

► **Sedimentología de la *Formación Higuieruelas* en Mezalocha (Zaragoza).**
Análisis de facies de una plataforma carbonatada somera de finales del Jurásico.

Trabajo fin de Grado Geología 2014



Índice	Pág.
<i>Abstract</i>	3
1. Planteamiento y objetivos	3
2. Contexto geológico.....	5
3. Metodología.....	5
4. Análisis de facies	10
4.1. Facies A	10
4.2. Facies B.....	11
4.3. Facies C	12
4.4. Facies D	13
4.5. Facies E.....	14
5. Reconstrucción paleoambiental	21
6. Discusión: extensión lateral de las facies	23
7. <i>Conclusion</i>	24
8. Bibliografía.....	25

Abstract

A detailed facies analysis of a 1 km-long outcrop of the uppermost part of the Higuieruelas Formation (Lower Tithonian, Upper Jurassic) located near Mezalocha (Zaragoza) has been carried out. Facies analysis included the measurement of three 10-12 m thick detailed logs with extensive sampling (a total of 91 samples), and further microfacies characterization by the analysis of polished laps and thin sections. The relative abundance of some key components resulted in the definition of five facies, dominated respectively by peloids and ooids (Facies A), large irregular oncoids (Facies B), coarse skeletal stromatoporoid fragments (Facies C), well-sorted bioclasts and peloids (Facies D) and facies with fenestral porosity (Facies E). Field based correlation resulted in a precise reconstruction on the lateral and vertical distribution of the five defined facies. The observed facies distribution allowed the interpretation of the different sedimentation environments of the studied shallow carbonate platform and reflects a shallowing upward evolution, from more distal environments (i.e., external protected lagoon, Facies A) to proximal litoral environments, with evidence of intermittent subaerial exposure (Facies E). The lateral continuity of the facies and their potential use as analogues of some of the hydrocarbon oil reservoirs of the Arab Formation in the Middle East, which has some of the major conventional hydrocarbon reservoirs in the world, is also discussed. In particular, it has been possible to assess the lateral continuity and thickness changes from those materials similar to those of Arab Formation layers including stromatoporois, with particular interest for the oil exploration industry, following the work carried out in other Upper Jurassic Iberian outcrops, located in the Sierra de Albarracín (Alzazghah et al., 2013; San Miguel et al., 2013).

1. Planteamiento y objetivos

Las facies de plataforma carbonatada del final del Jurásico de Oriente Medio (*Formación Arab*, Kimmeridgiense superior-Titoniense), incluyen las mayores reservas de hidrocarburos convencionales a escala global. Algunos de estos reservorios, como el *Arab-D* tienen porosidades excepcionales, de hasta el 35%. El origen de esta porosidad es fundamentalmente diagenético, aunque la intensidad del proceso de disolución es variable en función de la facies sedimentaria original. En particular, los procesos de disolución móldica afectan de forma selectiva a determinados bioclastos, como los estromatopóridos, que pueden ser muy abundantes en algunos niveles de los reservorios del *Arab-D* (Lindsay et al., 2006; Al-Awwad y Collins, 2013). El estudio de la distribución de las facies sedimentarias dentro de estos almacenes carbonatados es un objetivo prioritario a la hora de planificar las estrategias de explotación de hidrocarburos. Para ello, es necesario conocer ejemplos de análogos en afloramiento. Con este fin, se han realizado estudios de heterogeneidades de facies en determinados afloramientos del Kimmeridgiense de la Sierra de Albarracín (Alnazghah et al., 2013; San Miguel et al., 2013). El presente estudio se integra dentro de esta línea de trabajo del Área de Estratigrafía de la Universidad de Zaragoza, ya que pretende, entre otros aspectos, valorar la continuidad lateral y variabilidad de espesor de determinadas facies carbonatadas someras, relevantes para la explotación de hidrocarburos, caso de las facies ricas en estromatopóridos, que forman niveles de algunos metros de espesor en la *Formación Higuieruelas* del entorno de Mezalocha, objeto del presente estudio.

Al final del Jurásico (Titoniense inferior), en el margen noroccidental de la Cuenca Ibérica se extendían amplias plataformas carbonatadas, caracterizadas por el predominio de facies granosoténidas con granos no esqueléticos (peloides, oncoides, ooides) y una amplia variedad de restos bioclásticos. Estas facies constituyen las series calcáreas de la *Formación Higuieruelas*, que forman amplios afloramientos al Sur de Zaragoza (Fig. 1), donde han sido objeto de estudio de numerosas investigaciones sedimentológicas y estratigráficas (Aurell y Meléndez, 1986, 1987; Aurell *et al.*, 2002, 2003, 2008, 2012; Ipas *et al.*, 2004).

Con el presente trabajo se pretende precisar y detallar la distribución lateral y vertical de las facies, originadas en diferentes ambientes de sedimentación dentro de la parte interna de la plataforma carbonatada del final del Jurásico. Para ello se han estudiado los 10-12 metros superiores de la *Formación Higuieruelas* a lo largo de un afloramiento continuo (casi un 1 km de extensión lateral) expuesto en el entorno de Mezalocha. Las secuencias de somerización que caracterizan esta unidad fueron previamente documentadas por Aurell *et al.* (2003) e Ipas *et al.* (2004), los cuales distinguen hasta tres de estas secuencias. Aquí se pretende profundizar en las características de la última de estas secuencias de somerización, que expone una serie de facies que representan el tránsito desde medios someros de lagoon protegido hasta medios litorales. Se hará hincapié en los cambios de espesor y relaciones laterales de las distintas facies, sobre todo de la facies rica en estromatopóridos (Facies C), que ya había sido previamente identificada en Aurell *et al.* (2012) en uno de los afloramientos objeto de estudio.

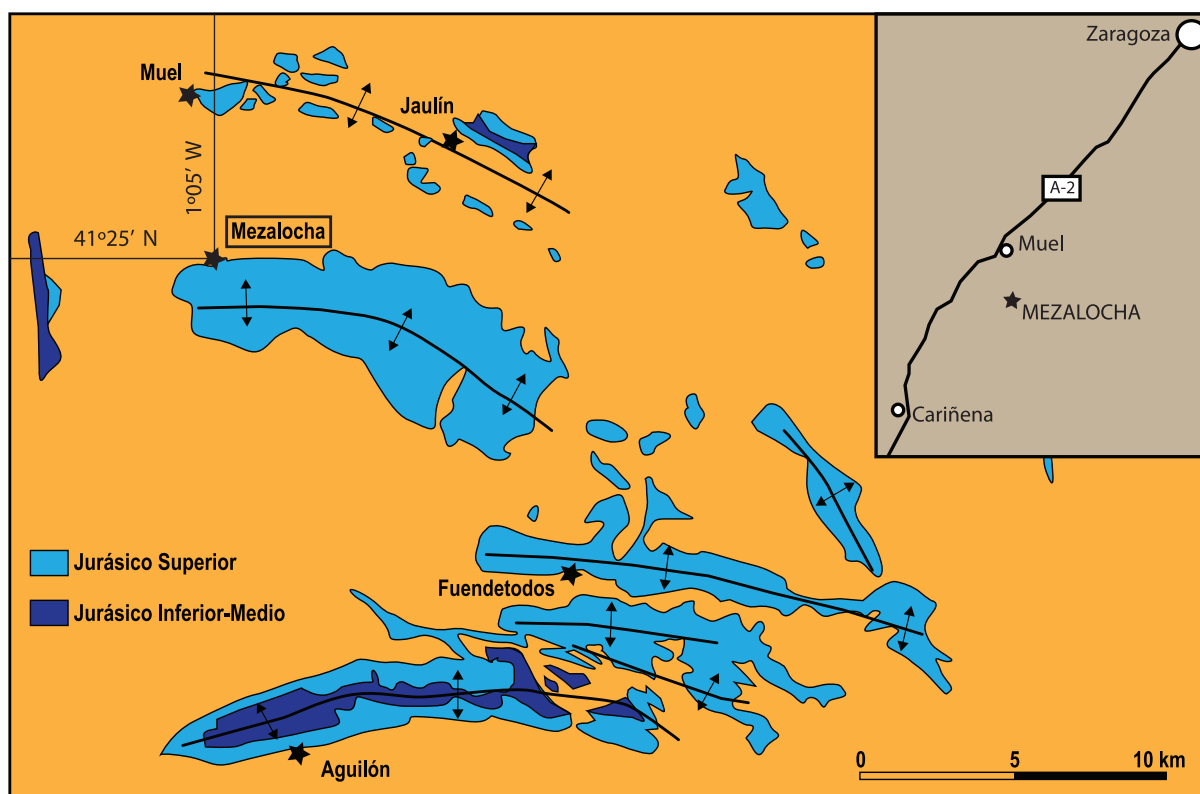


Fig. 1: Situación de los afloramientos estudiados en Mezalocha. Los materiales del Jurásico Superior estudiados corresponden al flanco Norte de un anticlinal de dirección E-O en su parte occidental y NO-SE en su parte oriental (Modificado de Aurell *et al.*, 2012).

2. Contexto geológico

La parte central de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica en la que se integran los afloramientos del final del Jurásico estudiados en Mezalocha, se caracteriza por la presencia de amplios afloramientos terciarios poco deformados, entre los que afloran algunos macizos rocosos discontinuos de edad jurásica, que forman amplias estructuras anticlinales (*Fig. 1*). Las calizas masivas o estratificadas en bancos potentes de la *Formación Higuieruelas* presenta extensos y continuos afloramientos en el anticlinal de Mezalocha objeto de estudio.

La *Formación Higuieruelas* tiene una edad Titoniense inferior (Jurásico Superior), que abarca un intervalo temporal aproximado de 152–148 Ma. En este período de tiempo había mares someros cubriendo áreas extensas del Oeste de Europa, dominando la precipitación y sedimentación de carbonatos en las plataformas someras que cubrían el Oeste del Tethys. Sobre la Cuenca Ibérica se desarrollaron plataformas carbonatadas someras extensas abriéndose hacia el Tethys. Estas plataformas tenían taludes con escasa pendiente que separaban los medios marinos someros de los profundos (Aurell *et al.*, 2003).

Los dominios de plataforma media e interna representados por la *Formación Higuieruelas* suelen tener fábricas granosostenidas con abundantes oncoides, ooides, peloides y bioclastos. También es habitual el crecimiento de arrecifes de corales y estromatopóridos, bien asociados u ocupando diferentes dominios de la plataforma (Aurell *et al.*, 1986, 1987). En conjunto, la unidad presenta una evolución somerizante, coherente con la etapa de regresión marina que tuvo lugar a finales del Jurásico. El levantamiento del borde occidental de la Cuenca Ibérica al final del Jurásico hizo que la plataforma carbonatada quedara expuesta en el sector de estudio, de modo que la sedimentación marina de la parte media y superior del Titoniense tiene lugar al Este de la Cuenca Ibérica, en el sector del Maestrazgo (Aurell *et al.*, 2011).

3. Metodología

Este trabajo se enfoca en un estudio de detalle en 10-12 metros de serie de la parte superior de la *Formación Higuieruelas*, tratando de evaluar la posible extensión lateral de las facies a lo largo de un afloramiento continuo de casi 1 km de extensión lateral. Para ello, se ha realizado un detallado análisis de facies y reconstrucción paleoambiental por medio del estudio y elaboración de columnas estratigráficas en tres afloramientos del entorno de Mezalocha, separados entre sí 300 m y 600 m respectivamente (*Fig. 2*). El afloramiento M1 (*Fig. 3*), corresponde a un barranco situado al Sur de la localidad, en una pared vertical natural en la que afloran 10 metros de serie, principalmente compuesta por estratos masivos y de espesores métricos. El afloramiento M2 (*Fig. 4*) corresponde al frente occidental de la cantera abandonada de Mezalocha, en la entrada Oeste del pueblo, y fue objeto de un estudio previo (Aurell *et al.*, 2012). El afloramiento M3 (*Fig. 5*) se encuentra en la cara Norte de la ladera de un pequeño montículo en la carretera A-1011, a aproximadamente 1 km al Sur de Mezalocha.

En campo se han identificado las principales superficies de estratificación y se ha reconstruido la sucesión vertical de los diferentes tipos de facies en cada uno de los afloramientos. El análisis de facies está basado en el reconocimiento de componentes en el campo mediante

lupa de mano, pero sobre todo en su caracterización a partir de secciones pulidas mediante lupa binocular en el laboratorio. En concreto se han estudiado 29 muestras en M1, 34 muestras en M2 y 28 muestras en M3 (ver situación en *Figs. 3, 4 y 5*). De estas 91 muestras analizadas se seleccionaron 23 muestras representativas de las facies identificadas para realizar láminas delgadas, que fueron estudiadas mediante microscopio petrográfico.

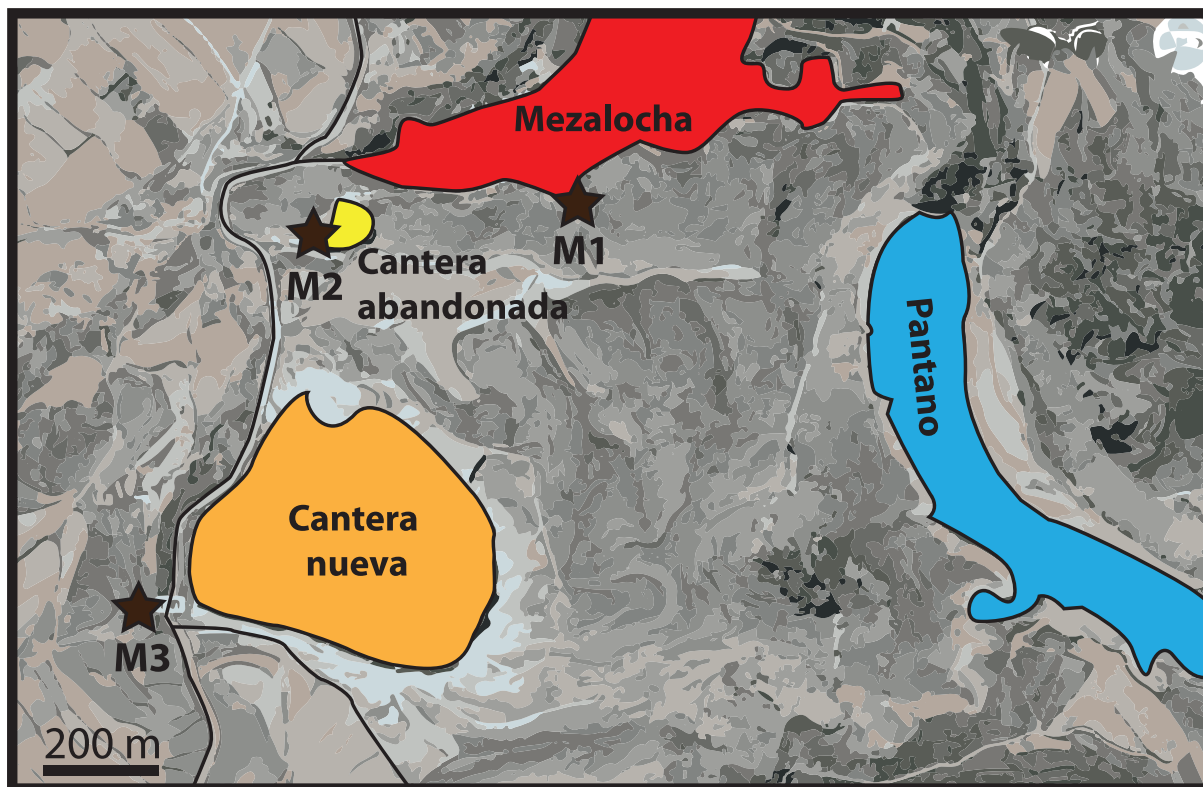


Fig. 2: Situación de los afloramientos estudiados. M1 se sitúa en el barranco al Sur de Mezalocha; M2 en la cara occidental de una cantera abandonada, al Sur de la entrada Oeste del pueblo; y el afloramiento M3, en la carretera, cercano al borde Oeste de la nueva cantera.

El análisis detallado de la facies comprende, en primer lugar, la identificación y el estudio de la proporción relativa entre los granos, matriz (micrita) y cemento de las rocas carbonatadas, con su consiguiente clasificación textural (clasificaciones según Dunham, 1962 y Embry y Klovan, 1972). Se ha procedido además a la identificación de los diferentes componentes no esqueléticos y esqueléticos de cada una de las muestras, al estudio de su proporción relativa y a la descripción de las características de los mismos: la forma de los poros de la porosidad fenestral, la composición de las cortezas de ooides y oncoides, la presencia de encostramientos microbianos y las asociaciones de éstas con foraminíferos y algas, etc.

El trabajo de campo también incluye el seguimiento lateral de las principales superficies de estratificación a lo largo del afloramiento continuo, lo que ha permitido establecer una correlación física entre los tres afloramientos estudiados en detalle.

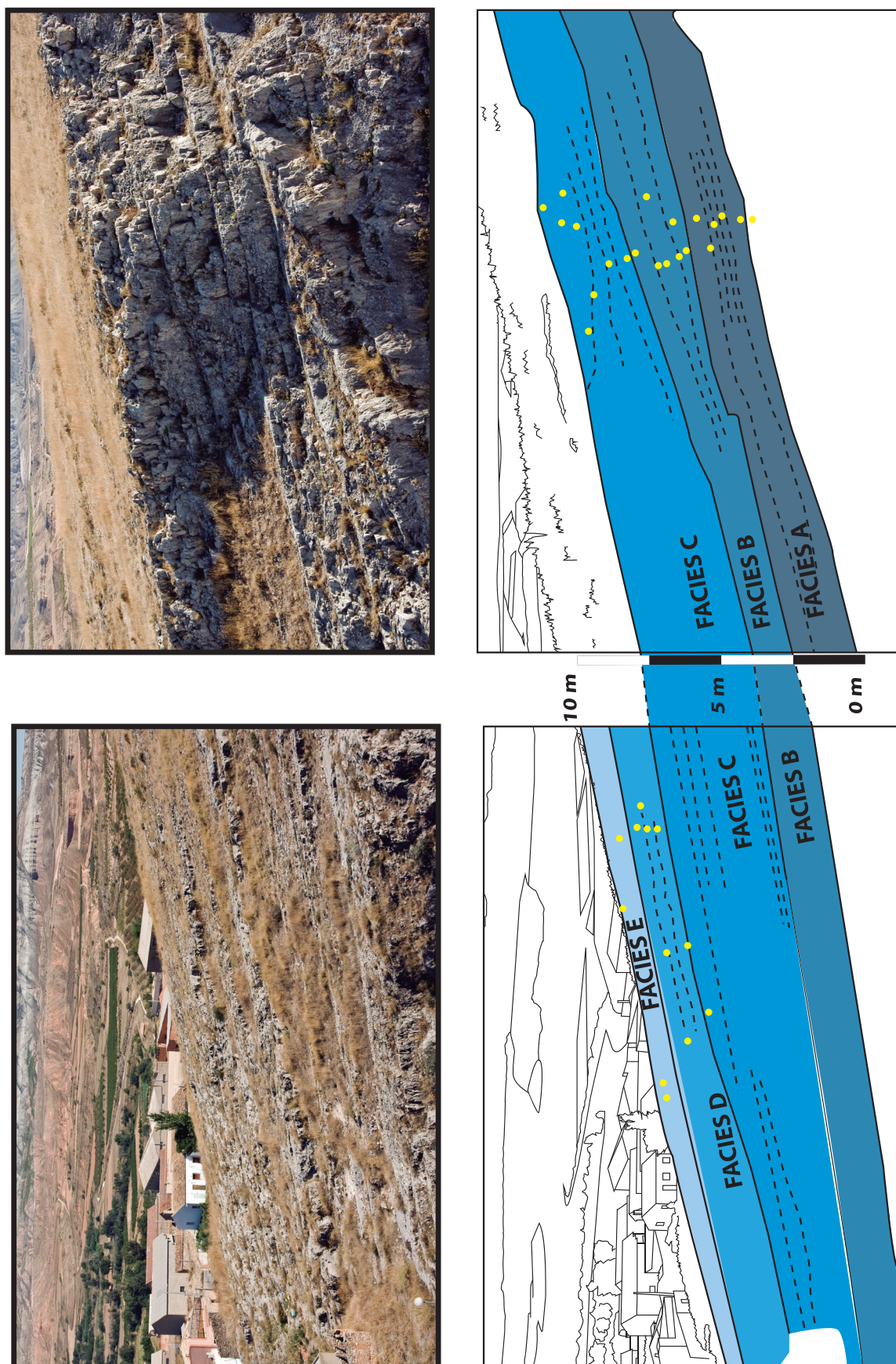


Fig. 3: Distribución de las facies en el afloramiento M1, situado en el barranco de Mezalocha. Los puntos amarillos marcan aquellos lugares en los que se han recogido las muestras.

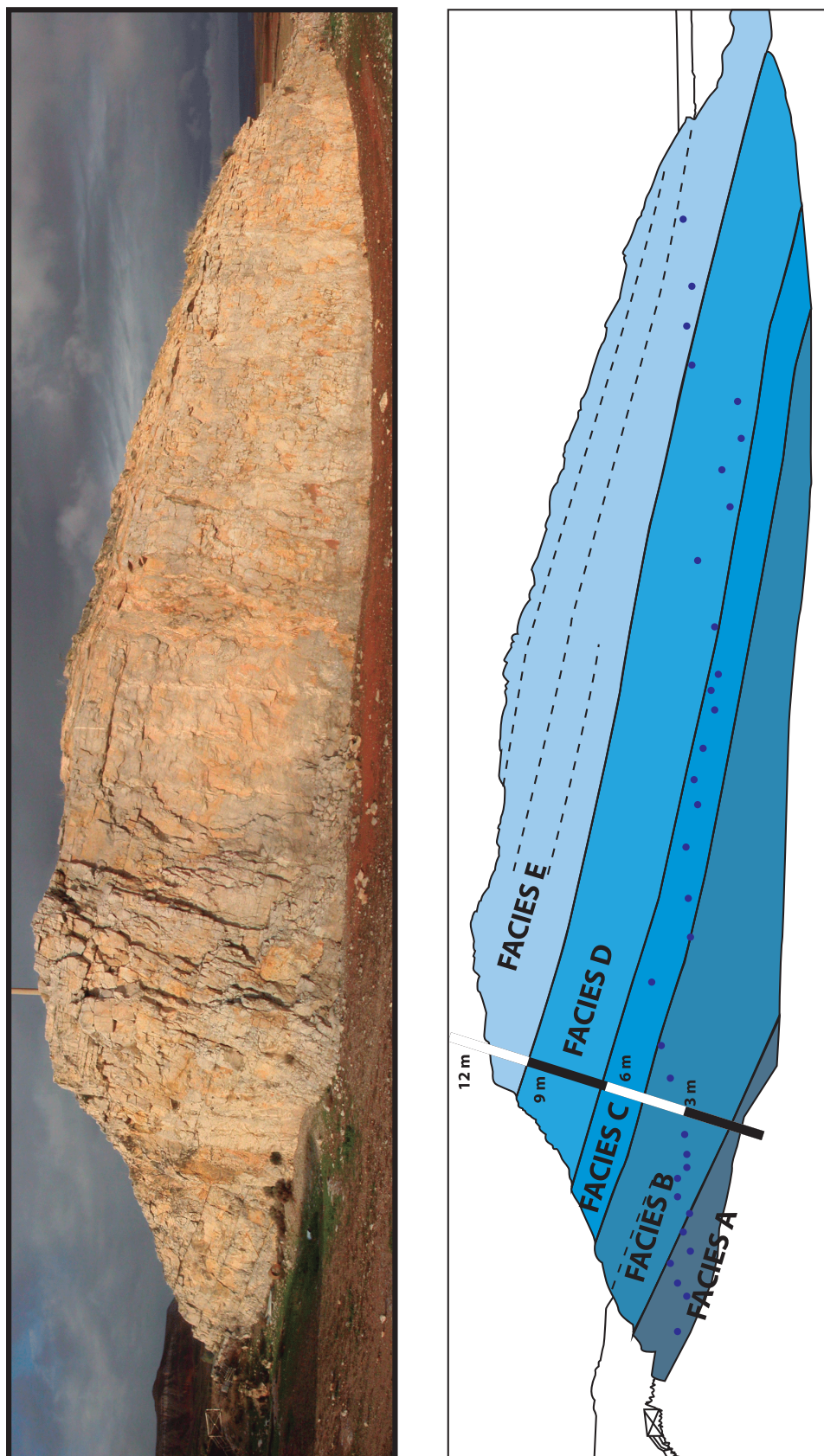


Fig. 4: Distribución de las facies en el afloramiento M2, situado en una cantera abandonada en la entrada Oeste de Mezalocha. Los puntos azules marcan aquellos lugares donde se han recogido las muestras.

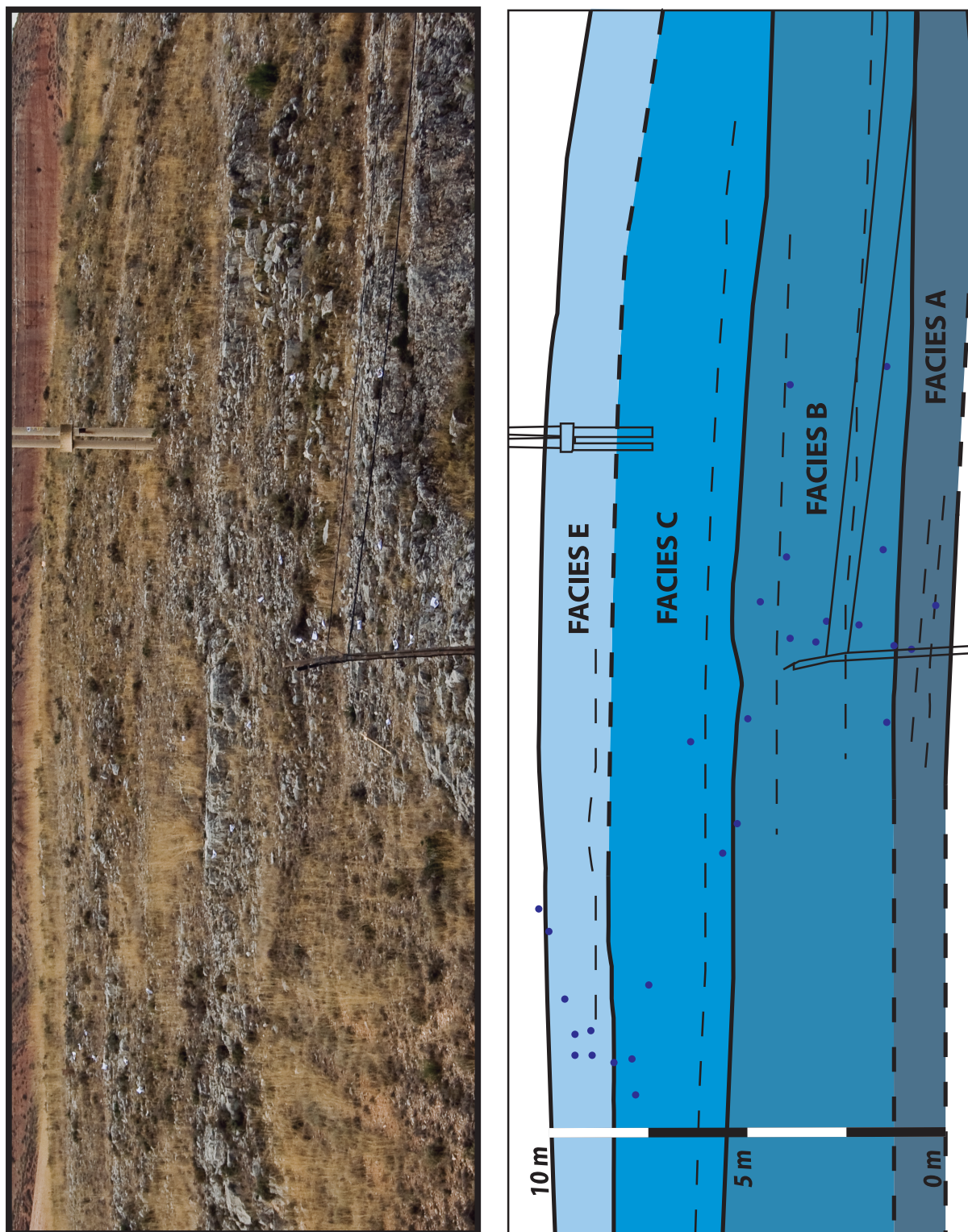


Fig. 5: Distribución de las facies en el afloramiento M3, situado en la carretera A-1011 a aproximadamente 1 km de Mezalocha. Los puntos azules marcan aquellos lugares donde se han recogido las muestras.

4. Análisis de facies

A partir del estudio de las muestras, se han caracterizado cinco facies diferentes (Facies A-E), correspondientes a cinco ambientes de sedimentación diferentes dentro de la zona interna de la plataforma del Titoniense.

La distribución vertical de cada una de las Facies A–E en los tres afloramientos estudiados se indica en las *Figs. 3, 4 y 5*. La información sedimentológica obtenida se ha sintetizado en los tres perfiles representados en las *Fig. 6* (perfil M1), *Fig. 7* (perfil M2) y *Fig. 8* (perfil M3), donde se indica el espesor, la localización de las muestras, la clasificación textural (Dunham, 1962) y la proporción relativa entre los componentes más significativos, que permiten identificar una u otra facies. La correlación entre los tres perfiles (*Fig. 9*) confirma que los ambientes de sedimentación representados por las Facies A–E se encuentran relacionados lateralmente entre sí, puesto que no presentan discontinuidades ni interrupciones en la sedimentación marcadas dentro de la serie, pudiendo estudiar de esta manera una secuencia somerizante, desde los dominios submareales someros hasta los dominios litorales.

4.1. Facies A

Ocupa aproximadamente 1,5 m de serie en cada afloramiento estudiado. No se ha definido el límite inferior de esta facies. El techo de la Facies A en los tres afloramientos se puede correlacionar a partir de su seguimiento lateral (*Fig. 9*) a lo largo del sector estudiado.

(1) Descripción

Se trata de un *packstone/wackestone* de peloides, ooides y oncoides con algunos elementos esqueletales, con zonas dominadas por textura de tipo *mudstone* (*Fig. 10.A, 11.A y 11.B*).

Los peloides micríticos presentan colores blancos y pardos. Dominan los peloides líticos heterométricos y con formas diversas: redondeadas, subredondeadas, ovoidales e irregulares. Los peloides líticos se originan por el retrabajamiento sin- y post-deposicional de carbonatos preexistentes y otros elementos que llegan desde otras zonas de la plataforma. Algunos peloides se encuentran fracturados y solapados entre sí. Los tamaños varían entre 0,1 y 1 mm, siendo habituales los peloides de 0,5 mm. También aparecen peloides en intraclastos y éstos, a su vez, actuando como núcleo de algunos oncoides.

Esta facies es la única dentro de la serie estudiada que presenta una proporción importante de ooides con respecto al resto de componentes. Al igual que los peloides, los ooides presentan formas y tamaños diversos, entre 1 y 5 mm de diámetro, solapados entre sí en muchos casos. Según la clasificación de Flügel (2004) se han interpretado como ooides normales (puesto que el grosor de la corteza es igual o mayor que la mitad del diámetro del ooide) y micríticos (puesto que la corteza no muestra una laminación muy clara). Además, los núcleos están muy micritizados y en algunos casos son difíciles de distinguir del resto de la corteza.

Los oncoides son muy heterométricos, simples y compuestos, con tamaños de entre 0,4 y 2 cm y formas irregulares, dominando las formas alargadas debido a su desarrollo en torno a bioclastos de moluscos, los cuales ejercen como núcleos de los oncoides en la mayoría de

los casos. Los oncoides compuestos presentan intraclastos de peloides o agrupaciones de fragmentos de bivalvos y gasterópodos como núcleos.

En la corteza predominan las láminas micríticas compactas y poco diferenciadas (*Lm* de Dahyanake, 1997), de origen microbiano o producidas por el atrape de sedimento de grano fino. Aunque estas son las láminas predominantes, también hay algunas láminas grumosas (*Lg* de Dahyanake, 1997) con límites irregulares formadas por micrita grumosa y lenticulas esparíticas, reflejo de períodos de calma. Rara vez se encuentran bandas continuas de mallas de algas en las cortezas.

Los bioclastos son de bivalvos y gasterópodos, con tamaños que oscilan entre 0,2 y 4 cm, dependiendo del grado de alteración. Algunos se encuentran muy fragmentados, pero otros mejor conservados presentan sus cavidades rellenas de granos esqueléticos de pequeño tamaño (peloides y ooides) y foraminíferos, acompañados de evidencias de recristalización. Entre los foraminíferos se encuentran *miliólidos*, *textuláridos* y *lituólidos*.

(2) Interpretación

Esta facies se ha interpretado como depositada en un medio marino somero y abierto colonizado por foraminíferos y moluscos. La existencia de peloides líticos, ooides y oncoides irregulares refleja la influencia del oleaje y las corrientes en el medio sedimentario. No obstante, el predominio en algunas zonas de fango micrítico (parches de texturas tipo *mudstone*), indica la existencia de períodos de calma más o menos prolongados. Estos períodos de calma también quedan reflejados en el registro estratigráfico como elementos encostrantes y crecimientos algales en las cortezas de los oncoides. Determinados componentes indicativos de medios de alta energía (ooides y oncoides) se encontrarían resedimentados dentro de esta facies. Las etapas de alta energía intermitente explicarían la presencia de estos granos resedimentados, pudiendo estos provenir de una barrera oolítico-oncolítica más distal. Estos bajíos oolítico-oncolíticos ejercerían a su vez de barrera energética que implican condiciones de sedimentación en un medio más protegido para la Facies A.

Es interesante apuntar que los ooides resedimentados no se observan en el resto de la serie estudiada. Ello es debido a la proximidad de los bajíos a la Facies A. Aunque no se ha caracterizado en este trabajo, hay que indicar que las facies granosostenidas oolíticas-oncolíticas forman potentes sucesiones en el entorno de Mezalocha, dentro de la parte inferior y media de la *Formación Higuieruelas* (Ipas *et al.*, 2004).

4.2. Facies B

Esta facies se reconoce hacia la parte inferior de todos los perfiles, y se localiza sobre una superficie bien marcada localizada a techo de la Facies A (*Fig. 9*). El espesor de la Facies B es variable y va aumentando hacia el Sur, pasando de 2 m en M1 a 4 m en M3.

(1) Descripción

La facies está caracterizada por la presencia de oncoides de gran tamaño (*Floatstone* de oncoides), dispersos en una matriz granosostenida de peloides de tipo *packstone*. Como

característica singular con respecto al resto de facies, hay filamentos de algas calcificadas (*Cyanoficeas*) junto a los oncoides (*Fig. 10.B, 11.C, 11.D y 11.E*).

Los ooides prácticamente desaparecen en esta facies. Los oncoides, de colores más claros que la matriz, son heterométricos y poseen formas muy irregulares. Varían en tamaño desde 0,5 a 8 cm de diámetro, con núcleos compuestos y espesor de la corteza mayor que el diámetro del núcleo. Los núcleos compuestos incluyen bioclastos (bivalvos y gasterópodos), intraclastos de peloides y fragmentos de estromatopóridos y corales. En las cortezas predominan las láminas micríticas alternadas con esparíticas (Oncoides de tipo II y III según Dahayanake, 1993).

Los peloides son peloides líticos muy similares a los observados en la Facies A, formando una matriz micropeloidal granosostenida, de tipo *packstone*. Presentan formas diversas y una escasa selección, pero con tamaños menores en todo caso a 1 mm.

Continúan abundando los fragmentos de bioclastos, pero son más reducidos y están más retrabajados, con tamaños inferiores a 1 cm. Abundan los gasterópodos y bivalvos, con cavidades rellenas por foraminíferos y peloides.

Esta facies presenta localmente corales ramosos en posición de crecimiento, como en el afloramiento M2, en el que ocupan una banda en la parte inferior de la facies. También hay fragmentos de corales en toda la facies. Hacia techo de la serie se distingue algún fragmento retrabajado de estromatopórido de pequeño tamaño (menor a 5 mm). A lo largo de toda la facies hay asociaciones de *textuláridos*, *lituólidos* y *miliólidos*, con predominancia de estos últimos.

(2) Interpretación

La presencia de corales indica un medio oligotrófico de aguas templadas y salinidad normal. La morfología ramosa de los corales y la presencia de láminas con encostramiento microbiales en las cortezas de los oncoides, indica la alternancia de periodos de alta y baja energía. Con la baja energía se daría la proliferación de corales ramosos, propios de medios con escasa o nula sedimentación y el desarrollo de costras microbiales sobre la corteza de los oncoides. Durante los eventos episódicos de alta energía, se forman las láminas micríticas de los oncoides y, además, se fragmentarían los corales ramosos dando lugar a los bioclastos que se encuentran dispersos a lo largo de toda la facies.

4.3. Facies C

Se encuentra en relación lateral con la Facies B. Presenta una notable diferencia de espesor según la zona estudiada: de 3-4 m en M1 y M3 a 2 m en M2 (*Fig. 9*).

(1) Descripción

Se trata de un *floatstone* de estromatopóridos, dispersos en una matriz granosostenida formada por peloides y bioclastos (bivalvos, gasterópodos y foraminíferos). Los peloides son líticos, similares a los descritos en las facies anteriores, con tamaños menores a 1 mm y formas irregulares (*Figs. 10.C y 11.F*).

Los estromatopóridos son el componente principal de esta facies. Poseen formas redondeadas y alargadas. Su tamaño medio oscila entre 1 y 4 cm.

Disminuye la presencia de oncoides, que además pasan a ser de menor tamaño, con núcleos grandes con respecto al tamaño del resto de la corteza. La mayoría están compuestos por fragmentos de estromatopóridos e intraclastos de peloides y bioclastos. Los bioclastos son de bivalvos y gasterópodos, con las cavidades internas rellenas de micrita, localmente recristalizada a esparita.

Se reduce la proporción de foraminíferos *textuláridos* y *lituólidos* a favor de una mayor presencia de *miliólidos*. También hay una elevada presencia de *serpúlidos*, que son formas que se encuentran comúnmente asociados a estromatopóridos (Leinfelder, 2005).

(2) Interpretación

Los estromatopóridos, junto a los corales, son comunes en las plataformas carbonatadas de finales del Jurásico. Aunque tanto en la Facies B como la Facies C coexisten corales y estromatopóridos, éstos últimos dominan en la Facies C sobre los corales, lo cual es indicativo de un medio más somero y de mayor energía, con mayor grado de sedimentación y retrabajamiento de los sedimentos. Al igual que los corales, los estromatopóridos poseen un amplio rango de resistencia a la batimetría, aunque éstos últimos aguantan condiciones más extremas. Los estromatopóridos también soportan mejor aguas hipersalinas, más cálidas y extremadamente oligotróficas (Leinfelder, 2005).

4.4. Facies D

La Facies D aparece en los afloramientos M1 y M2, pero no en el M3, en el cual sobre la Facies C se encuentra directamente la Facies E (*Fig. 9*).

(1) Descripción

Se trata de un grainstone de peloides con restos bioclásticos de moluscos, estromatopóridos y equinoideos fragmentados y *serpúlidos*, sin apenas fango (*Fig. 10.D y 11.G*).

Los peloides son heterométricos, con diámetros entre 0,1 y 0,5 cm y formas irregulares y variadas. Los oncoides prácticamente desaparecen en esta facies. Solo quedan algunos oncoides pequeños (0,5–1 cm) con núcleos formados por pequeños fragmentos de estromatopóridos, bastante redondeados en algunos casos, por la acción del oleaje. Las cortezas de algunos de los oncoides difieren con las del resto de la serie, pudiendo clasificarse como oncoides de *Tipo I* según Dahayanake (1993), con predominancia únicamente de láminas micríticas, producidas por el atrape de sedimento de grano fino.

Entre los foraminíferos, aunque todavía se encuentran escasos *textuláridos* y *lituólidos*, predominan los *miliólidos*, propios de medios más restringidos. También hay una importante presencia de agregados de peloides y fósiles de tamaños milimétricos de bivalvos (fragmentos de conchas) y gasterópodos (algunas conchas completas).

(2) Interpretación

La buena clasificación y redondeamiento de los granos y la ausencia de fango, son signos de la acción prolongada del oleaje, dentro de la zona de *shoreface*. El predominio de *miliólidos* es coherente con un medio relativamente restringido, con fluctuaciones en la salinidad, lo que impide el crecimiento de corales o estromatopóridos. Los fragmentos retrabajados de estromatopóridos provienen de la erosión y resedimentación de la Facies C, puesto que en momentos de alta energía, los parches de estromatopóridos se erosionarían por acción de las corrientes y el oleaje y se depositarían en estas zonas más internas de la plataforma.

4.5. Facies E

Esta facies se encuentra al techo de la *Formación Higuieruelas*, y constituye por tanto el límite superior de la serie estudiada, mostrando un paso lateral de facies desde la Facies D hasta la Facies E en los afloramientos M1 y M2 y de la Facies C a la Facies E en el afloramiento M3, debido al carácter discontinuo de la Facies C (*Fig. 9*).

(1) Descripción

La Facies E presenta una textura Grainstone con peloides y abundante porosidad fenestral, con algunos restos bioclásticos de moluscos y foraminíferos (*Fig. 10.E y 11.H*).

La porosidad fenestral presenta dos formas características; por un lado, poros redondeados heterométricos de menos de 0,2 a más de 1 mm de diámetro, con una distribución dispersa en las muestras y, por otro, poros más alargados de geometría planar que se encuentran formando bandas, éstos de menor tamaño que los anteriores (menores a 0,1 mm). Asociados a la porosidad fenestral se observan parches de fango micrítico sin ningún componente ni estructura, que corresponden a rellenos de galerías de bioturbación.

(2) Interpretación

La porosidad fenestral puede darse en zonas supra- e intermareales, pero nunca en zonas submareales, por lo que la aparición de esta facies en la parte más alta de la serie estudiada indica la parte alta de la zona litoral, expuesta periódicamente a exposición subaérea. La porosidad fenestral puede darse por diversos factores, como el atrapamiento de burbujas de aire en el sedimento por flujos turbulentos relacionados con el oleaje, la actividad algal que implica la existencia de burbujas de gas en el sedimento, o la desecación y precipitación temprana de cementos. La forma de los poros indican el origen de los mismos; los poros más redondeados son el resultado de la formación de burbujas de aire generado por las algas cuando el sedimento está cubierto de agua. En los experimentos de Shinn (1968b) se demostró que las algas no son un factor limitante en la formación de estas estructuras, sin embargo, Aurell *et al.* (2012) ya denotan la presencia de algas *Dasycladaceas* y *Cyanoficeas* en el afloramiento M2.

Los parches de fango, alargados tanto en la horizontal como en la vertical, se deben a la sedimentación y relleno de galerías de bioturbación con material fino en períodos en los que los materiales permaneciesen cubiertos de agua.

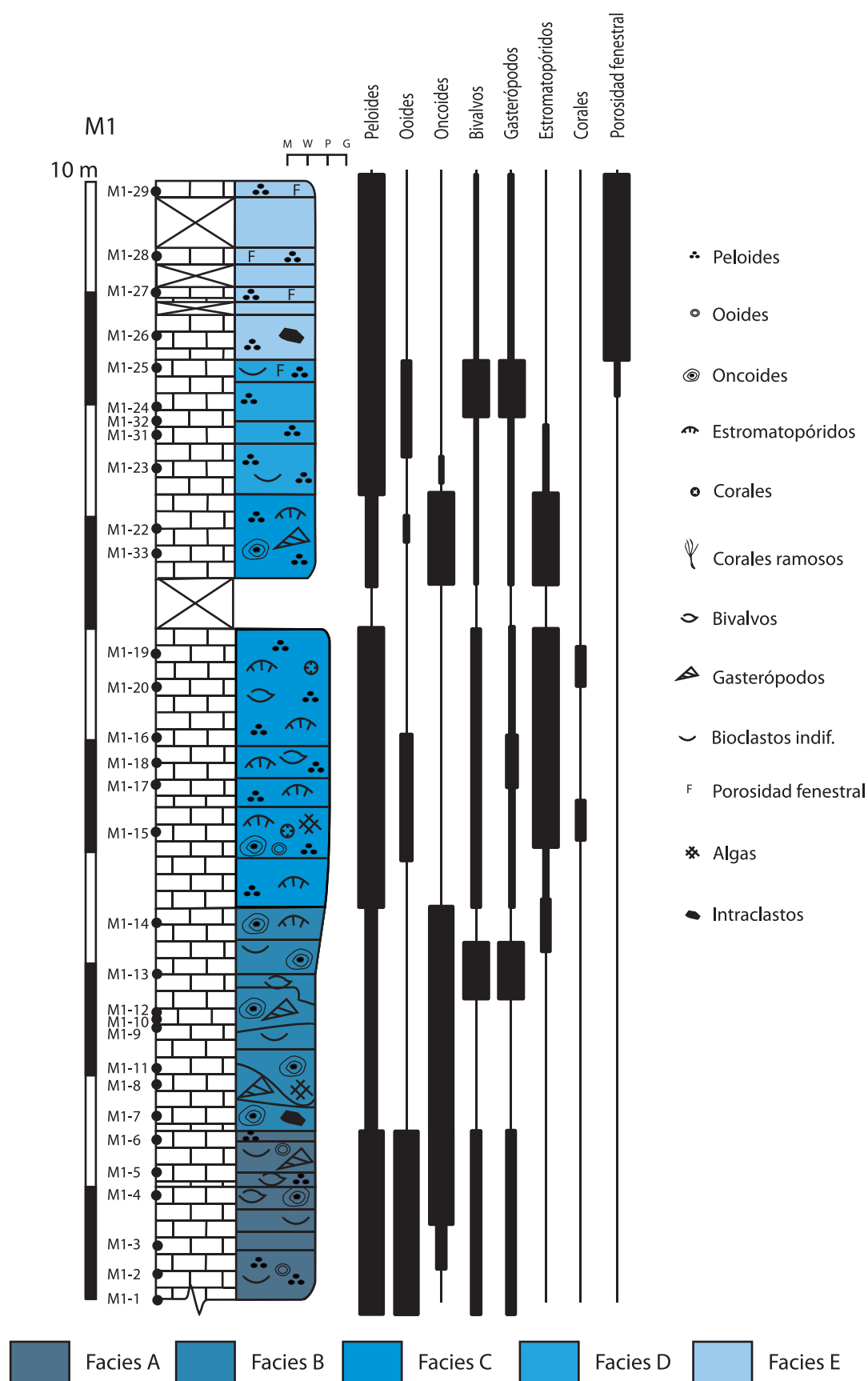


Fig. 6: Columna estratigráfica del perfil de M1, distinguiendo entre las distintas facies y con abundancia relativa de los componentes.

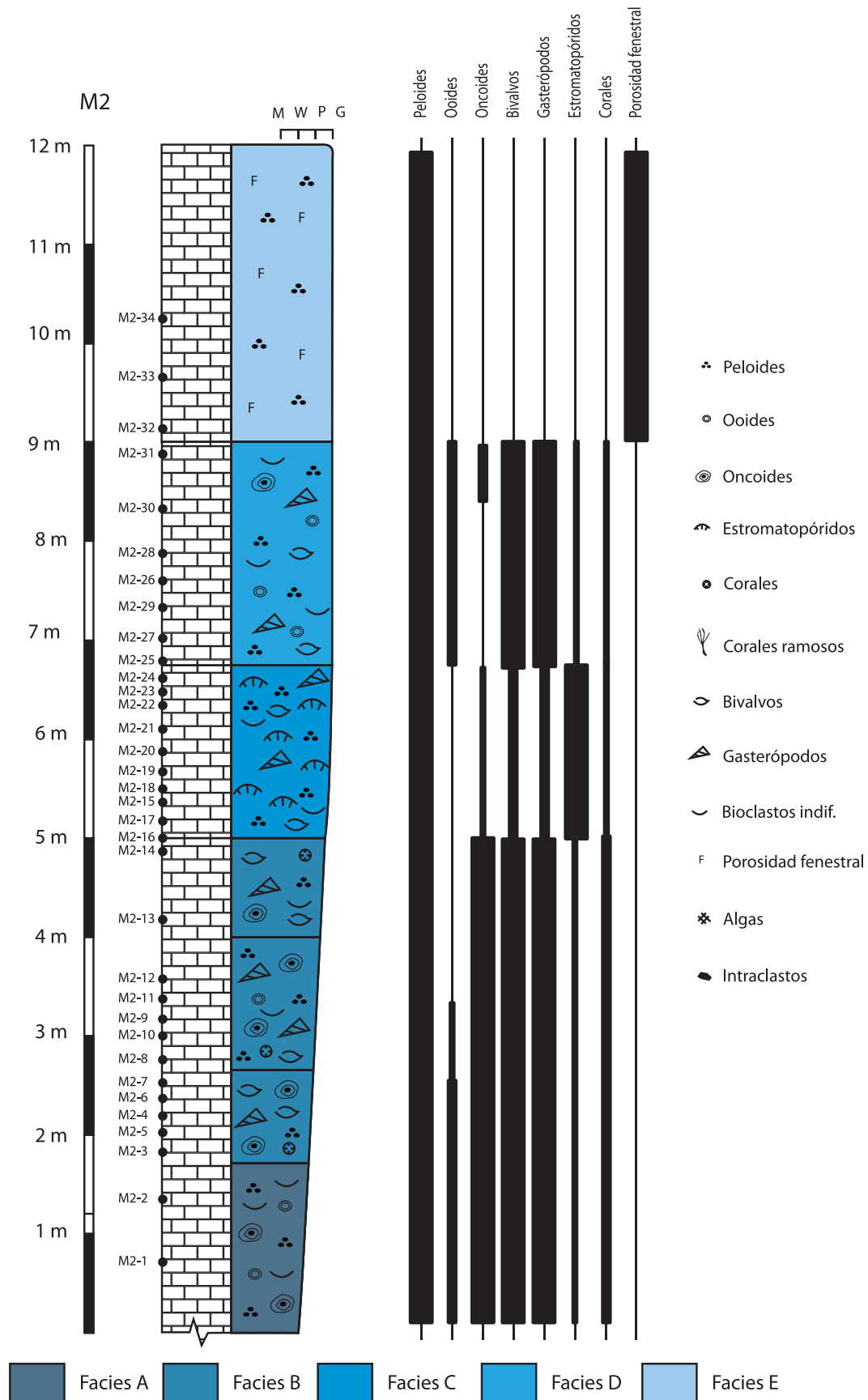


Fig. 7: Columna estratigráfica del perfil de M2, distinguiendo entre las distintas facies y con abundancia relativa de los componentes.

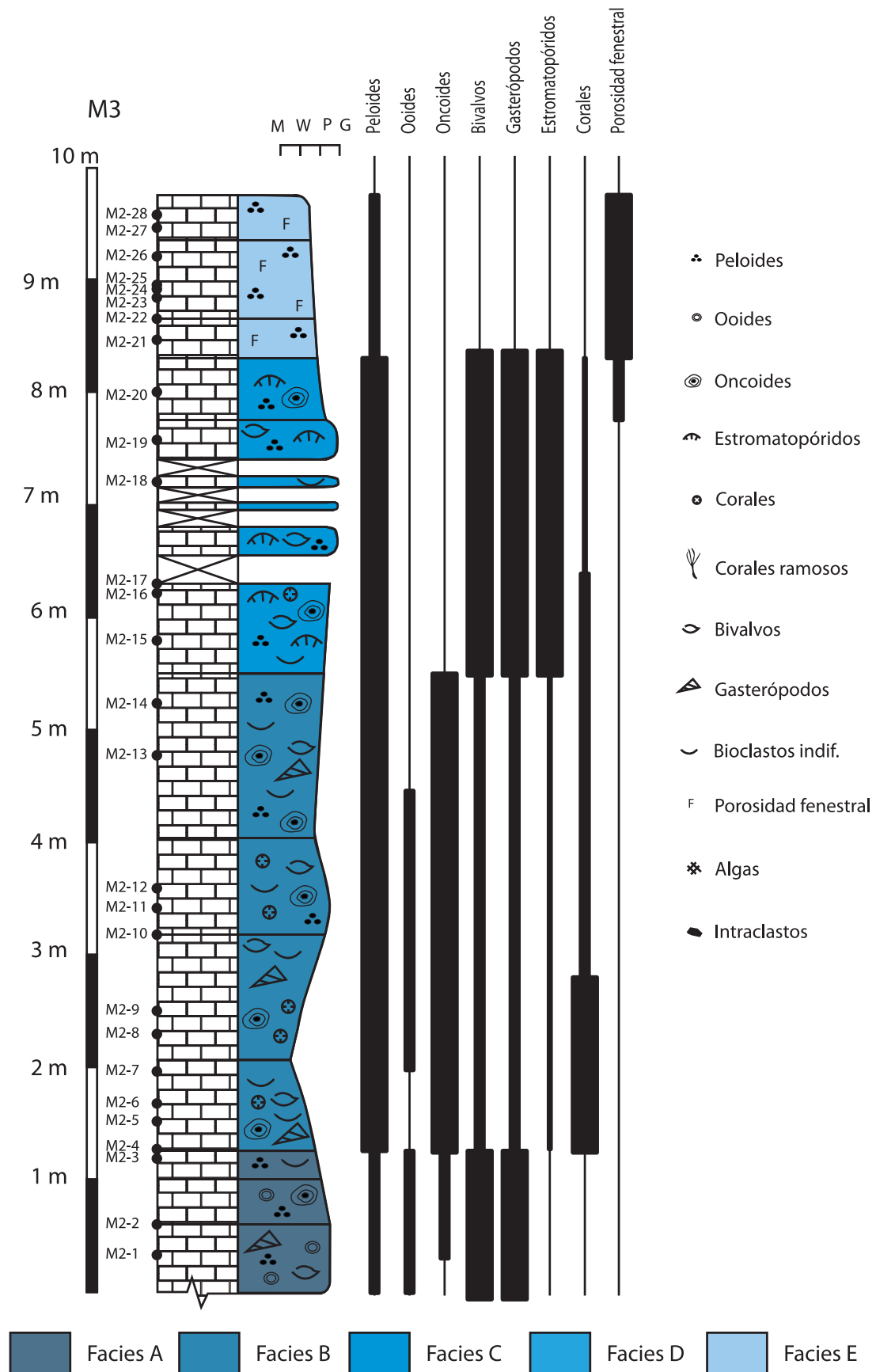


Fig. 8: Columna estratigráfica del perfil de M3, distinguiendo entre las distintas facies y con abundancia relativa de los componentes.

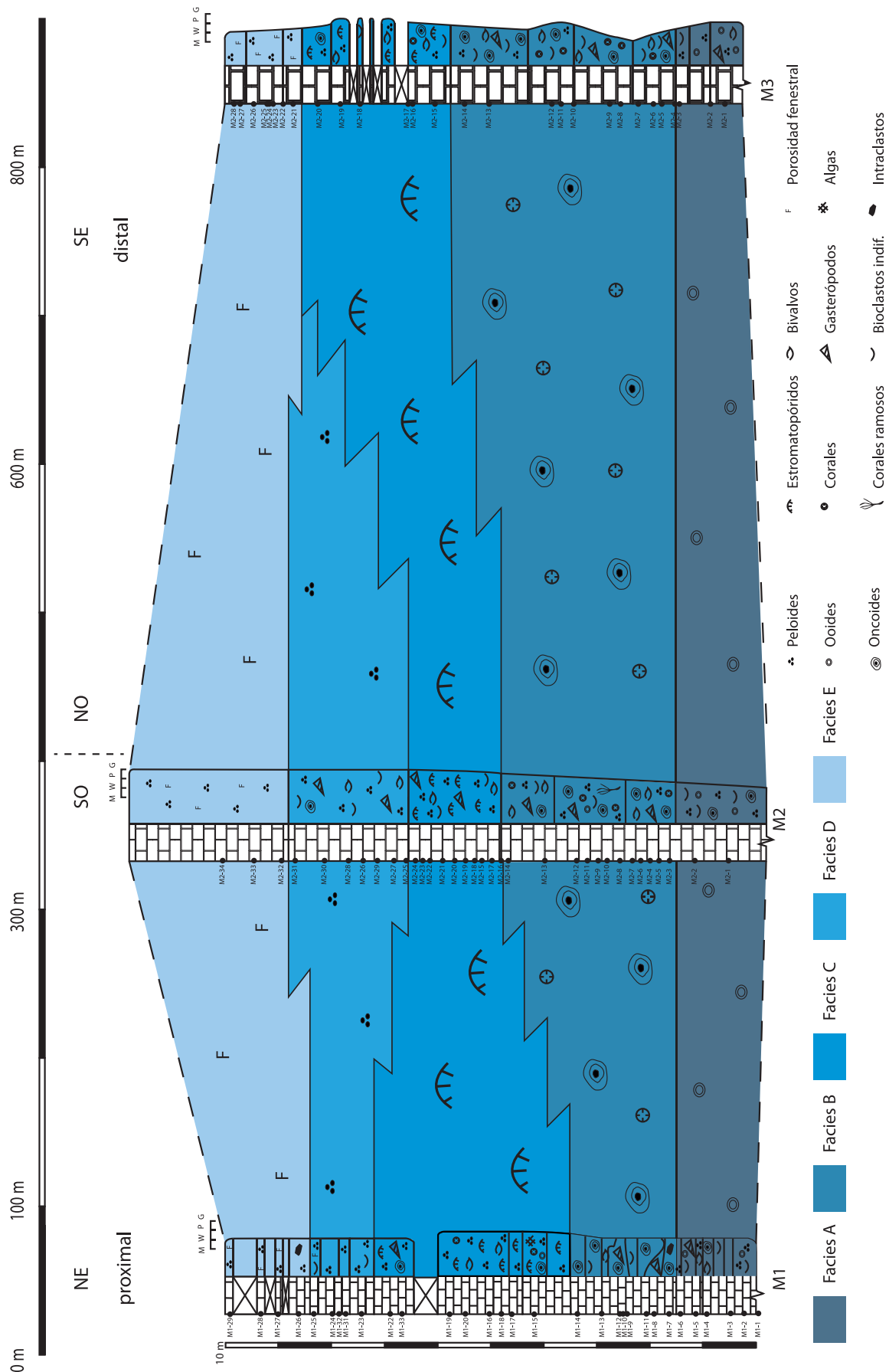


Fig. 9: Correlación entre los tres perfiles estudiados.

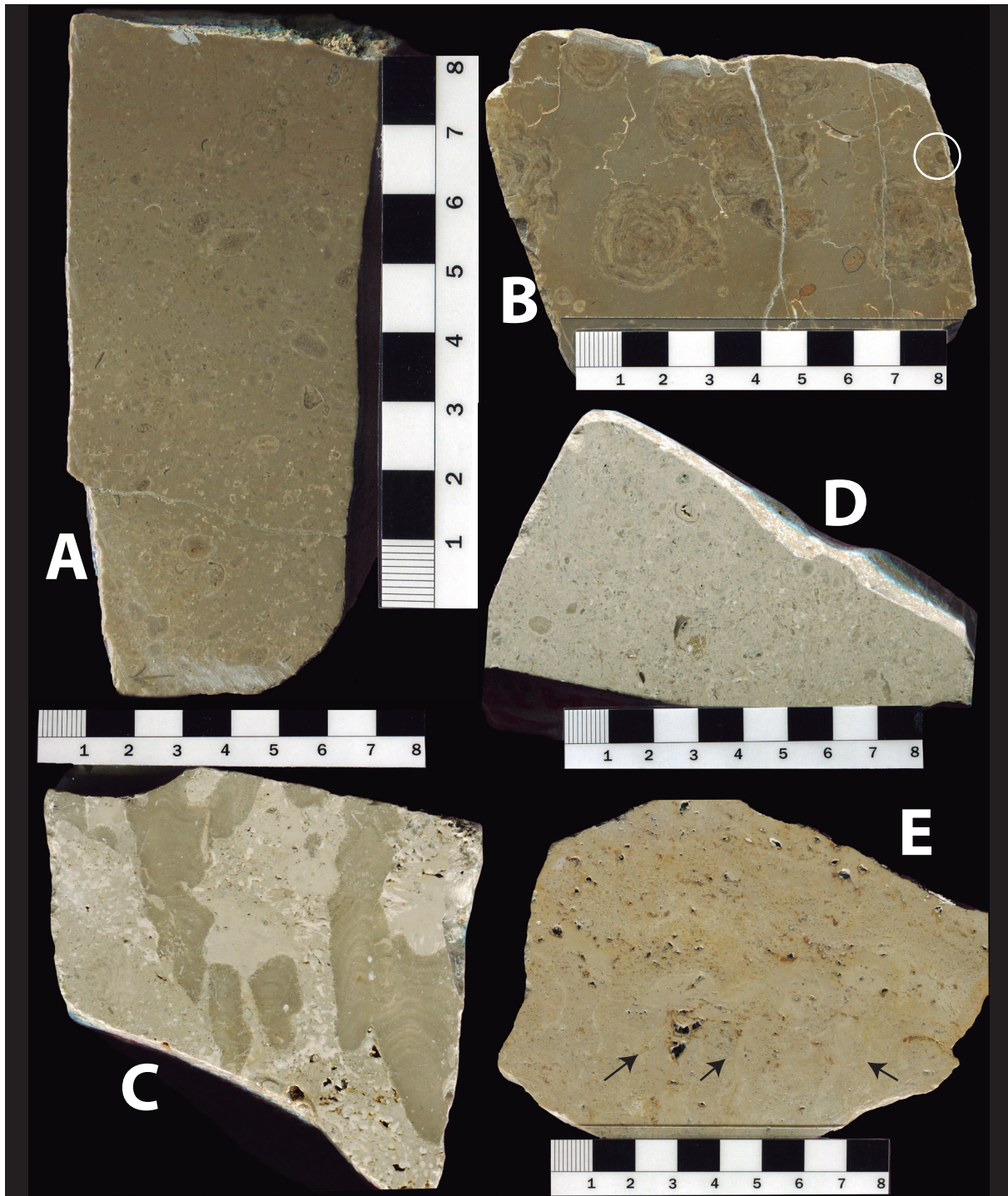


Fig. 10: Secciones pulidas de las muestras más características de cada facies: A. Muestra M1-6, Facies A, donde se pueden observar ooides y otros granos esqueléticos; B. Muestra M1-11, Facies B, con oncolites con alternancia de láminas micríticas y encostrantes y, en la parte derecha (señalado), un fragmento de estromatopórido como núcleo de un oncoide; C. Muestra M2-22, Facies C, en la que abundan los estromatopóridos (más oscuros), pudiéndose observar las bandas de crecimiento, asociados con serpúlidos (blancos); D. Muestra M2-28, Facies D, con ausencia de fango debido a la acción del oleaje y E. Muestra M1-28, Facies E, en la que se muestra la porosidad fenestral, tanto planar como esférica, no conectada entre sí. La muestra tiene zonas alargadas tanto horizontales como verticales (flechas negras) con material fangoso interpretadas como etapas sumergidas y rellenos de bioturbaciones, respectivamente.

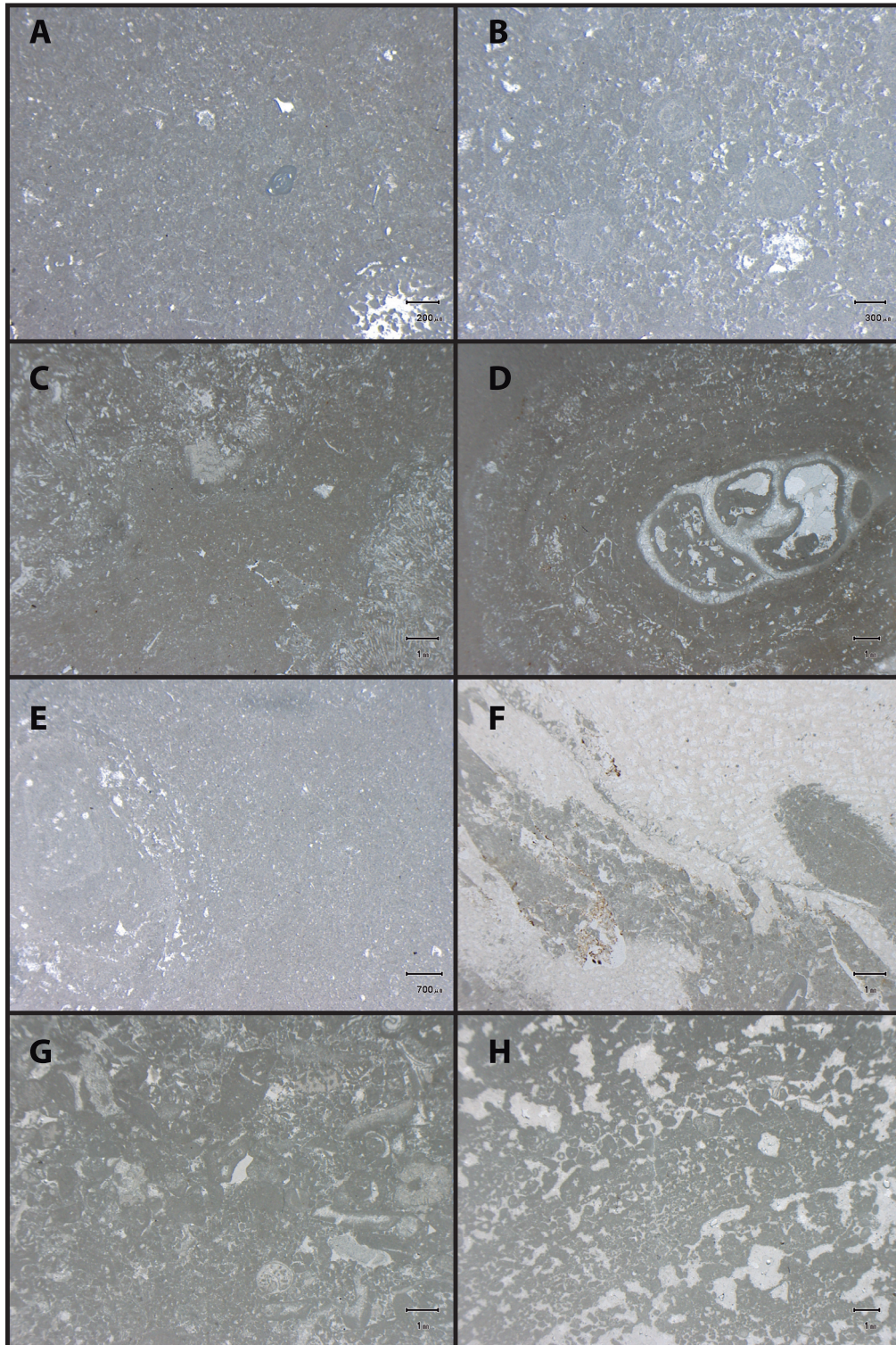


Fig. 11: Láminas delgadas más características de cada facies: A y B. Facies A, en la que se observa una matriz micropeloidal con abundancia de ooides de gran tamaño o microoncooides, además de varios foraminíferos (miliólidos, textuláridos, lituólidos); C. Facies B, alga *Cayeuxia* encostrada en corteza de oncooides; D. Facies B, oncoide de gran tamaño con núcleo bioclástico y corteza con láminas grumosas y micríticas alternadas; E. Facies B, oncoide con núcleo de gran tamaño y corteza con láminas algales, grumosas y micríticas; F. Facies C, estromatopórido de gran tamaño recrystalizado; G. Facies D, muestra granosostenida con abundancia de peloides, bioclastos (moluscos y gasterópodos) y foraminíferos (textuláridos, lituólidos); y H. Facies E con porosidad fenestral, con formas bandeadas.

5. Reconstrucción paleoambiental

En los tres afloramientos en los que se ha levantado una columna estratigráfica se han observado las mismas facies en relación lateral, salvo en M3, donde la Facies C pasa lateralmente a la Facies E y no a la Facies D, como si ocurre en los otros dos afloramientos (*Fig. 9*). Al menos en la zona estudiada, existe una continuidad lateral de los materiales indicativos de una secuencia somerizante, ya que se pasa de medios relativamente abiertos con faunas poco tolerantes a las fluctuaciones de la salinidad (en particular, corales, Facies A y B) a medios más restringidos, dominados por *miliólidos* (Facies D) y medios con evidencias de exposición subaérea intermitente (porosidad fenestral, Facies E).

Aunque debido a las reducidas dimensiones del estudio no se puede realizar una correlación a mayor escala, al menos se pueden delimitar con fiabilidad la extensión y continuidad lateral de las facies, que representan diferentes medios de sedimentación de la secuencia. Se ha tomado como nivel de correlación basal el techo de la Facies A, puesto que presenta una superficie de estratificación clara en los tres perfiles estudiados. De igual modo, la base de la Facies E también se puede interpretar como una línea de correlación prácticamente isócrona a la escala de estudio.

El esquema de distribución de facies (*Fig. 9*) indica que las zonas relativamente más distales de la plataforma se encontraban hacia el Sur. Esta polaridad hacia el Sur viene indicada por la geometría de la Facies B, que se va engrosando hacia partes más distales de la serie, y su paso lateral (hacia el Norte) hacia las Facies equivalentes laterales proximales C y D.

El esquema de reconstrucción paleoambiental (*Fig. 12*) muestra las relaciones laterales de las facies reconstruidas a partir del afloramiento de Mezalocha. Como se ha nombrado antes, existe una barrera formada por un sistema de bajíos oolíticos-oncolíticos hacia partes más distales, que no ha sido abarcada en nuestro estudio, pero que está ampliamente representado en las facies registradas en la parte inferior y media de la *Formación Higuieruelas*.

Mar adentro de los bajíos se encuentran los dominios más internos de la plataforma, que se han dividido en el lagoon y en los dominios litorales. La Facies A represente el dominio más distal o externo del lagoon. Su posición a sombra de los bajíos determina la abundancia relativamente abundante de ooides resedimentados y que los periodos de baja energía sean prolongados, con la acumulación de fango carbonatado. La Facies B ocupa una zona intermedia del lagoon y se caracterizan por el crecimiento de corales ramosos. La Facies C viene definida por la presencia de praderas de estromatopóridos, que aparecen como parches discontinuos en la serie, en una zona de mayor energía próxima al dominio litoral. La Facies D está en relación de cambio lateral-vertical con la Facies C y se engrosa hacia el Oeste y parece estrecharse hacia el Este, debido al predominio de las praderas de estromatopóridos hacia la parte oriental. Así pues, la Facies D es interpretada como un cinturón de facies discontinuo, localizado en los dominios sublitorales de alta energía (*shoreface*) en relación con las facies intermareales (*foreshore*) representadas por las Facies E con porosidad fenestral.

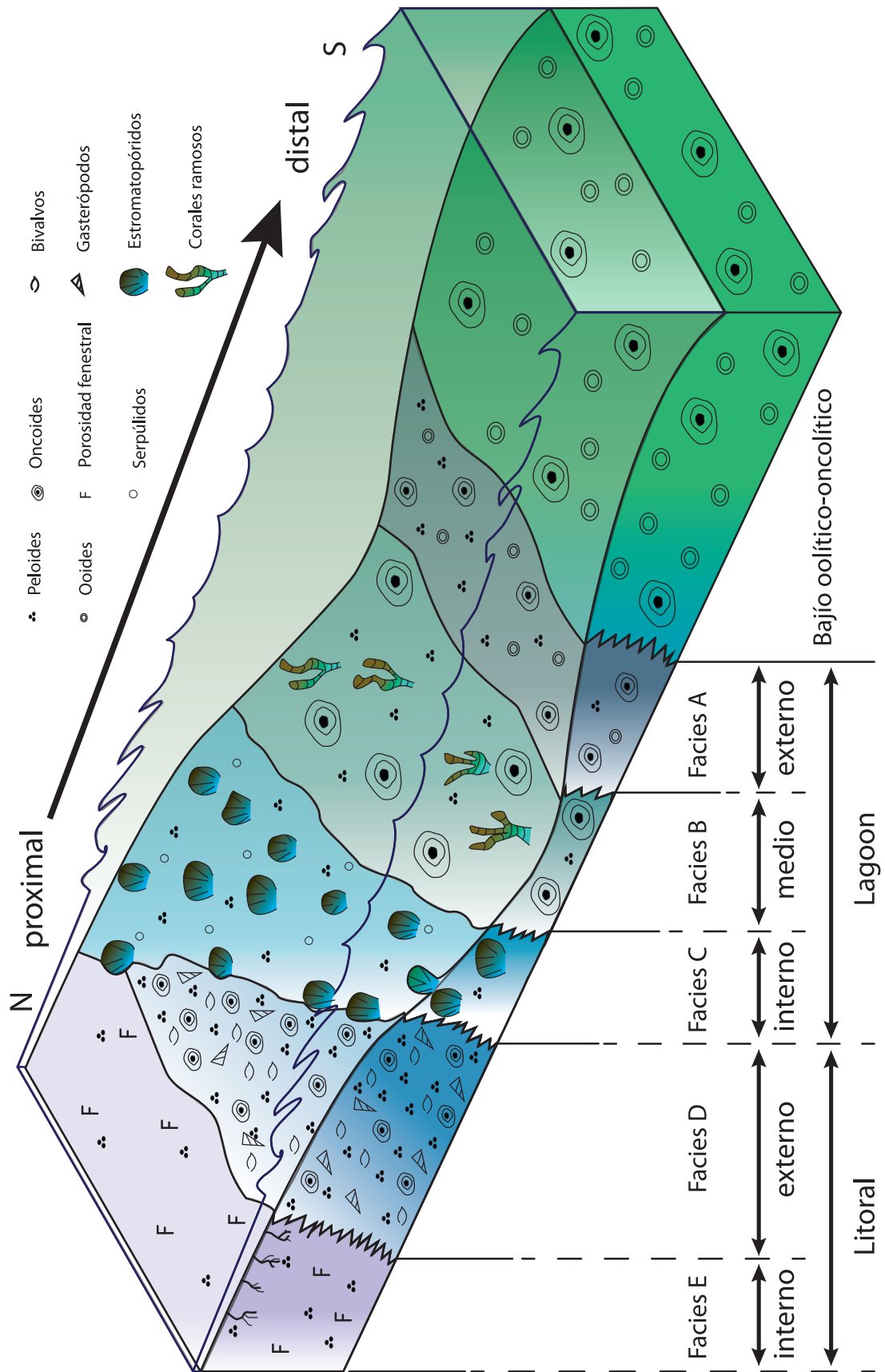


Fig. 12: Reconstrucción paleoambiental y subdivisión en paleoambientes de la parte media de la plataforma carbonatada (lagoon y medio litoral).

En resumen, se podría dividir la zona estudiada en zonas más proximales litorales y zonas relativamente más distales submareales de lagoon protegido. La presencia de oolitos en la Facies A y su ausencia en el resto de la serie sugiere la existencia de una barrera que disipa parte de la energía, protegiendo el dominio submareal y determinando la presencia de un dominio de lagoon con diferentes subambientes; lagoon externo protegido, con parches de fango (Facies A); lagoon medio, con crecimiento de corales ramosos (Facies B) y lagoon interno, con estromatopóridos, desarrollados en una zona próxima al dominio litoral, con una acción más continua del oleaje (Facies C).

6. Discusión: extensión lateral de las facies

La descripción de detalle y la correlación de los tres afloramientos han permitido definir la variación lateral en extensión y espesores de las distintas facies conforme van alejándose o acercándose hacia zonas más distales de la plataforma carbonatada.

Aunque a menor escala, la correlación del presente trabajo pretende conseguir los mismos objetivos que el realizado por Alnazghah *et al.* (2013), tratando de caracterizar las heterogeneidades de las facies en equivalentes estratigráficos a las rocas almacén de las plataformas carbonatadas presentes en las facies del *Arab-D* en Oriente Medio y la *Formación Smackover* en el Golfo de México. En todo caso, para poder definir con mayor precisión la extensión y continuidad lateral de las facies caracterizadas en el presente trabajo, se requeriría abarcar una zona de trabajo más amplia, extendiendo estos análisis hacia zonas más distales de la plataforma carbonatada, y aumentando el intervalo estratigráfico analizado, incluyendo de este modo los bajíos oolíticos-oncolíticos más externos. De este modo, los modelos obtenidos tendrían más aplicabilidad como modelos análogos a los reservorios citados.

En todo caso, la revisión de las características de los almacenes de hidrocarburos del final del Jurásico de Oriente Medio demuestra el potencial de la *Formación Higuieruelas* como análogo de estos reservorios. Las heterogeneidades en la roca (discontinuidades, fracturas, espacios intergranulares, porosidad móldica y fenestral...) actúan como vía de migración de los hidrocarburos, desde las rocas madre hasta rocas almacén, dentro de las propias rocas almacén o incluso desde las rocas madre o almacén hasta la superficie, caso de no existir una trampa y un sello que eviten este escape de hidrocarburos. En el caso de los afloramientos M1, M2 y M3, las facies caracterizadas poseen una serie de propiedades sedimentológicas similares a las que poseen algunas unidades caracterizadas en Arabia Saudí y Qatar por Alsharhan y Nairn (1994), como por ejemplo la *Formación Uwainat*, que presenta hasta un 18% de porosidad móldica formada por la disolución de elementos esqueléticos y una permeabilidad de aproximadamente 15 md (mildarcys). Una de las rocas almacén más prolíficas de Qatar es la *Formación Arab*, en la que se ha caracterizado porosidad ocupada por hidrocarburos generada a partir de casi todos los componentes, tanto esqueléticos como no esqueléticos. La más común es la porosidad móldica por disolución de conchas de moluscos y foraminíferos, pero también la hay por disolución de estromatopóridos y, en algunos casos, de algunos fragmentos de algas. Incluso los *packstone* – *grainstone* de peloides llegan a alcanzar porosidades del 10 al 30 % debido al espacio intergranular, la porosidad intrapartícula y la porosidad móldica.

En las series estudiadas en los afloramientos M1, M2 y M3 se observan algunas facies cuyos elementos coinciden con aquellos que Alsharhan y Nairn (1994) describieron en los reservorios más ricos de Qatar, por lo que se puede realizar una valoración cualitativa de la relación entre los dos lugares.

La Facies A posee algunas zonas con fango, interpretado como el resultado de períodos de calma por encontrarse en un medio externo del lagoon protegido por barreras oolítico-oncolíticas en zonas más distales. La Facies B posee gran cantidad de elementos no esqueletales, como oncoides irregulares y una matriz micropeloidal en su mayoría, por lo que, al igual que la Facies A, no existe mucho potencial de crear porosidad inter- o intrapartícula. Sin embargo, sí que hay mayor potencial de crear porosidad asociada a disolución de granos esqueletales (porosidad móldica).

En las Facies D y E el fango es casi inexistente, y la mayor porosidad se generaría como porosidad móldica, por disolución de elementos esqueletales (bivalvos, gasterópodos, foraminíferos...). En la Facies E, la porosidad fenestral aumenta notablemente su potencial como roca almacén. Sin embargo, si bien la porosidad es alta, la permeabilidad no lo es tanto, puesto que se trata de poros planares y esféricos, en ocasiones de aberturas próximas a 0,5 mm, pero que no están interconectados entre sí, por lo que se alejaría en parecido a los reservorios de hidrocarburos convencionales.

Hasta aquí, las facies estudiadas tienen ciertas similitudes con las rocas almacén en Qatar y Oriente Medio, pero la porosidad rara vez llega a aproximadamente un 9% de las muestras, que es la mínima alcanzada para el caso de la *Formación Arab IV/D* en el campo de Maydan Mahzam (Al Kawari, 1983), manteniendo una permeabilidad considerable. Sin embargo, la Facies C tiene una elevada presencia de estromatopóridos, muchas veces llegando a cubrir el 50% de la muestra. Si estos elementos se disolvieran, formarían una porosidad muy similar a las facies *Arab-D*, en Oriente Medio, en la que los huecos generados por la disolución de estromatopóridos y otros elementos pueden alcanzar un 35% de porosidad. Además de esto, las características paleoambientales son similares a las interpretadas en Mezalocha, con restos esqueléticos compuestos principalmente por estromatopóridos y unos pocos corales, sin crecimiento de costras microbiales, con los corales desarrollándose en medios un poco más profundos que los estromatopóridos (Leinfelder *et al.*, 2005).

7. Conclusion

The study of a continuous outcrop (about 1 km) exposing the Higuieruelas Formation (Lower Tithonian, Upper Jurassic) in the northern limb of the Mezalocha anticline, has allowed the characterization of the vertical and lateral facies distribution of a shallowing upward sequence about 10 m thick developed in a latest Jurassic shallow carbonate platform.

The studied shallowing upward sequence consists of five successive facies intervals (Facies A–E), which were characterized by the different proportion of skeletal and non-skeletal carbonate grains. These facies represent different sedimentary subenvironments located in the innermost part of a shallow carbonate platform, specifically the coastal and lagoonal areas.

This lagoon was protected by an oolitic and oncolitic outer barrier or shoal, not studied in this work.

The lagoon has been divided in: (1) a protected external lagoon, located near the outer shoal, including significant amount of carbonate mud and ooids, which were resedimented from the outer high energy shoal (Facies A); (2) a middle lagoon, characterized by the widespread occurrence of branching corals in growth position and large irregular oncolites, indicating the influence of wave reworking during intermittent high energy events (Facies B) and (3) an inner lagoon, including abundant stromatoporoids, which was developed in a higher energy environment, located in the transition zone to the coastal domain (Facies C).

Within the coastal domain, two subenvironments were identified: (1) a relatively well-sorted carbonate sands dominated by peloids, foraminifera and other bioclasts, which indicates the permanent wave reworking that characterize the subtidal shoreface environment (Facies D); and (2) the presence of fenestral porosity, which is the key argument used to define the facies belt developed in the intertidal foreshore environment (Facies E).

The composition and the observed facies heterogeneities across the studied sequences show the potential use of the Lower Tithonian Mezalocha outcrops as analogues of certain age equivalent hydrocarbon reservoirs of the Arab Fm in the Middle East. However, to go in depth in the understanding of facies heterogeneities within the Higuieruelas Formation addressed in this study, the characterization of lateral facies relationships in a larger area of study is required in order to define more precisely the geometry and the spatial distribution of the facies and thus the sedimentary environments. Further research across the area exposed in the northern limb of the Mezalocha anticline, may provide more complete facies models, which can also be extrapolated to the more distal oolitic and oncolitic shoals of the Higuieruelas Formation, which was covered in this study.

8. Bibliografía

- Al-Awwad, S.F. y Collins, L.B. (2013): Carbonate-platform scale correlation of stacked high-frequency sequences in the *Arab-D* reservoir, Saudi Arabia. *Sedimentary Geology*, 294: 205-218.
- Al Kawari, A.A. (1983): Status of enhanced oil recovery in Qatar reservoirs. En: *Enhanced oil recovery seminar, Qatar 26 Nov – 1 Dec., 1983*, sponsored by OAPEC – Kuwait, 11 pp.
- Alnazghah, M. H., Bádenas, B., Pomar, L., Aurell M. y Morsilli, M. (2013): Facies heterogeneity at interwell-scale in a carbonate ramp, Upper Jurassic, NE Spain. *Marine and Petroleum Geology*, 44: 140-163.
- Alsharhan, A.S. y Nairn, A.E.M. (1994): Geology and hydrocarbon habitat in the Arabian Basin: the Mesozoic of the State of Qatar. *Geologie en Mijnbouw. Dordrecht, The Netherlands*, 72: 265-294.

- Aurell, M. y Meléndez, A. (1986-1987): Sedimentología de la Formación Calizas con oncolitos de Higuieruelas (Malm) en la región de Muel-Belchite (Provincia de Zaragoza). *Acta Geológica Hispánica*, 21-22: 307-312.
- Aurell, M., Meléndez, G., Olóriz, F. (Cords.), Bádenas, B., Caracuel, J., García-Ramos, J.C., Goy, A., Linares, A., Quesada, S., Robles, S., Rodríguez-Tovar, F.J., Rosales, I. Sandoval, J., Suárez de Centi, C., Tavera, J.M. y Valenzuela, M. (2002): Jurassic. En: *The Geology of Spain* (W. Gibbons y T. Moreno, Eds.), *Geol. Soc. (London)*, 213-253.
- Aurell, M., Robles, S., Bádenas, B., Quesada, S., Rosales, I., Meléndez, G. y García-Ramos, J.C., (2003): Transgressive/Regressive Cycles and Jurassic palaeogeography of NE Iberia. *Sedimentary Geology*, 162, 239-271
- Aurell, M. Bádenas, B., Pomar, L., Colombié, C., Caline, B., Ipas, J. Martínez, V., San Miguel, G. y Al-Nazghah, M.H. (2011): The Kimmeridgian-Lower Tithonian Iberian carbonate ramps (Upper Jurassic, NE Spain): architecture, facies distribution and cyclostratigraphy. *Geoguías*, 8: 45-86.
- Aurell, M., Ipas, J., Bádenas, B., y Muñoz, A. (2012): Distribución de facies con corales y estromatopóridos en el dominio interno de una plataforma carbonatada (Titónico, Cordillera Ibérica). *Geogaceta*, 51: 2012.
- Bádenas, B., Aurell, M., Rodríguez Tovar, F.J. y Pardo-Izuzquiza, E. (2003): Sequence stratigraphy and bedding rithyms in an outer ramp limestone succession (Late Kimmeridgian, northeast Spain). *Sedimentary Geology*, 161: 153-174.
- Bádenas, B., Salas, R. y Aurell, M. (2004): Three order of regional sea-level changes control facies and stacking patterns of shallow carbonates in the Maestrat Basin (Tithonian-Berriasian, NE Spain). *Int. Journal of Earth Sciencies*, 93: 144-162.
- Dahanayake, K. (1977): Classification of oncoids from the Upper Jurassic carbonates of the French Jurassic. *Sedimentary Geology*, 18: 337-353.
- Dunham, R.J. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *American Association of Petroleum Geologist Memoir*, 1: 108-121.
- Embry, A.F. y Klován, J.E. (1971, 1972): A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin Canadian Petroleum Geology*, 33: 730-781.
- Flügel, E. (2004): Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. *Springer-Verlag, Berlin*, 976 pp.
- Ipas, J., Aurell, M. y Bádenas, B. (2004): Ambientes sedimentarios y secuencias den la Fm. Higuieruelas (Jurásico Superior) en la Cordillera Ibérica Septentrional. *Geogaceta*, 35, 7-10.
- Leinfelder, R.R., Schlagintwelt, F., Werner, W., Ebli, O., Nose, M., Schmid, D.U. y Hughes, G.W. (2005): Significance of stromatoporoids in Jurassic reefs and carbonate platforms – concepts and implications. *Facies*, 51: 287-325.

- Lindsay, R.F., Cantrell, D.L., Hughes, G.W., Keith, T.H., Mueller III, H.W. y Russell, S.D. (2006): Ghawar *Arab-D* Reservoir: Widespread Porosity in Shoaling-upward Carbonate Cycles, Audi Arabia. En: Giant hydrocarbon reservoirs of the world: From rocks to reservoir characterization and modeling (*Harris, P.M. y Weer, L.J., Eds.*). *AAPG Memoir 88/SEPM Special Publication*: 97-137.
- San Miguel, G., Aurell, M., Bádenas, B., Martínez, V., Caline, B., Pabian-Goyheneche, C., Rolando, J.P. y Grasseau, N. (2013): Facies heterogeneity of a Kimmeridgian carbonate ramp (Jabaloyas, Eastern Spain): a combined outcrop and 3D geomodelling analysis. *Journal of Iberian Geology*, 39(2): 233-252.
- Shinn, E.A. (1968): Practical significance of birdseye structures in carbonate rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, 38(1): 215-223.

