de la probeta y queda constreñida al área de la abertura circular de la pieza superior.

2.2.2.3.4. Permeabilidad al aire

El ensayo de permeabilidad consiste en introducir aire a presión a través de un material para determinar si puede circular dicho gas por su interior.

Para el ensayo se empleó un permeámetro de aire TinyPerm II (Fig. 9A y B). El equipo ofrece un valor que se introduce en la fórmula siguiente para conocer la permeabilidad:

$$T = -0,8206 \cdot \log_{10}(K) + 12,8737$$

- T = Valor del equipo TinyPerm
- K = Permeabilidad (mD)

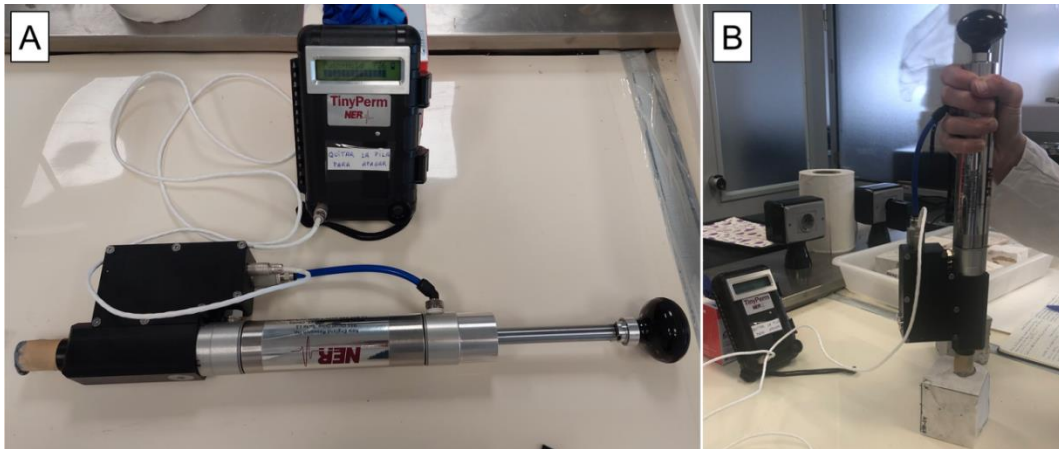


Figura 9. A) Permeámetro de aire TinyPerm II. B) Permeámetro de aire TinyPerm posicionado en vertical sobre una muestra durante un ensayo.

2.2.2.4. Propiedades mecánicas

Estas técnicas tienen por objetivo medir la resistencia de un material a ser deformado y/o fracturado al aplicar esfuerzos externos.

2.2.2.4.1. Resistencia al rebote o dureza superficial de Schmidt

Este ensayo mide la dureza superficial de un material, determinada a partir de la resistencia al rebote de su superficie. Para este ensayo se utilizó un martillo de Schmidt o esclerómetro, que consta de un pistón presionado por un muelle que es proyectado sobre un émbolo retráctil metálico que impacta con la superficie. La altura de rebote del pistón queda registrada e indica del valor de la resistencia al rebote sobre la superficie en la que se genera el impacto (Li *et al.*, 2000). Este valor se mide en unidades de Schmidt (R) y es mayor cuanto mayor sea la dureza superficial del material. La resistencia al rebote está relacionada con la mineralogía y el porcentaje de porosidad en la muestra.

Se empleó un martillo digital Schmidt tipo L de la marca Proceq (Fig. 10), indicado para rocas sedimentarias o meteorizadas, con un pistón de 10 mm de diámetro y una fuerza de impacto de 0,735 N. La norma seguida es la ASTM D5873-14 (2016).



Figura 10. Martillo de Schmidt empleado. La pantalla muestra los resultados después de realizar tres impactos sobre una muestra. Indica el valor medio (21,0 R), la diferencia entre los valores máximo y mínimo (12 R) y una desviación estándar de 6,5 (S).

3. RESULTADOS

3.1. Trabajo de campo

La litoestratigrafía del afloramiento «Buendía Sol-Marina» se representó en una columna de detalle a escala 1:100 (Fig. 11 y 12). El espesor total de la columna es de 101,3 metros y en ella se diferenciaron diversos tramos según sus características litológicas y texturales:

- Tramo 1: 14 metros de potencia. Yeso alabastrino con textura nodular de color blanco y algo verdoso, con fracturas rellenas de margas verdes en la zona superficial (Fig. 13A). Se dispone en cuerpos de base y techo netos e irregulares y espesores decimétricos a métricos.
- Tramo 2: 18,2 metros de potencia. Tramo cubierto. Lateralmente afloran alternancias de yesos blancos con margas, correspondientes al tramo 4.
- Tramo 3: 4 metros de potencia. Tramo semicubierto de yeso alabastrino con textura nodular de color blanco. Es un cuerpo de aspecto masivo.
- Tramo 4: 8,4 metros de potencia. Yesos alabastrinos con textura nodular de color blanco intercalados con margas verdes. Los yesos se disponen en cuerpos de hasta 0,5 metros de espesor de base neta irregular sobre los cuerpos de margas, y techo irregular y más gradual hacia las margas. Los niveles margosos presentan espesores decimétricos.
- Tramo 5: 4 metros de potencia. Tramo semicubierto de yeso alabastrino con textura nodular de color blanco dispuestos en cuerpos de hasta 0,6 – 0,7 metros de espesor (Fig. 13B).
- Tramo 6: 8 metros de potencia. Yesos alabastrinos con textura nodular y color anaranjado con intercalaciones de margas verdes. Los yesos se disponen en cuerpos tabulares de hasta 0,8 metros de espesor de base neta e irregular y techo gradual hacia las margas y algo irregular. Las margas presentan abundantes venas de yeso fibroso y componen tramos con espesores de entre 0,2 y 0,5 metros de potencia (Fig. 13C).
- Tramo 7: 5,2 metros de potencia. Alternancia de yesos alabastrinos con textura nodular y color anaranjado con margas de color verde y ocre con algunas venas de yeso fibroso. Los yesos forman cuerpos tabulares de base irregular y neta y techo algo más regular y gradual hacia las margas, con espesores variables entre 0,5 y 1 metro. Las margas se dan en cuerpos de hasta 0,5 – 0,6 metros de potencia.

- Tramo 8: 8,4 metros de potencia. Yeso alabastrino de textura nodular y color blanco dispuesto en cuerpos tabulares de base y techo netos y algo irregular y espesor métrico.
- Tramo 9: 0,6 metros de potencia. Margas de color ocre-amarillento con una intercalación de carbonatos micríticos de color ocre con lentículas de yeso de tamaño milimétrico. Los carbonatos forman un cuerpo de base cóncava y techo plano que se acuña lateralmente, con un espesor máximo de 0,2 metros.
- Tramo 10: 1,5 metros de potencia. Yeso alabastrino de textura nodular y color blanco. Forma un cuerpo masivo tabular de base neta y algo irregular y techo neto, con un espesor máximo de 1,5 metros.
- Tramo 11: 0,6 metros de potencia. Margas de color ocre-amarillento con una intercalación de carbonatos micríticos de color ocre con lentículas de yeso de tamaño milimétrico. Los carbonatos componen un cuerpo de base cóncava y techo plano que se acuña lateralmente, con un espesor máximo de 0,3 metros.
- Tramo 12: 1 metro de potencia. Yeso lenticular de color verde con una intercalación de margas de color ocre-amarillento. Los yesos se encuentran en cuerpos tabulares de base neta e irregular y techo neto, con espesores de hasta 0,5 metros.
- Tramo 13: 0,4 metros de potencia. Yeso alabastrino de textura nodular y color blanco con carbonatos micríticos de color ocre a techo. El yeso forma un cuerpo tabular de base y techos netos. A techo de este, los carbonatos se disponen en un cuerpo de base cóncava y techo plano que se acuña lateralmente y presenta una potencia máxima de 0,3 metros.
- Tramo 14: 0,5 metros de potencia. Margas de color ocre-amarillento y, a techo, carbonatos micríticos de color ocre con lentículas de yeso de tamaño milimétrico. Los carbonatos forman un cuerpo de base cóncava y techo plano que se acuña lateralmente, presentando una potencia máxima de 0,3 metros.
- Tramo 15: 1 metro de potencia. Yesos lenticulares de color verde con alguna intercalación de carbonatos micríticos de color ocre con lentículas de yeso milimétricas. Los yesos se disponen en cuerpos tabulares de base y techo netos y algo irregulares, con espesores máximos de 0,5 metros. Los carbonatos presentan base cóncava y techo plano, y se acuñan lateralmente.
- Tramo 16: 1,5 metros de potencia. Yesos lenticulares de color verde con lentículas de yeso de hasta 70 mm (Fig. 13D) y algún nódulo alabastrino de color anaranjado; y yesos alabastrinos de textura nodular de color blanco, con margas ocre-amarillentas a base. Ambos tipos de yesos se disponen en cuerpos

tabulares de base y techo netos y algo irregulares. Los yesos blancos se acuñan lateralmente.

- Tramo 17: 1 metro de potencia. Yeso lenticular de color verde. A techo presenta coloración roja. Forma un cuerpo tabular de base y techo netos y algo irregulares y espesor métrico.
- Tramo 18: 0,3 metros de potencia. Margas amarillas con lentículas de yeso y coloraciones rojas de óxido a base (Fig. 13E).
- Tramo 19: 3,2 metros de potencia. Yesos alabastrinos de textura nodular y color ocre. Se disponen en cuerpos tabulares de base y techo netos y algo irregulares.
- Tramo 20: 1,2 metros de potencia. Carbonatos micríticos de color ocre con lentículas de yeso milimétricas y bioturbación, a base, y yesos alabastrinos de textura nodular y color blanco, a techo. Los carbonatos presentan base cóncava y techo plano y se acuñan lateralmente, presentando un espesor máximo de 0,2 metros. Los yesos se disponen en un cuerpo tabular masivo de base y techo neto y algo irregular, con una potencia de hasta 1 metro.
- Tramo 21: 1,5 metros de potencia. Yesos lenticulares de color verde intercalados con carbonatos micríticos de color ocre con lentículas de yeso milimétricas y bioturbación intensa (Fig. 13F y G). Los yesos se forman cuerpos tabulares de base y techo neto y algo irregular, con espesores de hasta 0,5 metros. Los carbonatos se disponen en cuerpos de base cóncava y techo plano que se acuñan lateralmente y presentan espesores de hasta 0,2 – 0,3 metros.
- Tramo 22: 2 metros de potencia. Yesos lenticulares verdes con nódulos decimétricos de yeso alabastrino blanco que se intercalan con yesos alabastrinos de textura nodular y color blanco (Fig. 13H e I). Los cuerpos de yeso lenticular verde son tabulares, con techo y base netas y algo irregulares y potencias máximas de 0,6 – 0,7 metros. Los yesos alabastrinos blancos se disponen en cuerpos tabulares de techo y base netos e irregulares de hasta 0,4-0,5 metros de potencia.
- Tramo 23: 16,8 metros de potencia. Tramo cubierto.
- Techo: Lutitas rojas y ocasionalmente verdes con texturas de marmorización, huellas de raíces y fragmentos de cáscaras de huevos de dinosaurios.

Sintetizando la información de la columna estratigráfica de detalle, se ha generado una columna a escala 1:500 (Fig. 14).

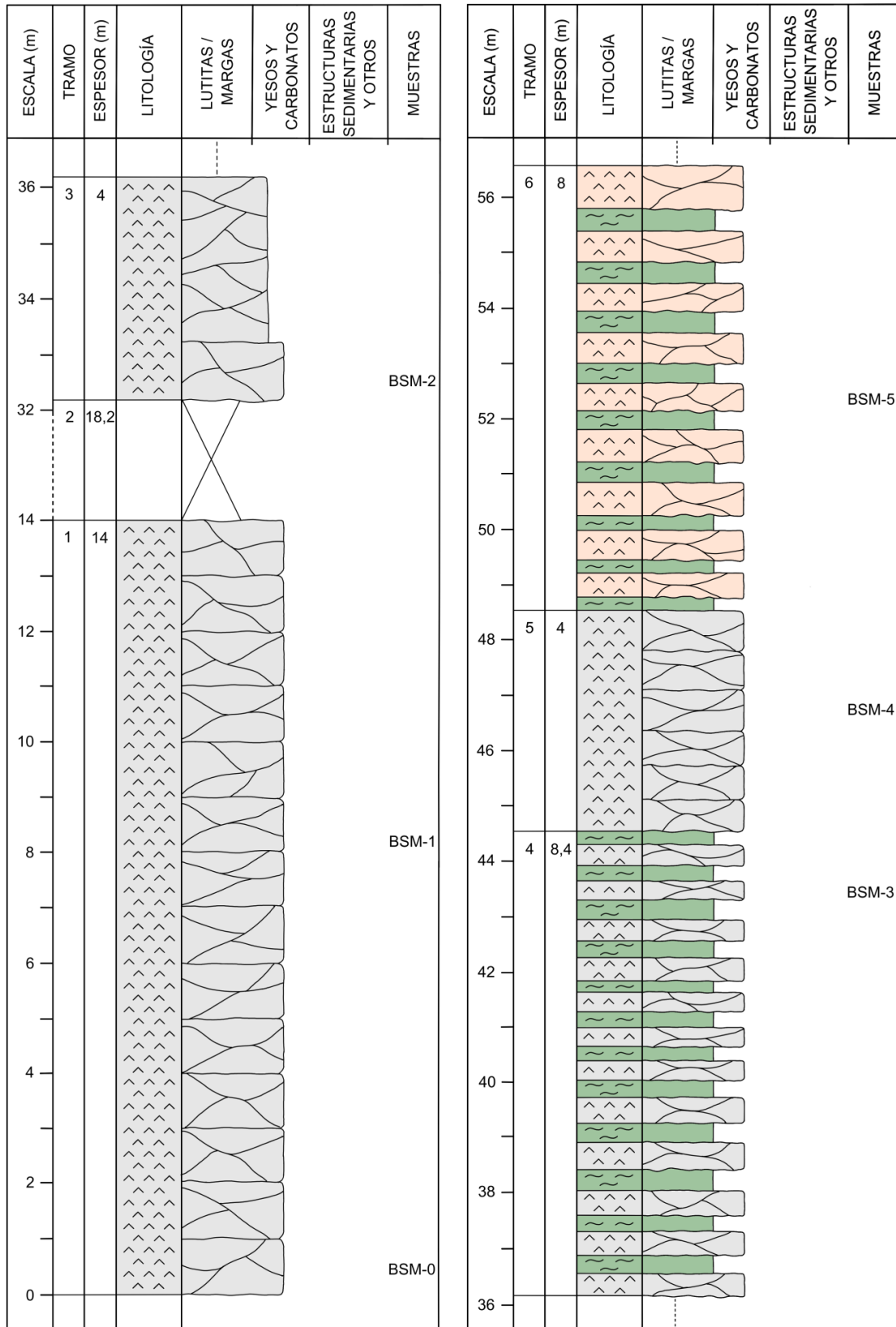


Figura 11. Secuencia inferior (izquierda) e inferior-media (derecha) de la columna de detalle a escala 1:100. El resalte de los estratos se establece por su litología y resalte observado en campo. Los tramos cubiertos no están representados a escala.

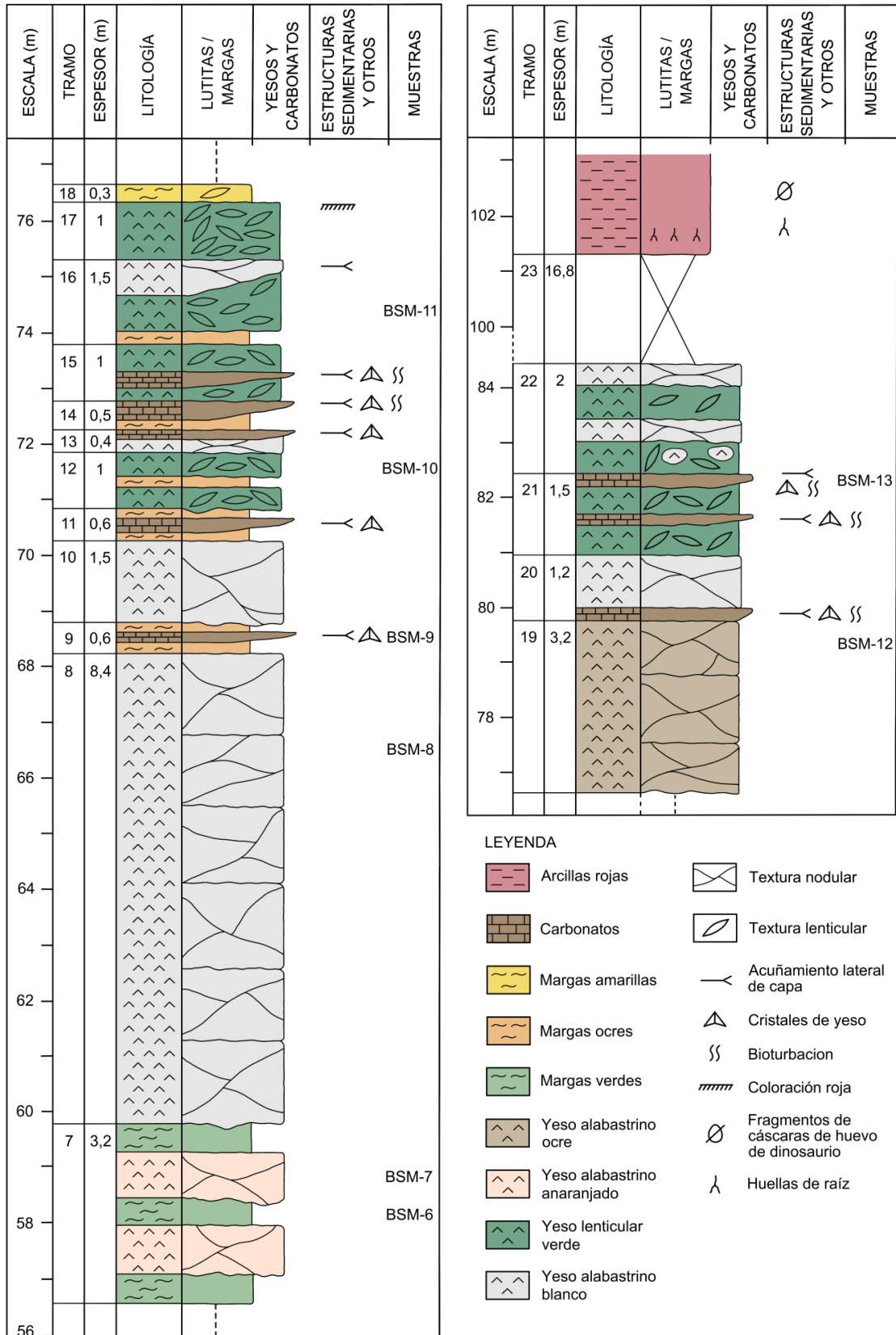


Figura 12. Secuencias media-superior (izquierda) y superior (derecha) de la columna de detalle a escala 1:100. El resalte de los estratos se establece por su litología y resalte observados en campo. Los tramos cubiertos no están representados a escala.

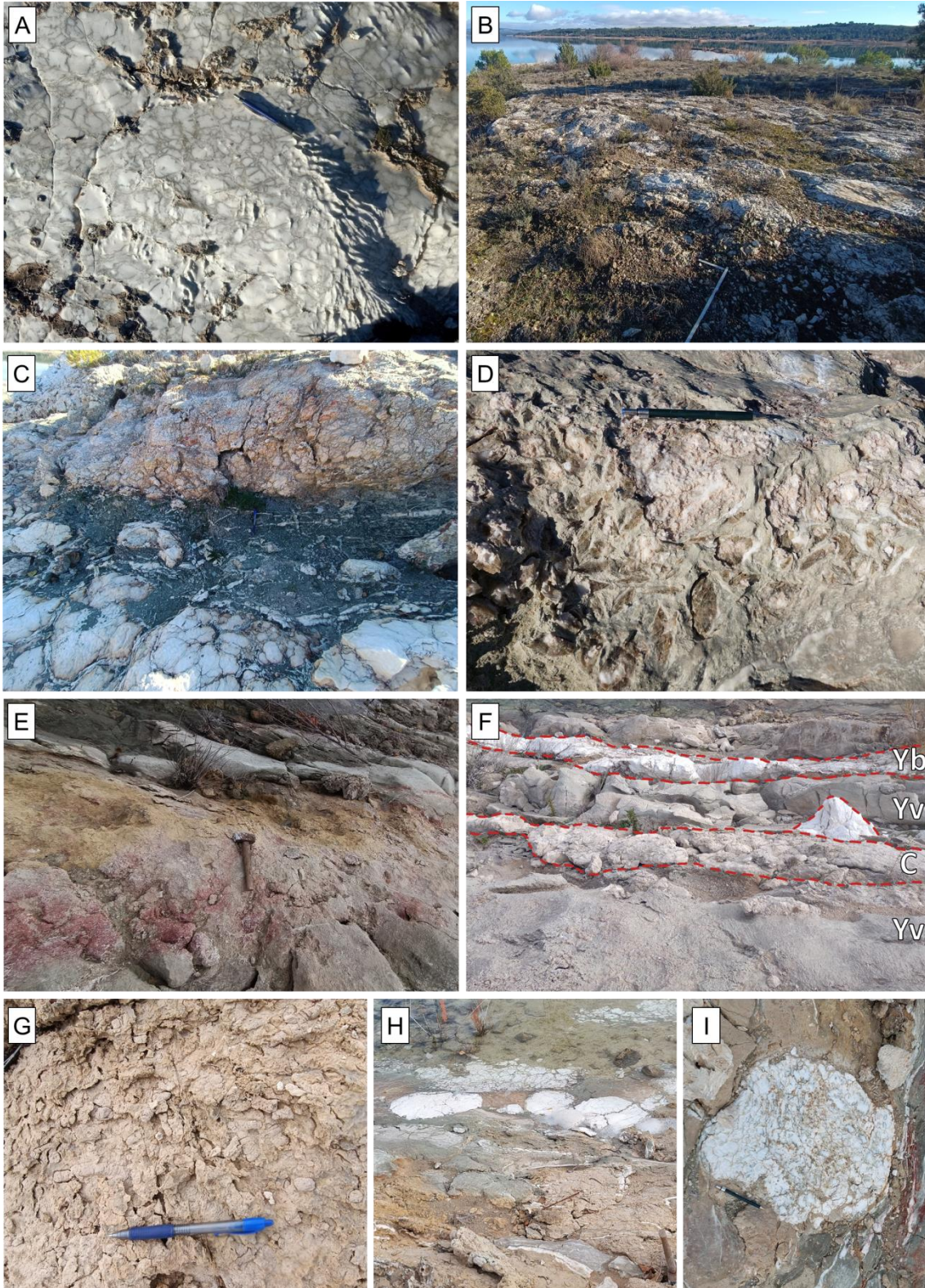


Figura 13. Detalles del afloramiento. A) Yeso alabastrino de textura nodular blanco. B) Yesos blancos semicubiertos. C) Yeso alabastrino anaranjado con intercalaciones de margas verdes. D) Yeso lenticular verde con lenticulas de yeso centimétricas. E) Yeso lenticular verde con coloración rojiza y margas amarillas a techo. F) Yesos lenticulares verdes (Yv) con intercalaciones de yesos alabastrinos nodulares blancos (Yb) y carbonatos (C). G) Carbonato micrítico con bioturbación intensa. H) Nódulos de diámetro decimétrico de yeso alabastrino blanco incluidos en yeso lenticular verde. I) Nódulo de yeso alabastrino blanco.

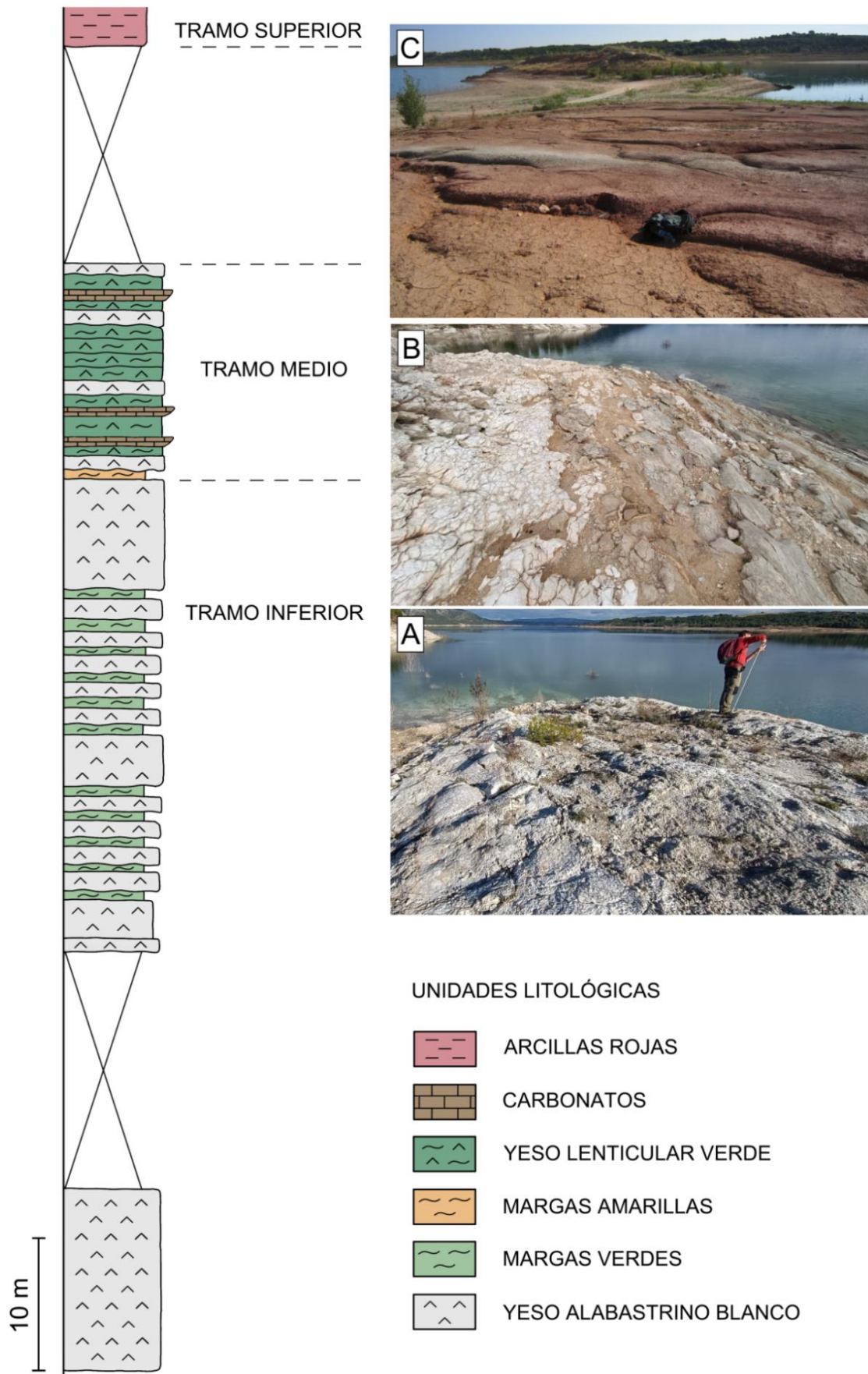


Figura 14. Columna sintética del afloramiento «Buendía Sol-Marina» a escala 1:500 e imágenes de afloramiento correspondientes al tramo inferior (A), medio (B) y superior (C). El resalte representado en la columna está basado en el resalte de los estratos observado en campo.

En la columna sintética (escala 1:500) se han diferenciado tres tramos generales en función de sus principales características litológicas. El tramo general inferior, con alrededor de 70 metros de potencia, se compone de yeso alabastrino de textura nodular y color blanco con intercalaciones de margas verdes (Fig. 14A). El tramo general medio, con al menos 14 metros de potencia (a techo presenta un tramo cubierto), consta de yesos lenticulares verdes con algunas intercalaciones de yeso alabastrino de textura nodular y de color blanco y niveles de carbonatos micríticos friables (Fig. 14B). El tramo general superior se compone de lutitas rojas con texturas de marmorización y huellas de raíces (Fig. 14C).

3.2. Trabajo de laboratorio

3.2.1. Caracterización petrográfica

La caracterización petrográfica aúna las descripciones macroscópicas y microscópicas realizadas, así como los análisis de difracción de rayos X (DRX).

- **Muestra BSM-1**

El aspecto macroscópico de esta muestra refleja que es un yeso de color blanco con textura nodular. Los nódulos son irregulares, tienen entre 10 y 35 mm de longitud máxima y están marcados por una capa cristalina de espesor milimétrico de color verdoso, que en ocasiones contienen yeso fibroso (secundario diagenético). Hacia zonas superficiales, estas capas verdosas están reemplazadas por material margoso, también de color verde. Es una muestra friable. (Fig. 15A).

Desde el punto de vista microscópico, la muestra se compone de yeso alabastrino, caracterizado por presentar cristales interdigitados con longitudes medias de 50 μm . Presenta textura nodular delimitada por bandas de yeso fibroso de hasta 250 μm de espesor. El tamaño de los nódulos es muy variable. Contiene masas residuales, insolubles y oscuras con aspecto bandeado localizadas en el límite entre los nódulos y las venas de yeso fibroso (Fig. 15B y C). La porosidad que alberga es escasa y poco visible con el microscopio petrográfico. Se trata de una porosidad por disolución (microporosidad) y por fractura (macroporosidad; Fig. 15D). Las concentraciones de material residual están asociadas a la microporosidad. La porosidad de fractura se encuentra en el contacto entre las venas de yeso fibroso y los nódulos. Al microscopio de fluorescencia, esta porosidad se hace más visible y se detecta en zonas donde se concentra con formas más ramificadas.

El análisis mineralógico de DRX corrobora la presencia mayoritaria de yeso y cantidades traza (<1%) de moganita (SiO_2 polimórfico asociado a ambientes evaporíticos; Heaney, 1995), no detectada al microscopio (Tabla 2).

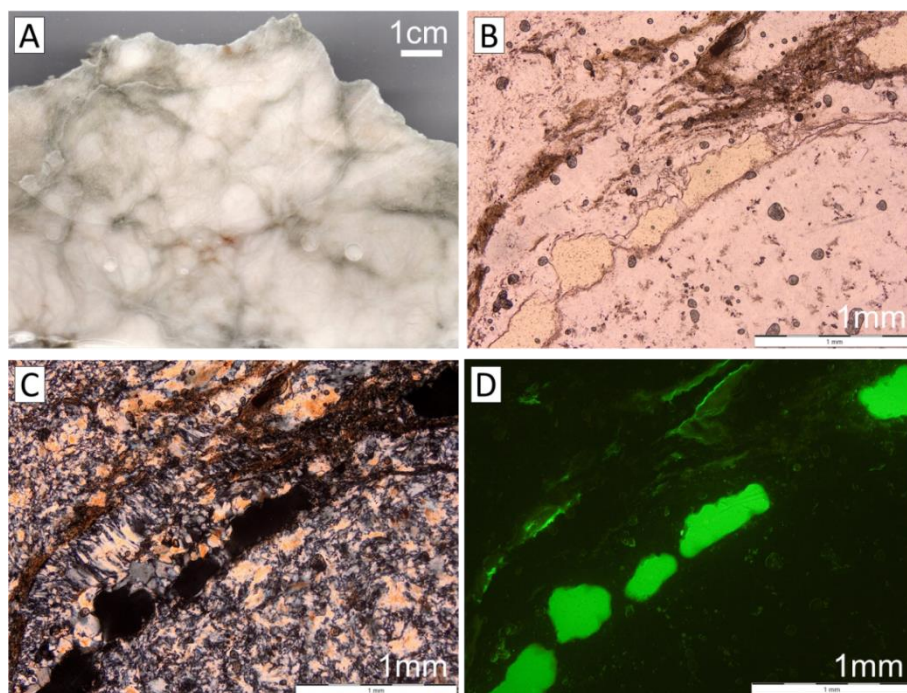


Figura 15. Muestra BSM-1. Aspecto macroscópico (A) y microscópico con nicoles paralelos (B), nicoles cruzados (C) y luz ultravioleta (D).

Tabla 2. Fases minerales y composición elemental obtenidas por DRX para cada muestra.

MUESTRA	FASE MINERAL (%)	ELEMENTOS (%)	MUESTRA	FASE MINERAL (%)	ELEMENTOS (%)
BSM-1	Yeso 99,4 Moga- nita 0.6	O 55,7	BSM-9	Dolomita 44,3 Yeso 42,6 Calcita 13,1	O 53,1
		Ca 23,2			Ca 24,8
		S 18,5			S 7,9
		H 2,3			C 7,3
		Si 0,3			Mg 5,8
BSM-5	Yeso 100	O 55,8	BSM-11	Yeso 95,2 Sílice 3,3 Paligors- kita 1,5	O 55,7
		Ca 23,3			Ca 22,2
		S 18,6			S 17,7
		H 2,34			H 2,26
					Si 1,94
BSM-8	Yeso 100	O 55,8	BSM-12	Yeso 100	O 55,8
		Ca 23,3			Ca 23,3
		S 18,6			S 18,6
		H 2,34			H 2,34

- **Muestra BSM-5**

Macroscópicamente, esta muestra se ha identificado como un yeso anaranjado de textura nodular. Los nódulos son irregulares, con diámetros variables de entre 5 y 40 mm, y están delimitados por zonados cristalinos de color anaranjado-pardo que hacia zonas superficiales de la muestra aparecen disueltas y rellenas de marga verde. Es una muestra friable, que se fractura con facilidad a partir de las zonas donde las margas son más abundantes (Fig. 16A).

El aspecto microscópico corresponde a un yeso alabastrino con cristales interdigitados con de longitud variable que alcanzan los 100 μm . Presenta textura nodular, con nódulos de diámetro muy variable y delimitados por bandas donde el tamaño de los cristales es mayor respecto al interior del nódulo. En estas bandas no se aprecia ninguna textura, aunque podría tratarse de una sección perpendicular de una fractura rellena de yeso fibroso. La muestra contiene masas residuales insolubles oscuras dispersas y dispuestas en bandas a lo largo del límite entre las venas de yeso fibroso y los nódulos (Fig. 16B y C). La porosidad es de fractura (macroporosidad) y de disolución (microporosidad). Esta última se encuentra dispersa. Las masas residuales anteriormente mencionadas aparecen asociadas a la porosidad de fractura (Fig. 16D). La prueba de DRX señala que se trata de una muestra compuesta por yeso (Tabla 2).

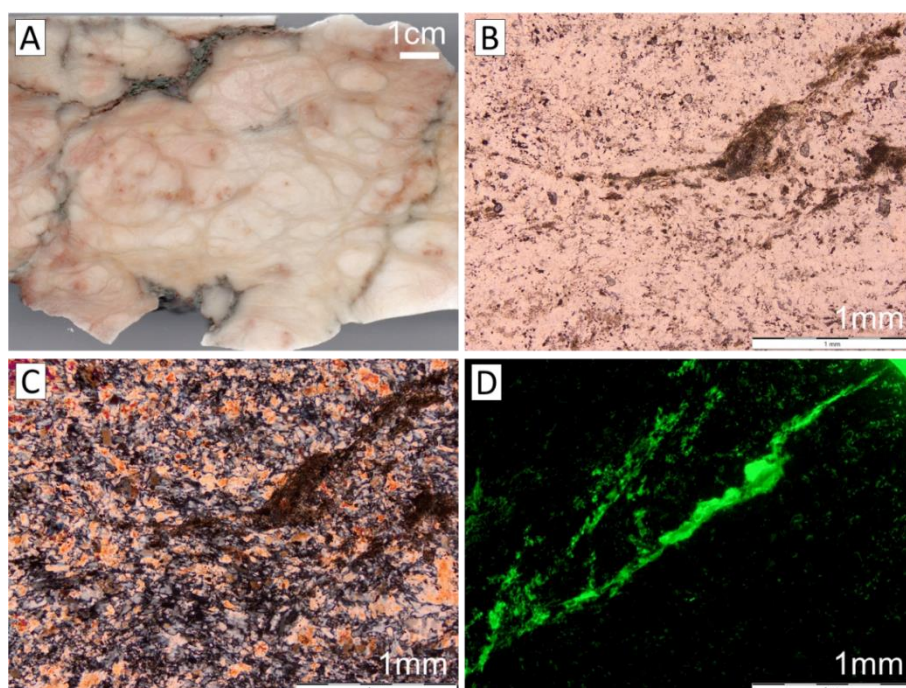


Figura 16. Muestra BSM-5. Aspecto macroscópico (A) y microscópico con nículos paralelos (B), nículos cruzados (C) y luz ultravioleta (D).

- **Muestra BSM-8**

El aspecto macroscópico de la muestra indica que es un yeso alabastrino blanco de textura nodular. Los nódulos son irregulares y presentan lentículas cristalinas de hasta 2 mm de máxima longitud. En este caso, el zonado que marca la morfología del nódulo presenta coloración gris. También en zonas superficiales hay fisuras rellenas de margas verdes. Es un yeso muy compacto (Fig. 17A).

Desde el punto de vista microscópico, se trata de un yeso alabastrino, con cristales interdigitados de hasta 100 μm . Tiene textura nodular, con nódulos de tamaño muy variable delimitados por bandas de yeso fibroso con espesores de hasta 500 μm en

cuyos bordes hay material residual insoluble (Fig. 17B y C). Presenta abundante porosidad, distinguiéndose dos tipos. Mayoritariamente hay microporosidad ramificada, asociada a zonas donde el tamaño de cristal es menor. También hay macroporosidad de tipo fractura, situada en el límite entre las bandas de yeso fibroso y los nódulos. Asociada a estas zonas de fractura se observan dos tipos de residuos de disolución. Por un lado, se encuentra un residuo micrítico de color oscuro y, por otro, masas de microcristales (Fig. 17D).

El análisis de DRX indica que la mineralogía corresponde a yeso (Tabla 2).

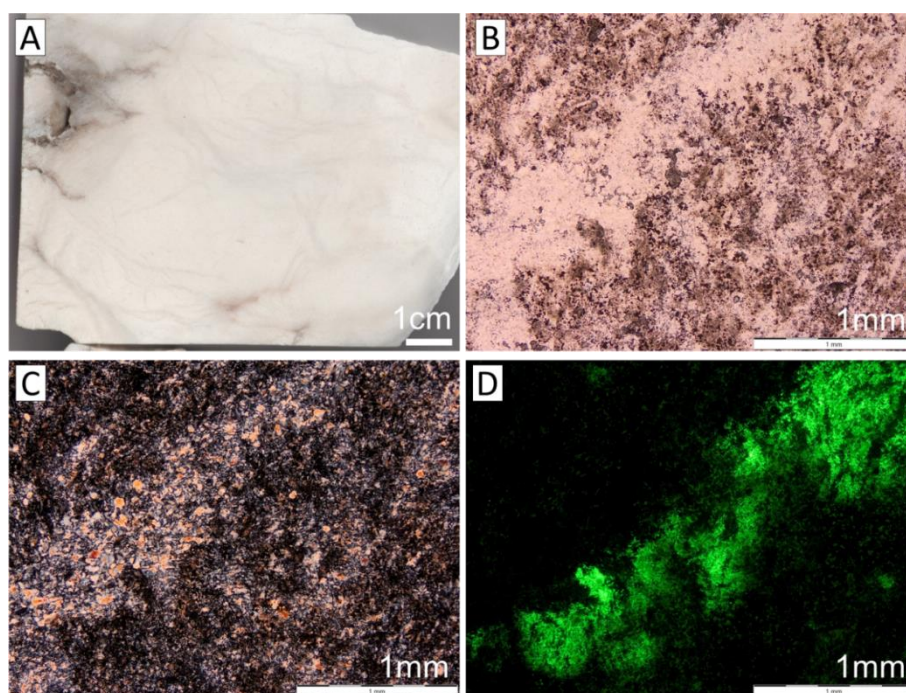


Figura 17. Muestra BSM-8. Aspecto macroscópico (A) y microscópico con nicoles paralelos (B), nicoles cruzados (C) y luz ultravioleta (D).

- **Muestra BSM-9**

El aspecto macroscópico de esta muestra indica que es un carbonato micrítico de color blanco-ocre con abundantes lenticulas de yeso de hasta 1-2 mm de longitud en su eje largo. Es un material muy friable (Fig. 18A).

Microscópicamente, se trata de una dolomicrita con textura nodular (Fig. 18B). Los nódulos presentan forma irregular y en ellos se concentran abundantes pseudomorfos de yeso lenticular de longitud variable (hasta 1 mm de longitud en su eje largo) que aparecen en general desorientados y, ocasionalmente, dispuestas paralelas a una superficie cóncava debido a bioturbación (Fig. 18C). Los nódulos están delimitados por bandas micríticas oscuras, ocasionalmente con acumulados oscuros pardo-rojizos en forma de coliflor. Tanto en los pseudomorfos como en la matriz dolomicrítica se observa un reemplazamiento por calcita (Fig. 18D).

El análisis de la mineralogía por DRX muestra que la composición mayoritaria incluye dolomita y yeso y, en menor proporción, calcita (Tabla 2).

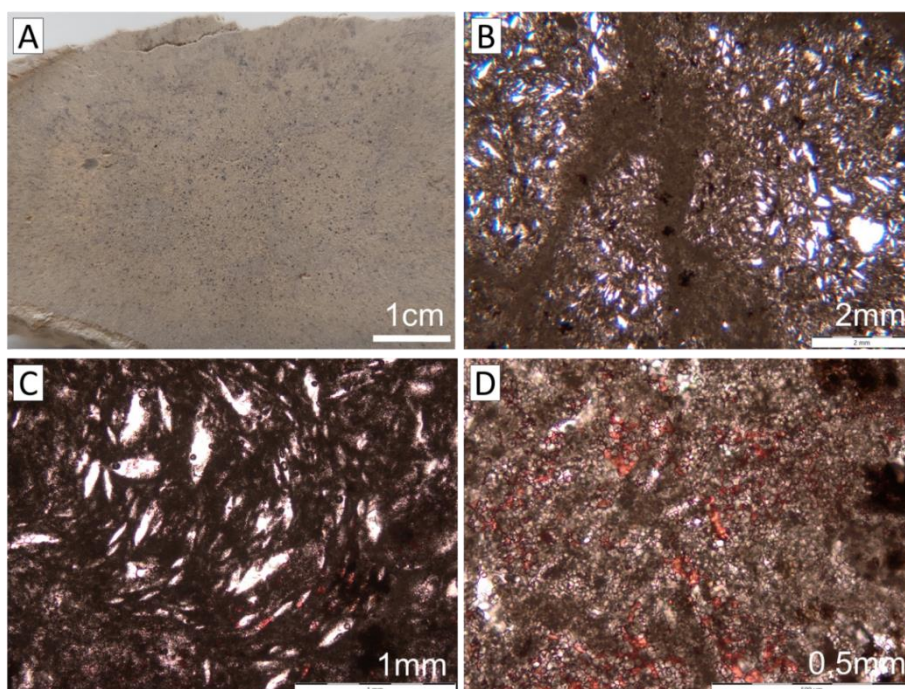


Figura 18. Muestra BSM-9. Aspecto macroscópico (A), textura nodular con nícoles paralelos (B), textura lenticular en el interior de los nódulos con bioturbación (C) y reemplazamiento de calcita (D).

- **Muestra BSM-11**

Macroscópicamente, la muestra es un yeso lenticular con una matriz microcristalina de color verdoso. Las lentículas tienen longitudes inferiores a 0,5 mm por lo general. También se observa cierta textura nodular. Los nódulos en esta muestra son alabastrinos y poco abundantes, y, por lo general, de menor tamaño que en las muestras anteriores, con diámetros de hasta 15 mm, con coloraciones rosáceas y morfologías irregulares. La muestra presenta numerosas fisuras, frecuentemente rellenas por yeso fibroso de hasta 10 mm de espesor, algunas de las cuales llevan asociadas óxidos de color rojo en los bordes. Es una muestra friable (Fig. 19A).

Desde el punto de vista microscópico, se trata de un yeso alabastrino con textura nodular. La matriz contiene abundante material residual insoluble y pseudomorfos de lentículas recristalizadas por yeso alabastrino, con longitudes de hasta 250 μm . Presenta numerosas fracturas con yeso fibroso con espesores que varían de 50 a 250 μm (Fig. 19B y C). La porosidad de esta muestra es muy abundante. Es de tipo fisural y aparece asociada a los bordes de los pseudomorfos de yeso. La abundante micrita que presenta la muestra está asociada a la porosidad inter-lentícula. Los nódulos son zonas más masivas y presentan algo menos de porosidad (Fig. 19D).

El análisis de la mineralogía por DRX señala que es una muestra mayoritariamente compuesta por yeso, con un contenido muy reducido en SiO₂ y paligorskita (Tabla 2).

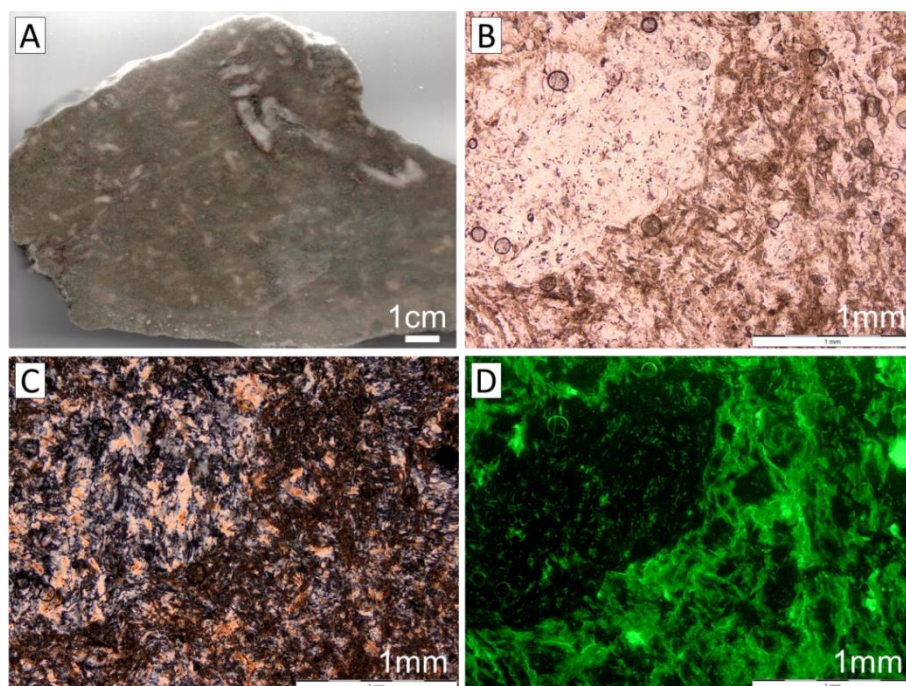


Figura 19. Muestra BSM-11. Aspecto macroscópico (A) y microscópico con nícoles paralelos (B), nícoles cruzados (C) y luz ultravioleta (D).

- **Muestra BSM-12**

El aspecto macroscópico de esta muestra señala que es un yeso alabastrino de color ocre-anaranjado con textura nodular. Los nódulos son pequeños, de hasta 10 mm de longitud máxima, y están delimitados por zonados cristalinos de color anaranjado-pardo que, en distintas zonas superficiales de la muestra aparecen disueltas y rellenas de marga verde. Tiene fisuras de hasta 7 mm de espesor rellenas de una matriz microcristalina verdosa, similar a la de la muestra BSM-11, con abundantes lentículas cristalinas de longitud milimétrica. Hay algunas fisuras de menor espesor marcadas por óxidos de color rojo (Fig. 20A).

Desde el punto de vista microscópico, la muestra es un yeso alabastrino con cristales interdigitados de distintos tamaños, con textura nodular. Los nódulos están delimitados por bandas con pseudomorfos (Fig. 20B y C) y fantasmas de lentículas de yeso (Fig. 20C) y una matriz oscura residual. Los pseudomorfos tienen tamaño muy variable, alcanzando las 250 μm de longitud.

El análisis mineralógico de DRX muestra que la composición es íntegramente yeso (Tabla 2).

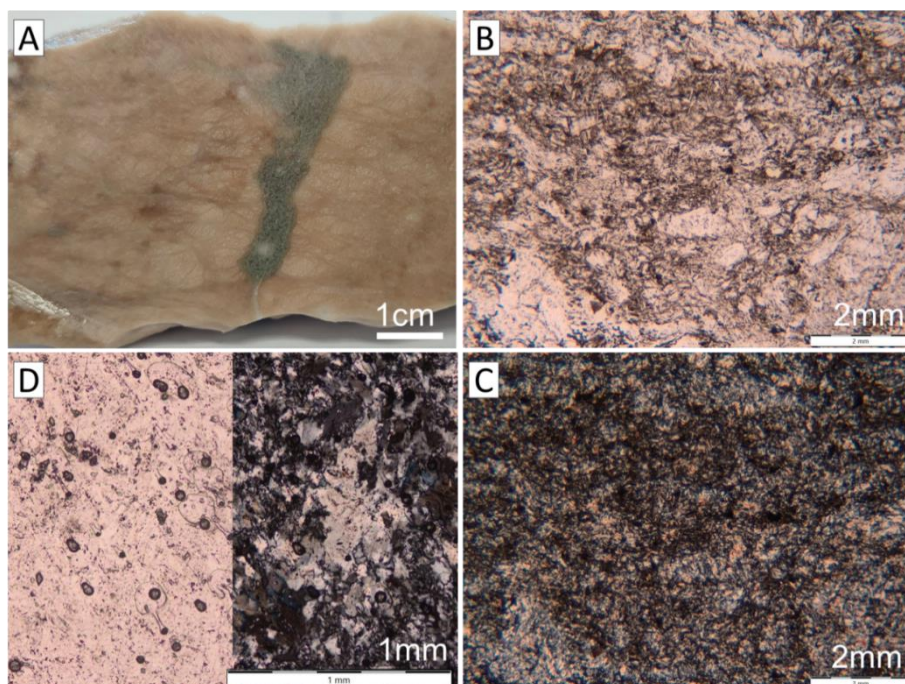


Figura 20. Muestra BSM-12. Aspecto macroscópico (A) y microscópico con nícoles paralelos (B) y nícoles cruzados (C). Fantasma de lenticula con nícoles paralelos y cruzados (D).

3.2.2. Caracterización petrofísica

3.2.2.1. Propiedades dinámicas

3.2.2.1.1. Propagación ultrasónica y anisotropía

La tabla 3 muestra los valores promedio de velocidad de propagación (V_p) y de anisotropía total (dM) y relativa (dm).

Tabla 3. Valores medios de V_p , dM y dm de las muestras ensayadas.

MUESTRA	V_p (m/s)	dM (%)	dm (%)
BSM-1	4226 ± 154	$2,31 \pm 0,66$	$0,91 \pm 0,55$
BSM-5	3759 ± 351	$13,27 \pm 7,25$	$5,70 \pm 4,84$
BSM-8	3913 ± 196	$5,21 \pm 1,77$	$2,10 \pm 2,27$
BSM-11	2802 ± 302	$8,67 \pm 5,11$	$5,34 \pm 2,63$

Los valores medios de V_p son bastante altos en las muestras BSM-1, 5 y 8, con valores por encima de los 3700 m/s. Por el contrario, los valores medios de anisotropía total (dM) son en general bajos, siendo la muestra BSM-5 la más anisótropa de todas (>13%) y la BSM-1, la menos anisótropa (2.3%). Al mismo tiempo es la BSM-5, la que muestra una cierta dirección preferente de anisotropía al ser mayor la diferencia entre dM y dm (dirección/es de debilidad al presentar V_p bajas). El resto de las muestras presentan una anisotropía relativamente homogénea en las 3 direcciones, sin dirección preferente, a excepción de la muestra BSM-11. En el gráfico (Fig. 21), se observa cómo todas las probetas de BSM-1 y la mitad de BSM-8, presentan valores de anisotropía próximos a 0, marcando una anisotropía baja y homogénea en todas las direcciones espaciales.

Por el contrario, las otras dos muestras (BSM-5 y 11) presentan una gran dispersión en los valores de sus probetas, principalmente las probetas de BSM-5, donde la mayoría tienen una ($dM \gg dm$) o dos ($dm > dM$) direcciones preferentes de anisotropía. Las cuatro probetas de la muestra BSM-11 son muy heterogéneas en cuanto a su grado de anisotropía y V_p (Tabla 3; Fig. 21)

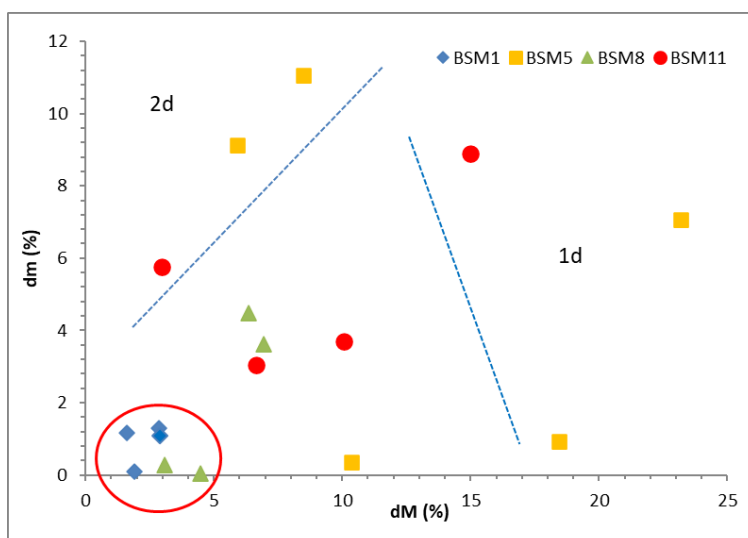


Figura 21. Relación entre anisotropía total (dM) y anisotropía relativa (dm).

3.2.2.2. Propiedades estructurales

3.2.2.2.1. Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)

Los resultados obtenidos en el ensayo de PIM vienen recogidos en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros resultantes del ensayo de porosimetría de mercurio.

PARÁMETROS	MUESTRAS			
	BSM-1	BSM-5	BSM-8	BSM-11
Densidad real (kg/m^3)	2289	2296	2304	2311
Densidad aparente (kg/m^3)	2248	2173	2204	2181
Porosidad (%)	1,80	5,38	4,36	5,60
Microporosidad (<5 μm)	80,5%	93,70%	93,70%	95,70%
Macroporosidad (>5 μm)	19,50%	6,30%	6,30%	4,30%
Distribución de la porosidad (μm)	< 0,01	1,71%	0,00%	0,00%
	0,01 – 0,1	42,04%	0,57%	5,32%
	0,1 – 1	27,65%	85,16%	87,71%
	1 – 10	11,52%	8,74%	1,02%
	10 – 100	6,17%	2,14%	2,11%
	> 100	10,91%	3,40%	3,84%
Superficie poro (m^2/g)	0,559	0,234	0,321	3,730
Diámetro medio poro (μm)	0,057	0,423	0,246	0,028
Mediana diámetro poro (μm)	0,166	0,468	0,303	0,663
Permeabilidad (mD)	458,70	0,05	0,02	0,18
Tortuosidad	2,55	247,92	389,90	112,30

La densidad real de las muestras ensayadas se sitúa en torno a 2300 kg/m^3 . Este valor de densidad real es similar al de densidad aparente para la muestra BSM-1, desmarcándose para las muestras BSM-5, BSM-8 y, principalmente, BSM-11, aunque con valores todos ellos por encima de los 2000 kg/m^3 . La baja diferencia entre ambos tipos de densidad refleja la escasa porosidad de estas muestras (<6%). La muestra menos porosa es la BSM-1 (1,8%), seguida, en orden creciente, de las muestras BSM-8 (4,36%), BSM-5 (5,38%) y BSM-11 (5,6%). El tipo de porosidad dominante para todas las muestras es la microporosidad (<5 μm de diámetro de poro), con porcentajes superiores al 93%. En el caso de la muestra BSM-1, se observa un valor anómalo de macroporosidad (>19%) debido, posiblemente, a la fracturación de la probeta por la presión ejercida durante el ensayo dada su escasa porosidad. A pesar de esto, se puede estimar que la microporosidad de esta muestra es similar al resto.

La distribución de los tamaños de poro muestra una gran heterogeneidad dentro de los rangos de microporosidad (Tabla 4, Fig. 22). Para la muestra BSM-1, esta distribución es polimodal y amplia, destacando los intervalos de 0,01-0,1 μm y de 0,1-1 μm , con aproximadamente el 70% del total de la porosidad presente. Para la muestra BSM-5 la distribución es bimodal, destacando el intervalo de 0,1-1 μm , donde se concentra una gran parte de la porosidad (85,2%). Este intervalo también destaca para la muestra BSM-8 (>87%), donde la distribución es monomodal. Por último, en la muestra BSM-11, con una distribución polimodal de la porosimetría, destacan los intervalos de 0,1-1 μm y 1-5 μm , con casi el 67% del total de la porosidad existente (Tabla 4; Fig. 22).

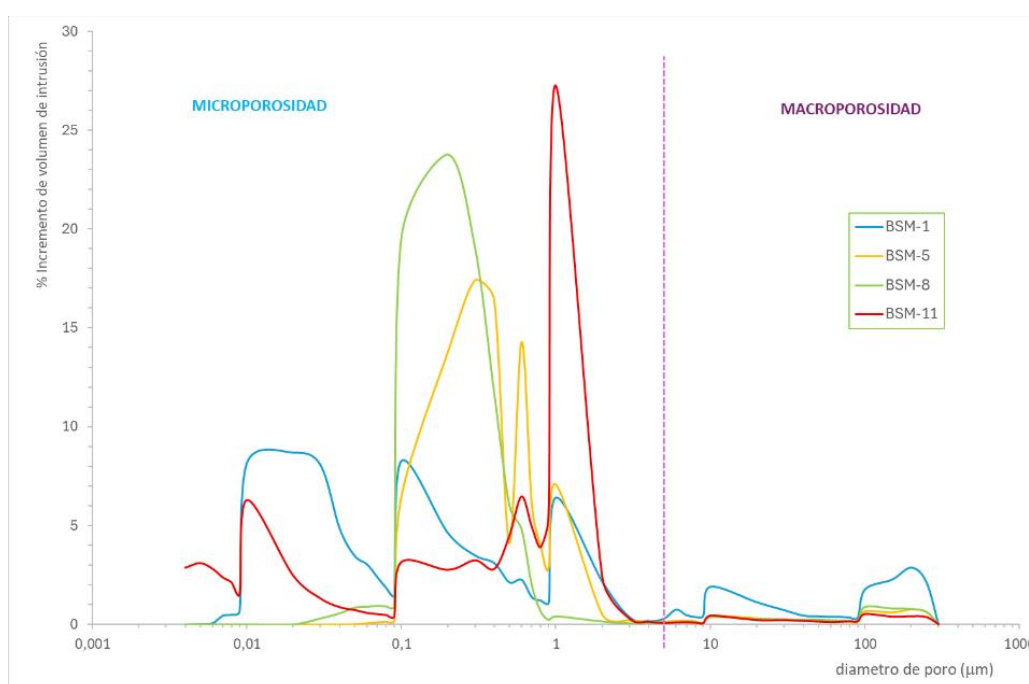


Figura 22. Distribución de los tamaños de poro para cada una de las muestras en relación con el volumen de intrusión de mercurio.

Es de destacar, que las muestras BSM-1 y, especialmente, la BSM-11, presentan porcentajes significativos de microporosidad por debajo de los 10 nm de diámetro de poro. En el caso de la BSM-11 podría estar por encima del 16%, debido a que el equipo de medida utilizado no alcanza a medir rangos menores a 5 nm (Fig. 22).

En relación con el tamaño y forma de los poros de estas muestras, destacan las muestras BSM-1 y, sobre todo, la BSM-11, con diámetros medios de poro de entre 60 y 25 nm, respectivamente, y morfologías de poro, sinuosas e irregulares al relacionarse estos pequeños diámetros de poro con superficies específicas elevadas (0,56 y 3,7 m²/g, respectivamente; Tabla 4).

Las muestras BSM-5 y BSM-8 presentan valores de diámetro de poro mayores (423 y 246 nm), y relacionándolos con sus superficies específicas, más bajas (0,234 y 0,321 m²/g, respectivamente), reflejan morfologías muy regulares y hasta concéntricas.

Las conexiones capilares entre los poros vienen reflejadas por el parámetro de la tortuosidad, que si es o se acerca a 1, refleja conexiones rectas y cuanto más se aleja de la unidad más sinuoso es ese capilar, dificultando el paso de los fluidos (permeabilidad baja). En general, las muestras presentan valores de tortuosidad alejados de 1 (>100), lo que se traduce en una baja permeabilidad al Hg (<0,2 mD). La muestra BSM-11, se diferencia ligeramente de las restantes (BSM-5 y 8), porque es la que menos tortuosidad tiene (112), y por consiguiente la que es menos impermeable de las tres. La excepción, vuelve a marcarla la muestra BSM-1, que al generar macroporosidad artificial durante el ensayo, sus conexiones son rectas los que facilita su permeabilidad (Tabla 4).

3.2.2.3. Propiedades hídricas

3.2.2.3.1. Saturación al agua

Los resultados del ensayo de saturación al agua se recogen en la tabla 5. Como en el ensayo anterior, las cuatro muestras presentan densidades superiores a 2000 kg/m³, siendo similares entre sí las densidades reales y aparentes, lo cual se traduce en una baja porosidad total (<9%), y siendo otra vez la muestra BSM-11 la más porosa (8,1%) y la BSM-1 la menos porosa (1,1%).

Dentro de esta porosidad total, domina ampliamente la porosidad abierta o efectiva (>80% de la porosidad total), que permite la circulación libre del agua en su interior. Sin embargo, hay que destacar que la porosidad atrapada tiene importancia en estas muestras (BSM-1, BSM-5, BSM-8 y BSM-11) al suponer el 17,93%; 8,14%; 11,77% y 2,27%, respectivamente, de la porosidad total obtenida para cada una de ellas. Por tanto, son las muestras BSM-1 y la BSM-8, las que presentan una mayor porosidad

atrapada, partiendo de los valores de porosidad total más bajos de todos (1-2%). Por el contrario, la BSM-11, que es la muestra más porosa de todas (>8%), es la que menos porosidad atrapada tiene (2.2%).

Al tener estas dos muestras (BSM-1 y 11), unas porosidades totales tan bajas, sus índices de compacidad o masa son los más altos de todas (>0,98/1). Las bajas porosidades de estos materiales, se traduce en una baja capacidad de absorción de agua (saturación). Es la muestra BSM-11, con una porosidad >8%, la que más agua absorbe (<4%), siendo en cualquier caso un valor muy bajo.

Tabla 5. Valores de los parámetros del ensayo de saturación al agua.

Muestra	BSM-1	BSM-5	BSM-8	BSM-11
Densidad real (kg/m ³)	2289 ± 4,1	2242 ± 5,9	2259 ± 6,2	2296 ± 4,5
Densidad aparente (kg/m ³)	2269 ± 10,0	2193 ± 18,5	2226 ± 9,1	2124 ± 35,2
Porosidad total (%)	1,11 ± 0,3	2,40 ± 0,6	1,67 ± 0,2	8,11 ± 1,4
Porosidad abierta (%)	0,91 ± 0,3	2,21 ± 0,6	1,48 ± 0,2	7,93 ± 1,4
Porosidad atrapada (%)	0,198 ± 0,01	0,196 ± 0,001	0,197 ± 0,0	0,184 ± 0,003
Índice de compacidad	0,989 ± 0,003	0,976 ± 0,01	0,983 ± 0,002	0,919 ± 0,02
Saturación (%)	0,40 ± 0,1	1,01 ± 0,3	0,66 ± 0,07	3,76 ± 0,7

3.2.2.3.2. Absorción-desorción de agua

Las curvas cinéticas de absorción y desorción de agua a presión atmosférica (Fig. 23) muestran el comportamiento de las distintas probetas de cada muestra estudiada al ganar y perder agua.

La capacidad de absorción de agua coincide con los valores de saturación del ensayo anterior. La muestra BSM-11 sigue siendo la que más agua absorbe (hasta el 4,5%), seguida a distancia por las BSM-5, BSM-8 y BSM-1, presentando esta última una absorción muy baja, inferior al 0.5%. La absorción de agua es rápida y alcanza su máxima capacidad de absorción en los primeros 9'30" del ensayo para casi todas las muestras (Fig. 23). Al cabo de este tiempo, las probetas de BSM-11 absorben entre el 55% y el 95% de toda el agua que pueden absorber (2,9-4,5%). Porcentajes muy parecidos tienen las probetas de BSM-1, que absorben entre el 68% y el 85% de un total de agua absorbida del 0,3 al 0,6% y las probetas de BSM-5, que absorben entre el 66% y el 100% del 0,6-1,2% de absorción máxima de agua. Por el contrario, las probetas de la muestra BSM-8 absorben en estos primeros 9'30" menos de la mitad (40-48%) de su capacidad de absorción (0,6-0,8%). La capacidad de absorción es bastante variable y heterogénea en las probetas de las muestras que más absorben, BSM-11 y BSM-5, y

más homogénea en las de las muestras que menos absorben, BSM-8 y BSM-1 (Fig. 23).

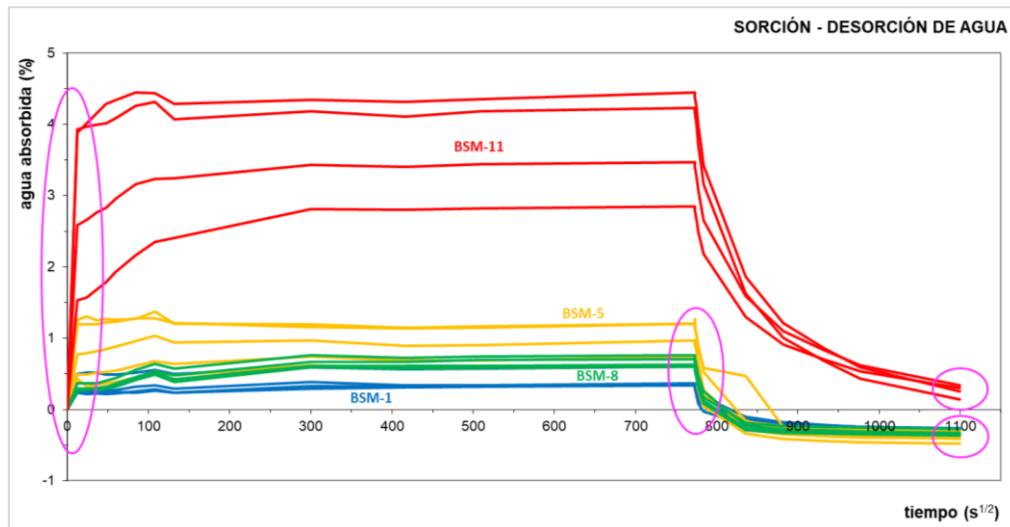


Figura 23. Curvas cinéticas de absorción-desorción.

Tras la rápida absorción inicial, se produce una absorción más lenta hasta llegar a la fase de estabilización y completar su capacidad máxima de absorción de agua.

Al iniciar el proceso de desorción por evaporación del agua absorbida, en los primeros instantes, la pérdida es rápida y en el caso de las probetas de las muestras que menos capacidad de absorción tienen (BSM-1, BSM-5 y BSM-8), pierden completamente toda el agua absorbida en las primeras 5 horas de ensayo (Fig. 23). La diferencia la marca la muestra BSM-11, cuyas probetas se comportan igual entre sí pero no a las restantes muestras. Todas ellas pierden el agua absorbida de forma lenta y progresiva, pero sin llegar a perderla completamente al final del ensayo (0,15-0,3%), siete días después de haberlo empezado. En las muestras BSM-1, BSM-5 y BSM-8 se observan valores negativos de agua absorbida, relacionados con la pérdida de masa durante su manipulación y la pérdida de distintos tipos de agua asociados al yeso (estructural y/o intersticial).

En la tabla 6 se recogen los valores medios de los coeficientes de absorción a las 48 horas para cada muestra. El menor coeficiente de absorción se observa para las probetas BSM-1, y el mayor para las probetas BSM-11, acorde con los otros ensayos y lo mencionado anteriormente.

Tabla 6. Valores del coeficiente de absorción a las 48 horas para cada probeta.

MUESTRA	Coefficiente de absorción (%)
BSM-1	0,38 ± 0,1
BSM-5	0,89 ± 0,3
BSM-8	0,64 ± 0,1
BSM-11	3,66 ± 0,7

3.2.2.3.3. Permeabilidad al vapor de agua

El ensayo de permeabilidad al vapor de agua ha permitido calcular el caudal del vapor de agua a través de la probeta (G), la velocidad de transmisión del vapor de agua (g) y la permeabilidad al vapor de agua con respecto a la presión parcial del vapor (δp). Estos resultados se presentan en la tabla 7. En todas las muestras estudiadas, los valores obtenidos son muy bajos, aunque existen diferencias marcadas entre la muestra BSM-1, con los valores más bajos de caudal de vapor, velocidad de transmisión y permeabilidad, y la BSM-11, con los valores más altos en los tres parámetros medidos. Entre ambas muestras, están la BSM-8 seguida de la BSM-5 (Tabla 7). Los valores de permeabilidad para cada muestra están acordes con los valores de absorción de agua de ensayos anteriores.

Tabla 7. Valores medios de caudal de vapor de agua (G), velocidad de transmisión de vapor de agua (g) y permeabilidad al vapor de agua (δp) de las muestras estudiadas.

Muestras	G (kg/s)	G (kg/s·m ²)	δp (kg/m·s·Pa)
BSM-1	$7,19 \cdot 10^{-10} \pm 9,1 \cdot 10^{-11}$	$4,52 \cdot 10^{-7} \pm 5,7 \cdot 10^{-8}$	$3,28 \cdot 10^{-10} \pm 7,8 \cdot 10^{-11}$
BSM-5	$1,63 \cdot 10^{-9} \pm 1,4 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-6} \pm 6,0 \cdot 10^{-10}$	$7,83 \cdot 10^{-10} \pm 5,6 \cdot 10^{-8}$
BSM-8	$1,19 \cdot 10^{-9} \pm 5,1 \cdot 10^{-11}$	$7,51 \cdot 10^{-7} \pm 3,2 \cdot 10^{-8}$	$5,87 \cdot 10^{-10} \pm 9,2 \cdot 10^{-12}$
BSM-11	$3,55 \cdot 10^{-9} \pm 1,7 \cdot 10^{-9}$	$2,23 \cdot 10^{-6} \pm 1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-9} \pm 6,7 \cdot 10^{-10}$

3.2.2.3.4. Permeabilidad al aire

Los resultados del ensayo de permeabilidad al aire vienen recogidos en la tabla 8. Dado que las probetas empleadas presentan zonas con fisuras de distinto tamaño y espesor, se midió la permeabilidad al aire teniendo en cuenta tanto las zonas masivas como las zonas de venas y fractura de cada muestra. Todas las muestras tienen en común que presentan permeabilidad baja en las zonas masivas, dándose los mayores valores de este parámetro, en general, en zonas de fractura y venas. Destaca la muestra BSM-8 con los valores más bajos de permeabilidad al aire (<2 mD; zonas impermeables) al ser una roca homogénea, masiva y con pocas fisuras. Las zonas masivas de los nódulos de las restantes muestras presentan valores de semi-permeabilidad que oscilan entre los 11 (BSM-1) y los 26-89 mD (BSM-5 y BSM-11) (Tabla 8; Fig 24).

Tabla 8. Valores medios de permeabilidad al aire en las muestras estudiadas.

Permeabilidad (mD)	BSM-1	BSM-5	BSM-8	BSM-11
Zona masiva	11	27-89	<2	26
Zona fisuras	582-705	370-467	<2	343
		19137		<2

Las muestras BSM-1 y BSM-5 tienen una fisuración importante y ramificada que da lugar a valores medios-altos de permeabilidad (370-705 mD; zonas semi-permeables). En el caso de la muestra BSM-5, los valores más altos (19137 mD, zona muy permeable) se han obtenido en grietas más gruesas. La muestra BSM-11 presenta una escasa

fisuración ramificada. Da lugar a valores de permeabilidad media (343 mD, zona semi-permeable) en fracturas abiertas, mientras que en aquellas que están cementadas por calcita los valores son muy bajos (<2 mD, zona impermeable).

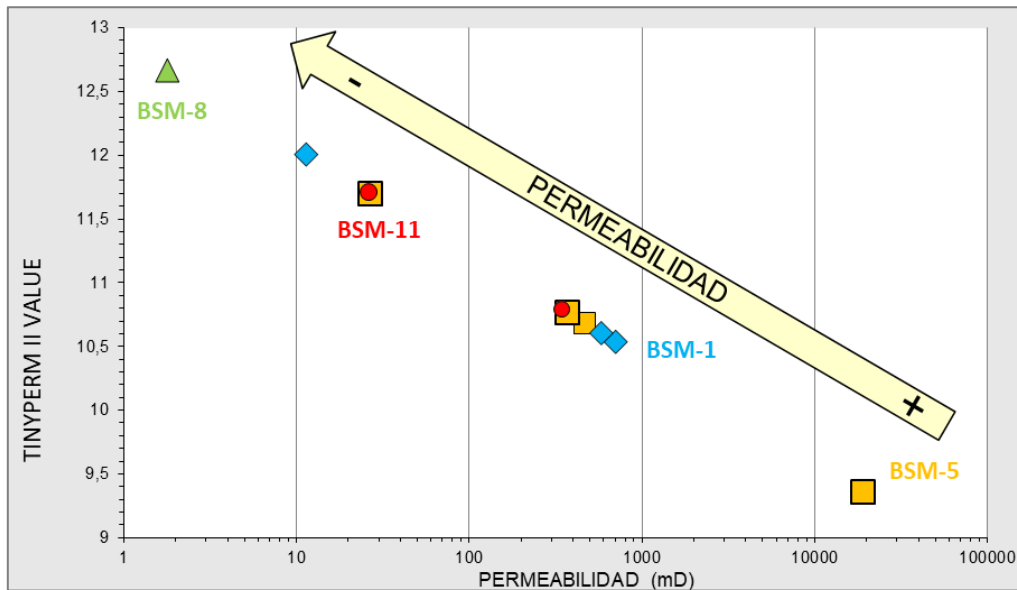


Figura 24. Gráfica de permeabilidad frente al valor medio de las medidas tomadas con el permeámetro.

3.2.2.4. Propiedades mecánicas

3.2.2.4.1. Resistencia al rebote. Dureza superficial de Schmidt

Los valores de dureza Schmidt obtenidos en el ensayo de resistencia superficial al rebote se presentan en la tabla 9. Dichos valores se sitúan en el rango entre 21 y 35 R, correspondiéndose con rocas de dureza media, según los valores aportados por la marca Proceq del martillo de Schmidt del tipo L.

El valor más alto de dureza Schmidt se observa en la muestra BSM-8 (>36R), que se corresponde con valores de dureza superficial media-alta. En orden decreciente, esta muestra está seguida por las muestras de dureza media BSM-1 (<34R), BSM- 5 (>26R) y BSM-11 (>23R). Por tanto, las muestras con mayor resistencia superficial al rebote son las muestras BSM-8 y BSM-1, y aquellas con menor resistencia son las BSM-5 y BSM-11.

Tabla 9. Resultados de la dureza superficial de Schmidt

Muestra	Dureza Schmidt media (R)
BSM-1	33,9 ± 6,21
BSM-5	26,5 ± 3,36
BSM-8	36,4 ± 4,73
BSM-11	23,1 ± 5,58

4. DISCUSIÓN

Mediante el estudio de la estratigrafía de la Formación Villalba de la Sierra se analizó la sucesión estratigráfica de la misma en el afloramiento «Buendía Sol-Marina», que consta de tres tramos generales definidos en base a la litología dominante, uno inferior, uno medio y uno superior. Basándose en el análisis de la distribución de litologías, el tramo general inferior se compone de yeso alabastrino de textura nodular y color blanco con intercalaciones de margas verdes (Fig. 14A). Las *facies* de yeso se asocian con ambientes de *sabkha*. Son alabastrinos y presentan textura nodular, de forma que se tratarían de yesos secundarios diagenéticos (Fig. 25), por lo que las texturas propias del ambiente deposicional habrían quedado destruidas por los procesos diagenéticos. Los tramos margosos se han identificado con ambientes tranquilos y condiciones reductoras por el color verde y, por tanto, con zonas más distales y de mayor profundidad que las *facies* de yeso. Las secuencias elementales comienzan con yesos con un contacto neto sobre las margas. Los yesos pasan gradualmente hacia techo a margas. Tras un nuevo contacto neto, la secuencia se repite. La alternancia de yesos y margas predominante en el tramo inferior de la columna sintética respondería a una fluctuación en el nivel de base producida a pulsos. En momentos de nivel de base bajo, habiendo una menor cantidad de lámina de agua, que además podría permitir una mayor salinidad, se facilitaría la precipitación de yeso. Un aumento del nivel de base crearía un espacio de acomodación que se iría rellenando progresivamente con *facies* margosas más distales hasta que las condiciones vuelven a ser favorables para la precipitación de yeso.

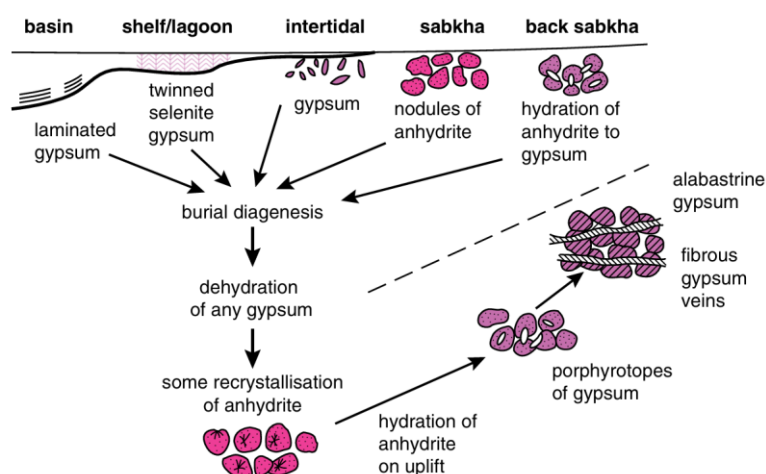


Figura 25. Ciclo sedimentario y diagenético del yeso y la anhidrita (Tucker y Jones, 2023).

El tramo general medio consta de yesos lenticulares verdes con algunas intercalaciones de yeso alabastrino de textura nodular y color blanco y niveles de carbonatos micríticos friables (Fig. 14B). Por su textura, los yesos lenticulares verdes se asocian con una zona intermareal somera, (Fig. 25). La presencia de carbonatos señala *facies* más continentales, lo que se apoya en la presencia de carofitas halladas en cuerpos

carbonáticos en el afloramiento de Poyos (Sacedón), equivalentes a los cuerpos carbonáticos del afloramiento «Buendía Sol-Marina». Estas *facies* carbonáticas se corresponderían con lagunas de escasa profundidad (los cuerpos no superan los 0,3 metros de potencia) que estarían asociadas lateralmente a las *facies* evaporíticas y sus distintas texturas en función de la potencia de la lámina de agua. El tramo general superior se compone de lutitas rojas (coloraciones típicas de condiciones oxidantes) con texturas de marmorización y huellas de raíces y, esporádicamente, fragmentos de cáscaras de huevos de dinosaurio (organismos continentales; Fig. 14C) que evidencian, en su conjunto, condiciones continentales.

En definitiva, de acuerdo con lo anteriormente expuesto, el tramo inferior de la columna sintética señala una sedimentación en ambiente subacuático somero con fluctuación del nivel de base que, progresivamente, iría descendiendo de acuerdo con la aparición de *facies* carbonáticas, que evidencian ambientes más continentales, hasta llegar al tramo siliciclástico superior, netamente continental. La tendencia general de la sucesión estudiada es progradante, observándose cómo las *facies* proximales y continentales se van depositando sobre las *facies* marinas y más distales, coincidiendo así con el evento regresivo finicretácico (Martín-Chivelet *et al.*, 2019).

Los dos primeros tramos generales componen un conjunto evaporítico-margoso con un espesor total medido de 101 metros y cuyo potencial como roca sello es el objeto de estudio de este trabajo. El espesor, no obstante, es variable a lo largo de la Depresión Intermedia, con hasta 500 metros de potencia en el este de la cuenca sedimentaria (La Frontera, Cuenca), aunque esta cifra no correspondería en su totalidad a los tramos inferior y medio evaporíticos, sino que también incluiría el tramo superior siliciclástico. Las muestras estudiadas mediante petrografía y/o petrofísica que proceden del tramo general inferior son la BSM-1, BSM-5 y BSM-8. Del tramo general medio se han estudiado las muestras BSM-9, BSM-11 y BSM-12. Teniendo en cuenta los datos de la columna de detalle a escala 1:100 (Fig. 11 y 12), se observa que aquellos tramos que presentan mayores espesores son los que implican a las muestras BSM-1 (tramo 1), con al menos 14 metros de espesor, y BSM-8 (tramo 8), con 8,4 metros de espesor.

En cuanto a la extensión lateral de la Formación, al estar asociada a la Depresión Intermedia, consta de una distribución geográfica extensa. Esto se ha corroborado dado que, además del afloramiento de «Buendía Sol-Marina», en el borde oeste de la cuenca, también se vio aflorar la Formación en el borde este, cerca del municipio de La Frontera (Cuenca). Dicha extensión también la indican las distintas cartografías realizadas en esta zona (Fig. 4; v.g. Sanguino *et al.*, 2025; cartografías MAGNA). Tanto su espesor

como su distribución geográfica son altas, por lo que, en cuanto a estos parámetros, la unidad evaporítica podría resultar favorable como sello.

De las seis muestras estudiadas mediante petrografía, una es un carbonato (BSM-9) y cinco corresponden a yeso alabastrino de textura nodular (BSM-1, BSM-5, BSM-8, BSM-11 y BSM-12), habitualmente con fracturas rellenas por cemento de yeso fibroso. Por lo general, todas las muestras de yeso tienen en común dos tipos de porosidades. Por un lado, presentan macroporosidad de fractura, asociada a las fisuras rellenas de yeso fibroso y, por otro, tienen microporosidad ramificada dispersa. Las texturas de las muestras analizadas son propias de telodiagénesis, indicando procesos de transformación de anhidrita a yeso secundario. La roca previa al yeso que actualmente se observa habría sido una anhidrita posiblemente primaria, considerando que varios autores coinciden en establecer el ambiente sedimentario de estas litologías evaporíticas en una *sabkha* (v.g. Hernaiz *et al.*, 1998). Posteriormente, por levantamiento tectónico o procesos erosivos, la unidad de anhidrita en el subsuelo habría vuelto a condiciones superficiales o de muy poca profundidad, hidratándose en contacto con aguas superficiales y produciéndose la transformación a yeso, que en este caso sería un yeso secundario diagenético, adquiriendo, de esta forma, las texturas alabastrina y porfiroblástica (Fig. 25). No obstante, a pesar de la recristalización de anhidrita a yeso, la textura original nodular de la anhidrita de *sabkha* también tiende a preservarse (Tucker y Jones, 2023). Puesto que el yeso es la fase hidratada, ocupa un mayor volumen respecto a la fase anhidra, la anhidrita, de forma que en la transformación de anhidrita a yeso se genera un aumento de volumen y, con ello, una sobrepresión a la que se asocia la generación de fisuras y fracturas hidráulicas. Posteriormente, por disolución de yesos superficiales o por reemplazamiento de la anhidrita a yeso, se generan fluidos salinos que circulan por las fisuras y fracturas, precipitando en ellas en forma de cementos de yeso fibroso, de origen primario y diagenético, que coexiste con las texturas alabastrina y porfiroblástica. Por tanto, todas las litologías yesíferas que se observan en el afloramiento tienen origen diagenético, formándose por este motivo tanto el yeso alabastrino nodular como las bandas de yeso fibroso, a las que se asocia la porosidad de fractura descrita mediante petrografía. Por otro lado, la microporosidad ramificada, frecuentemente asociada a residuos insolubles, se relaciona con porosidad de disolución. Esta podría tener su origen en la meteorización a la que está expuesta la roca en el afloramiento, considerando que las muestras son superficiales y que, además, están sometidas a la influencia del nivel de base del embalse de Buendía, que oscila con asiduidad.

Tras la realización de los distintos ensayos petrofísicos, se analizaron las propiedades dinámicas, estructurales, hídricas y mecánicas de cada muestra, cuyo conocimiento permite discernir la idoneidad de estos yesos como roca sello. Para ello, el objetivo principal de la caracterización petrofísica fue el de estudiar la porosidad y permeabilidad de las muestras junto con el resto de los parámetros. En general, las cuatro muestras ensayadas presentan bajos valores de porosidad y permeabilidad, habiendo mayor homogeneidad entre los valores de porosidad que de permeabilidad. A pesar de esto, es posible distinguir dos grupos, no sólo en función de los resultados de porosidad y permeabilidad, sino también de los otros parámetros estudiados, con los que los dos primeros están estrechamente relacionados. Por un lado, se han distinguido las muestras BSM-1 y BSM-8 y, por otro, las muestras BSM-5 y BSM-11.

El primer grupo lo conforman las muestras BSM-1 y BSM-8, ambas muestras compactas de yeso nodular de color blanco con fracturas rellenas de yeso fibroso. El estudio de las propiedades dinámicas de estas muestras indica que son las que presentan mayores velocidades de propagación de ondas P (V_p : 4226 y 3913 m/s) y menor anisotropía (dM : 2.3 y 5,2%), luego son muestras muy masivas, de gran compacidad y menor porosidad. Las dos muestras son muy poco anisótropas en sus tres direcciones espaciales lo que denota una alta homogeneidad textural, sin presencia de direcciones preferentes de debilidad que puedan actuar como planos de escape de fluidos o gases.

Dentro de la baja porosidad que caracteriza a todas las muestras ensayadas, las BSM-1 y BSM-8 destacan como las menos porosas, especialmente la BSM-1, lo que demuestran, en conformidad con los ensayos de ultrasonidos y anisotropía, los de porosimetría por intrusión de Hg (PIM; 1,8%) y de saturación al agua (1,1%) a través de los porcentajes de porosidad y de la menor relación densidad real/aparente para ambas muestras ($2300/2200 \text{ kg/m}^3$). Además, de acuerdo con el ensayo de PIM ambas muestras presentan el mayor índice de compacidad o masa (0,99/1). La distribución de los tamaños de poro muestra un predominio de la microporosidad ($<5 \mu\text{m}$; $>80\%$) frente a la macroporosidad. En este caso, es la muestra BSM-8 la que contiene un mayor porcentaje de microporosidad ($>93\%$), frente al 80% de la muestra BSM-1, aunque esto es debido a la fracturación de la probeta durante el ensayo, generando porosidad artificial que ha producido un incremento de la macroporosidad. Esta última muestra es la que presenta mayor porosidad para rangos menores de tamaño de poro ($<10 \text{ nm}$; $>16\%$), por lo que es posible que su porcentaje de microporosidad total fuese incluso superior al de la muestra BSM-8. De la escasa porosidad que presentan, las muestras BSM-1 y BSM-8 son las que tienen más porosidad atrapada ($>17\%$ y $>11\%$, respectivamente, del total de su porosidad). Asimismo, son las muestras con menor

porcentaje de saturación en agua (0,4% y 0,66%, respectivamente), cuyos valores coinciden con los resultados del ensayo de absorción-desorción a presión atmosférica. Dado que son las muestras con menor porcentaje de porosidad abierta (0,9 y 1,5%), son las que presentan una absorción más rápida, así como una menor capacidad de absorción, teniendo los menores coeficientes de absorción (0,38% para BSM-1 y 0,64% para BSM-8). Estos valores son equivalentes al porcentaje de saturación obtenido para cada muestra en el ensayo de saturación al agua. La desorción de estas dos muestras sucede de forma rápida y en las primeras 5 horas de ensayo, dando posteriormente valores negativos de porcentaje de agua absorbida que se han relacionado con la posible pérdida por evaporación de las aguas intersticial y estructural. La forma de poro es la relación entre el diámetro medio de poro y la superficie específica del poro. En el caso de la muestra BSM-1, al ser menor el diámetro medio de poro respecto de la superficie de poro, se sugiere que la forma de este es irregular, ramificada o muy sinuosa. La muestra BSM-8 presenta una relación entre la superficie de poro y el diámetro medio del poro menor, por lo que indica que la forma de sus poros es regular, recta o concéntrica. Por otro lado, la muestra BSM-8 es la que presenta mayor tortuosidad (morfología de los capilares entre poros), lo que dificulta el paso de gases y fluidos de Hg, siendo así menor su permeabilidad. Probablemente, la permeabilidad de la muestra BSM-1 sea equivalente a la BSM-8, e incluso mayor, pero los resultados de este ensayo no permiten comprobarlo al haberse fracturado la probeta, obteniéndose valores muy bajos de tortuosidad y altos de permeabilidad. A pesar de ello, los valores obtenidos del ensayo de permeabilidad al vapor de agua confirman la propuesta anterior, ya que señala las muestras BSM-1 y BSM-8 como las menos permeables ($3,28 \cdot 10^{-10}$ y $5,87 \cdot 10^{-10}$ kg/m·s·Pa, respectivamente), en especial la BSM-1. El ensayo de permeabilidad al aire permitió diferenciar la permeabilidad en zonas masivas o nodulares y zonas fracturadas o con venas. En las primeras, para la muestra BSM-1, se obtuvieron valores bajos (11 mD), aumentando hasta los 582-705 mD en zonas fisuradas. Por su parte, los valores de permeabilidad mediante este ensayo para la muestra BSM-8 son ínfimos tanto para zonas masivas como de fracturas, lo que denota su gran homogeneidad textural. En cuanto al ensayo de resistencia superficial al rebote, son las muestras de mayor dureza superficial, con valores prácticamente similares entre sí, de 34R para la BSM-1 y >36R para la BSM-8.

El segundo grupo de muestras diferenciado a partir de sus características petrofísicas es el compuesto por las muestras BSM-5 y BSM-11. La muestra BSM-5 es un yeso alabastrino nodular anaranjado y la muestra BSM-11 es un yeso lenticular y nodular con una matriz microcristalina verde. Ambas están muy fisuradas y fracturadas,

especialmente la muestra BSM-5. A diferencia de esta, la muestra BSM-11 presenta gran parte de sus fisuras y fracturas cementadas por yeso. En lo relativo a las propiedades dinámicas, las muestras BSM-5 y BSM-11 son las de menor velocidad de propagación de ondas P (V_p : >3700 y >2800 m/s, respectivamente) y las de mayor anisotropía (dM : 13,3% y 8,7%, respectivamente). Esto las señala como las más porosas y estructuralmente más heterogéneas, con entre 1 y 2 direcciones de anisotropía (direcciones de debilidad estructural y/o textural), siendo la muestra BSM-5 la más heterogénea. Estas direcciones de debilidad en las muestras estarían asociadas a la mayor fisuración que presentan, diferenciándose por ello de las muestras BSM-1 y BSM-8, con menor fisuración y más homogéneas. La mayor porosidad de las muestras BSM-5 y BSM-11 indicada por el ensayo anterior se corrobora con los porcentajes de porosidad aportados tanto por el ensayo de PIM (5,3% y 5,6%, respectivamente) como de saturación al agua (2,4% y 8,1%, respectivamente). Además, como consecuencia del mayor porcentaje de porosidad, la diferencia entre la densidad real y densidad aparente de ambas muestras es mayor (>200 kg/m³) que en el caso de las BSM-1 y BSM-8. Coincidiendo con estos datos, los índices de compacidad de las muestras BSM-5 y BSM-11 son los menores (0,98 y 0,92/1, respectivamente). Como con las dos muestras anteriores, la porosidad mayoritaria se sitúa por debajo del límite de 5 μ m (microporosidad), siendo ligeramente mayor este porcentaje para la muestra BSM-11 (96% frente al 94% de la BSM-5). La distribución del tamaño de poro para esta muestra es bastante amplia, destacando un porcentaje relativamente importante para poros de menos de 10 nm ($>16\%$). Por el contrario, las muestras BSM-5 y, sobre todo, BSM-11 son las que presentan mayores porcentajes de porosidad abierta, con porcentajes de porosidad atrapada más bajos (8,1% y 2,3%, respectivamente) que en el grupo de muestras anterior. Las muestras BSM-5 y BSM-11 se caracterizan, asimismo, por tener un porcentaje de saturación en agua algo más alto (1% y 3,7%, respectivamente), lo que se refleja en las curvas cinéticas de absorción con una mayor cantidad de agua absorbida, especialmente en el caso de la BSM-11. No obstante, su capacidad de absorción es bastante heterogénea, y de ahí la dispersión de datos que presentan estas dos muestras en estos ensayos. Por este mismo motivo, estas muestras presentan también los coeficientes de absorción a las 48 horas más altos (0,9% y 3,7%), cuyos valores coinciden con los valores de saturación. No obstante, el coeficiente de absorción de la muestra BSM-5 se acerca más a los de las muestras BSM-8 y BSM-1, por lo que su desorción es similar a la de estas dos muestras, siendo rápida y en las primeras 5 horas del ensayo, con valores negativos de agua absorbida que, en este caso, se han relacionado sobre todo con la pérdida durante la manipulación de material microcristalino y margoso que rellenan las fisuras de las probetas. La muestra BSM-11,

en cambio, no llega a perder toda el agua absorbida en el tiempo del ensayo. Se trata de la muestra con más capacidad de absorción, mayor porosidad total y abierta, así como la que presenta mayor porosidad en los intervalos de tamaño de poro más pequeños. El hecho de que esta muestra precise de más tiempo para la desorción de agua puede deberse a su contenido en paligorskita (Tabla 2), que al ser una arcilla expansiva dificulta la pérdida de la posible agua adsorbida. La forma de los poros se estimó como más regular para la muestra BSM-5, tratándose de poros concéntricos o rectos por su baja superficie específica y gran radio. Para la muestra BSM-11 se estimó que son irregulares, ramificados y/o muy sinuosos, puesto que su superficie específica es mucho mayor. En cuanto a la forma de los capilares que unen estos poros (tortuosidad), las muestras BSM-5 y BSM-11 son las que presentan valores más bajos, lo que refleja conexiones menos sinuosas que en las muestras anteriores y una permeabilidad ligeramente mayor (0,05 y 0,18 mD, respectivamente), sobre todo en la muestra BSM-11. Sin embargo, en general, las cuatro muestras pueden considerarse completamente impermeables al Hg. El ensayo de permeabilidad al vapor de agua también avala que ambas muestras son ligeramente más permeables, sobre todo la BSM-11, que duplica su permeabilidad ($1,63 \cdot 10^{-9}$ kg/m·s·Pa) frente a BSM-5 ($7,83 \cdot 10^{-10}$ kg/m·s·Pa), presentando también un mayor caudal de vapor de agua ($1,63 \cdot 10^{-9}$ y $3,55 \cdot 10^{-9}$, respectivamente) y velocidad de transmisión de vapor de agua ($7,83 \cdot 10^{-10}$ y $1,63 \cdot 10^{-9}$). En cuanto al ensayo de permeabilidad al aire, igualmente indica que son más permeables en la zona masiva que las dos anteriores, con valores de 26-89 mD. La permeabilidad en las fisuras es más variable, siendo mayor en aquellas fisuras abiertas y de mayor tamaño (>19000 mD). Por ejemplo, la muestra BSM-5 presenta fracturas rellenas de material microcristalino que han proporcionado las permeabilidades más altas de entre todas las muestras, si bien hay otras fracturas que deben estar más cementadas por yeso al aportar valores de permeabilidad algo menores que las fracturas de la muestra la BSM-1, que en principio es menos permeable. Por otro lado, cabe destacar que, como el aire tiene un comportamiento distinto del Hg, mientras que la mayoría de las muestras son prácticamente impermeables al Hg, tienen en comparación con este, valores notablemente altos de permeabilidad al aire, exceptuando el caso de la muestra BSM-8, que se mantiene impermeable al aire, como se comenta en las características del grupo anterior. En lo referente a las propiedades mecánicas, estas muestras presentan los menores valores de dureza Schmidt (26,5R para BSM-5 y 23,1R para BSM-11), luego son las de menor resistencia al rebote, sobre todo la BSM-11.

Poniendo en conjunto los resultados derivados de las caracterizaciones estratigráfica, por un lado, y petrográfica y petrofísica, por otro, es posible emitir un juicio sobre la idoneidad de las evaporitas de la Formación Villalba de la Sierra como roca sello. Comenzando por la caracterización estratigráfica, teniendo en cuenta el espesor estimado para el tramo evaporítico de la Formación, de al menos 100 metros en la zona de estudio, y de la importante extensión con la que cuenta la unidad (equivalente al de la propia Depresión Intermedia), podría considerarse que el tramo evaporítico propuesto tiene unas dimensiones adecuadas, tanto en espesor como en extensión lateral, para ser empleado como roca sello. Por su parte, la caracterización petrográfica y petrofísica indica que, de entre las muestras analizadas, las que presentan menores valores de porosidad y permeabilidad son la BSM-1 y BSM-8. Además, tienen una baja anisotropía, lo que indica que son las más homogéneas textural y estructuralmente y, por tanto, sin planos de debilidad que supongan posibles vías de escape de fluidos y/o gases, y proceden de los tramos distinguidos en la columna estratigráfica que constan de mayor potencia. No obstante, el interés para evaluar una posible roca sello radica en que no tenga porosidad y sea impermeable y, dado que ambas muestras, aun presentando valores reducidos en cuanto a estos parámetros, han permitido la circulación de distintos fluidos y gases (agua, vapor de agua, aire) a través de ellas, no es posible considerarlas válidas como roca sello tal y como se presentan en afloramiento. A pesar de esto, considerando que la petrografía señala la diagénesis y la meteorización como las causas de la porosidad, es posible indicar que la anhidrita original en profundidad debería tener una porosidad y permeabilidad tales que permita que sea una buena roca sello. En caso de poder determinar la posición de estas unidades de anhidrita por medio de datos geofísicos, bien por sísmica o por diagráffas, se podrían delimitar las mejores zonas para almacenar gas. Por ello, sería de interés realizar este mismo estudio, en caso de existir sondeos, en muestras de esta Formación que no hayan sufrido procesos de telogénesis. Además, permitiría analizar en detalle la estratigrafía de la Formación en cuanto a cambios laterales de facies, posibles variaciones de espesor, e incluso sería posible conocer las posibles estructuras geológicas alpinas que puedan afectar a los materiales de la Formación Villalba de la Sierra y que supongan vías de migración para los recursos geológicos que se almacenasen bajo la hipotética roca sello evaporítica.

5. CONCLUSIONES

La Formación Villalba de la Sierra en el embalse de Buendía está constituida por tres tramos estratigráficos principales: inferior y medio (predominantemente evaporíticos con yesos y margas) y superior (lutitas rojas continentales). La sucesión muestra una tendencia general progradante, coherente con un evento regresivo de finales del Cretácico. Los yesos y margas del tramo inferior-medio indican ambientes subacuáticos salinos someros y fluctuaciones del nivel de base; las facies carbonáticas señalan transición a condiciones más continentales. El tramo superior muestra evidencias de ambientes continentales (lutitas rojas, raíces, fragmentos de cáscaras de huevos de dinosaurio).

Los yesos estudiados (yeso alabastrino nodular con bandas de yeso fibroso) se formaron por transformación de una anhidrita primaria de *sabkha* que se hidrató al exhumarse, generando sobrepresión, fracturas y cementación de yeso fibroso.

Todas las muestras presentan dos tipos de porosidad: macroporosidad de fractura (rellena de yeso fibroso) y microporosidad ramificada, esta última relacionada con disolución y meteorización superficial.

Según la caracterización petrofísica, se distinguen dos grupos de muestras:

- BSM-1 y BSM-8: rocas muy compactas, homogéneas, con muy baja porosidad (<2%) y permeabilidad muy baja. Presentan altas velocidades de onda P (>3900 m/s) y muy baja anisotropía, lo que refleja su homogeneidad y compacidad.
- BSM-5 y BSM-11: rocas más fisuradas, heterogéneas, con porosidad y permeabilidad algo mayores (5-8%). Muestran menores velocidades y mayor anisotropía, reflejando direcciones preferentes de debilidad.

El tramo evaporítico de la Formación Villalba de la Sierra presenta espesor y gran extensión lateral en la Depresión Intermedia, datos que señalan su interés para actuar como roca sello.

Los estudios petrográficos y petrofísicos muestran una porosidad y permeabilidad baja para todas las muestras, especialmente para las BSM-1 y BSM-8, pero con estos valores no se puede justificar que estas rocas puedan actuar como roca sello debido a que han sido afectadas por procesos telogenéticos y meteorización que generaron cierta porosidad. Sin embargo, la anhidrita original en profundidad, no afectada por telogénesis, podría ofrecer las condiciones de baja porosidad y alta impermeabilidad requeridas para actuar como un sello eficaz.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2005). UNE-EN 14579. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido. Madrid.
- Asociación Española de Normalización y certificación (AENOR) (2008). UNE-EN 13755. Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica. Madrid.
- Asociación Española de Normalización y certificación (AENOR) (2010). UNE-EN 15803. Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua. Madrid.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2010). ASTM D4404-10. Standard test method for determination of pore volumen and pore volumen distribution of soil and rock by Mercury Intrusion Porosimetry. Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2010). ASTM D5873-14. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method. West Conshohocken, PA.
- Barroso-Barcenilla, F., Cambra-Moo, O. y Segura, M. (2010). Estudio preliminar sobre Geología y Tafonomía del yacimiento paleontológico de "Lo Hueco" (Cretácico Superior, Cuenca, España). Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Geol., 104, 57-70.
- Civis, J. (2004). Cuencas cenozoicas. En Vera, J.A. (Ed.), Geología de España (pp. 556-631). IGME. Madrid.
- De Vicente, G. (2009). Partición de la deformación cenozoica intraplaca en el Sistema Central. Geogaceta, 46, 23-26.
- De Vicente, G.; González Casado, J.M.; Calvo, J.P.; Muñoz Martín, A.; Goner, J. y Rodríguez Pascua, M. (1994). Evolución y estructuras alpinas en la zona del centro peninsular. Cuaderno do Laboratorio Xeológico de Laxe, 19, 175-190.
- De Vicente, G. y Vegas, R. (2009). Large-scale distributed deformation controlled topography along the western Africa-Eurasia limit: Tectonic constraints. Tectonophysics, 474, 124-143.
- Díaz Molina, M. (1987). Bioestratigrafía y paleogeografía del terciario al E. de la Sierra de Altomira (Cuenca). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- Esbert R. M.; Ordaz, J.; Alonso, F. J. y Montoto, M. (1997). Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Colegi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. Barcelona.
- Escavy, J.I., Herrero, M.J., y Arribas, M.E. (2012). Gypsum resources of Spain: Temporal and spatial distribution. Ore Geology Reviews, 49, 72-84.
- Floquet, M. (2004). El Cretácico superior de la Cuenca Vasco-Cantábrica y áreas adyacentes. En: Vera, J.A. (Ed.), Geología de España (pp. 299-306). IGME. Madrid.
- Fort, R.; Fernández-Revuelta, B.; Varas, M. J.; Álvarez de Buergo, M. y Taborda-Duarte, M. (2008). Influencia de la anisotropía en la durabilidad de las dolomías Cretácicas de la Comunidad de Madrid frente a la cristalización de sales. Materiales de Construcción, 58, 289-290.
- Fort, R.; Varas, M. J.; Álvarez de Buergo Ballester, M. y Freire-Lista, D. M. (2011). Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. Journal of Geophysics and Engineering. 8, 132-144.

- GESSAL (2010). IT-GF-02/GEOF-05-01. Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ en España. Estructura Puerta Pareja - Petrofísica y tabla resumen. IGME.
- Guydader J. y Denis, A. (1986). Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers. Bulletin Engineering Geology, 33, 49-55.
- Heaney, P. (1995). Moganite as an Indicator for Vanished Evaporites: A Testament Reborn? Journal of Sedimentary Research, 65(4a), 633-638.
- Hernaiz, P.P.; Cabra, P.; Solé, J.; Portero, J. y Del Olmo, P. (1998). Mapa Geológico y Memoria de la Hoja nº 537 (Auñaón), Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Segunda Serie. Primera edición. IGME. Madrid.
- Instituto Geográfico Nacional (2025). Base Topográfica Nacional y Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Madrid.
- INYPSA. (2010). IT-GE-05/GEOL-05-00: Caracterización de la estructura Baides 2 - Tabla resumen. IGME.
- Li, X.; Rupert, G.; Summers, D. A. y Santi, P. (2000). Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability. Rock Mechanics and Rock Engineering, 33(1), 1-13.
- Lindholm, R.C. y Finkelman, R.B. (1972). Calcite staining: semiquantitative determination of ferrous iron. Journal of Sedimentary Research, 42(1), 239-242.
- Muñoz Martín, A. y De Vicente, G. (1996). Campos de paleoesfuerzos terciarios en el borde oriental de la cuenca del Tajo (España central). Geogaceta, 20, 913-916.
- Martín-Chivelet, J. et al. (2019). The Late Jurassic – Early Cretaceous Rifting. En: Quesada, C. y Oliveira, J.T., The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach (pp. 169-249). Springer.
- Normal 7/81. Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizione. Doc., CNR-ICR, Roma. 1981.
- Ortega et al. (2015). The biota of the Upper Cretaceous site of Lo Hueco (Cuenca, Spain). Journal of Iberian Geology, 41(1), 83-99.
- Ortega, F.; Escaso, F.; Mocho, P.; Narváez, I. y Pérez-García, A. (2019). Eggs and bones: a preliminary comparison between the Upper Cretaceous faunas of the Poyos, Portilla and Lo Hueco sites (Villalba de la Sierra Formation. Central Spain). En: Moreno Bedmar, J.A. (Ed.) X Congreso Latinoamericano de Paleontología. El Salvador.
- Ortega, F. y Pérez García, A. (2009). cf. *Lirainosaurus* sp. (Dinosauria: Titanosauria) en el Cretácico Superior de Sacedón (Guadalajara). Geogaceta, 46, 87-90.
- Pérez-García, A.; Coria, R.A.; Gascó, F.; de la Horra, R.; Martín-Jiménez, M.; Mocho, P.; Narváez, I. y Ortega, F. (2018). El área de nidificación de dinosaurios del margen occidental del embalse de Buendía (Guadalajara y Cuenca) Relevancia del yacimiento del Cretácico Superior de Poyos (Sacedón). En: Vaz, N. y Sá, A.A., Yacimientos Paleontológicos Excepcionales en la Península Ibérica: XXXIV Jornadas de Paleontología y IV Congreso Ibérico de Paleontología (pp. 99-100). IGME, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro; Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades; Sociedad Española de Paleontología.
- Ramírez Merino, J.I. (1989). Memoria de la Hoja nº587 (Las Majadas) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. IGME. Madrid.

- Ramírez del Pozo, J. y Meléndez Hevia, F. (1972). Nuevos datos sobre el Cretácico Superior-Eoceno de la Serranía de Cuenca. *Boletín Geológico y Minero*, 83(5), 443-446.
- RILEM, 1980. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Commission 25-PEM: Protection et Erosion des Monuments*, 175–253.
- Rodríguez Fernández, L. R.; López Olmedor, F.; Oliveira, J. T.; Medialdea Cela, T.; Terrinha, P.; Matas González, J.; Martín-Serrano García, A.; Martín Parra, L. M.; Rubio Pascual, F.; Marín Lechado, C.; Montes Santiago, M. y Nozal Martín, F. (2015). Mapa Geológico de España y Portugal a escala 1:1.000.000. IGME y LNEG.
- Rodríguez, C. y Sebastián, E. (1994). Técnicas de análisis del sistema poroso de materiales pétreos ornamentales: usos y limitaciones. *Ingeniería Civil*, 96, 130-142.
- Sanguino, F.; de Celis, A.; de la Horra, R.; Fernández, E.F.; Martínez, J.F.; Marcos-Fernández, F.; Pérez-García, A. y Ortega, F. (2025). A unique association of fusioolithid dinosaur eggs from the Upper Cretaceous of Spain (Poyos, Central System). *Cretaceous Research*, 174.
- Skerlek, G.M. (1999). Evaluating Top and Fault Seal, en Beaumont, E.A. y Foster, N.H. (ed), *Exploring for Oil and Gas Traps*. Vol. 3. American Association of Petroleum Geologists.
- Torres Pérez-Hidalgo, T.J.; García-Alonso, P.; Nestares, T. y Ortiz, J.E., (1997). Aspectos básicos de la paleogeografía cenozoica de la Depresión Intermedia. En Alcalá, L. y Alonso Zarza, A. M. (Ed.), *Itinerarios geológicos en el Terciario del centro y este de la península*, Cuenca.
- Torres, T. y Zapata, J.L. (1987b). Evolución cenozoica de la Depresión Intermedia (Cuenca-Guadalajara). *Acta Geológica Hispánica*, 21-22, 437-442.
- Tucker, M.E. y Jones, S.J. (2023). *Sedimentary petrology*. Forth edition. Wiley. Hoboken, Nueva Jersey.
- Vera, J.A. (2004). *Geología de España*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Vilas, L.; Mas, R.; García, A.; Arias, C.; Alonso, A.; Meléndez, N. y Rincón, R. (1982). Ibérica Suroccidental. En: García, A. (Ed.), *El Cretácico en España*. Universidad Complutense de Madrid, 457-513.
- Warren, J.K. (2010). Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98, 217–268
- Zapatero Rodríguez, M.A.; Suárez Díaz, I.; Arenillas González, A.; Marina Rojo, M.; Catalina Nita, R. y Martínez Orío, R. (2009). Proyecto Europeo GeoCapacity. *Assesing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide*. Grupo de Almacenamiento Geológico de CO₂. IGME.