

EVOLUCIÓN SEDIMENTARIA Y DIAGENÉTICA DE LOS COMPLEJOS ARRECIFALES KIMMERIDGIENSES DE LA CUENCA DE CAMEROS. LA RIOJA-SORIA

M. ISABEL BENITO¹ Y RAMÓN MAS²

RESUMEN

En el área de Cameros, y durante el Kimmeridgiense inferior, se desarrollaron abundantes arrecifes de coral pertenecientes a la Fm. Torrecilla en Cameros. Los arrecifes están mejor desarrollados en tres sectores de la cuenca: el sector de Torrecilla, al norte y los sectores de Soria y Bigornia, al sur.

La sedimentación de la Fm. Torrecilla en Cameros en estos tres sectores tuvo lugar en una plataforma carbonática que era afectada por frecuentes tormentas. El desarrollo y evolución de los arrecifes estuvo controlado tanto por el eustatismo positivo como por la tectónica local. En el Kimmeridgiense superior la unidad arrecifal quedó expuesta en superficie, por lo que predominaron los procesos diagenéticos meteóricos. Durante el rifting finijurásico-eocretácico que dio lugar a la formación de la Cuenca de Cameros, la evolución diagenética en Soria y Torrecilla fue similar y estuvo controlada por el enterramiento de la unidad arrecifal y la precipitación de calcita ferrosa. En Bigornia la diagénesis estuvo todavía controlada por la acción de las aguas meteóricas. En el Cretácico Medio-Superior y asociada al metamorfismo hidrotermal de la cuenca precipitó anquerita barroca en los tres sectores. Durante la compresión alpina, y en el sector de Torrecilla, se produjo la precipitación de mineralizaciones de tipo Mississippi-Valley asociadas a la llegada de hidrocarburos. Una vez exhumada de nuevo la unidad arrecifal durante el terciario se produjo el remplazamiento de la anquerita y la calcita ferrosa, inestables bajo condiciones meteóricas, por calcita no ferrosa y rica en inclusiones de óxido de hierro.

Palabras clave: Sedimentología, diagénesis, geoquímica, plataforma carbonática, arrecifes, Jurásico superior, Cuenca de Cameros

1. Investigadora contratada.

2. Catedrático de Universidad. Dpto. Estratigrafía-U.E.I. Correlaciones Estratigráficas. Facultad CC Geológicas-Instituto de Geología Económica. UCM-CSIC.

This work deals with sedimentary and diagenetic evolution of the reefal Torrecilla en Cameros Formation (early Kimmeridgian) in three different sectors of the Cameros Basin: the Torrecilla sector to the north, and Bigornia and Soria sectors, to the south.

Sedimentation of this unit occurred on a shallow carbonate ramp affected by frequent storms. The development of coral reefs complexes was controlled by eustatic sea-level rise and tectonism. In the late Kimmeridgian, reefal sequence was subaerial exposed, so meteoric diagenetic processes predominated. During the Late Jurassic-Early Cretaceous period of rifting that gave rise to the formation of the Cameros Basin, the diagenetic evolution in Soria and Torrecilla was similar. This evolution was controlled by burial of the reefal unit, so ferroan calcite precipitated. In Bigornia, reefal sequence was only slightly buried, so diagenesis was still controlled by meteoric waters. During Mid-Late Cretaceous times, saddle ankerite precipitated in response to the hydrothermal metamorphism that affected the Cameros Basin. Following alpine contraction and, in the Torrecilla area, Mississippi-Valley -type mineralizations precipitated in association with hydrocarbons. Moreover, and due to the tectonic uplift, the reefal unit was again subaerial exposed. This provoked that ankerite and ferroan calcite, unstable under meteoric conditions were replaced by non-ferroan cloudy calcite under meteoric conditions.

Keywords: Sedimentology, diagenesis, geochemistry, carbonate platform, reefs, Late Jurassic, Cameros Basin

0. INTRODUCCIÓN. CONTEXTO GEOLÓGICO

Durante el Kimmeridgiense, en gran parte de la Cuenca Ibérica, donde se enmarca el área de Cameros, se desarrollaron amplias plataformas carbonáticas de tipo rampa. Durante este periodo de tiempo la Cuenca Ibérica, perteneciente al Dominio Tethysiano, estaba conectada con la Cuenca Vasco-Cantábrica, perteneciente al Dominio Boreal, a través del Estrecho de Soria (Bulard, 1972) que se situaba entre los macizos Ibérico y del Ebro (Fig. 1A) (Alonso et al., 1990; Bádenas et al., 2001). En concreto, la sedimentación durante el Kimmeridgiense inferior se caracterizó en el margen occidental de este estrecho por el desarrollo de arrecifes de coral pertenecientes a la Formación Torrecilla en Cameros (Alonso et al., 1990), unidad en la que se enmarca este trabajo.

El Kimmeridgiense fue un periodo de tiempo caracterizado por una subida global del nivel del mar (Vail et al., 1977; 1984; Haq et al., 1988; Hallam, 1988), tendencia que también se observa a lo largo de la Cuenca Ibérica (Alonso et al., 1986-1987; Alonso et al., 1990; Aurell et al., 1993; 1995; 2004, Bádenas et al., 2001).

A partir del Kimmeridgiense superior y durante el Titónico tuvo lugar una progresiva retirada del mar de la Cuenca Ibérica hacia el sureste y hacia el norte producida tanto por un descenso eustático como por la tectónica, de régimen extensivo, que afectó a esta zona de la Cuenca Ibérica y que, entre otras, dio lugar a la formación de la Cuenca de Cameros (Alonso et al., 1990; Mas et al., 1993; Aurell et al. 1994; Bádenas et al., 2001; Salas et al., 2001) (Fig. 1B).

La Cuenca de Cameros se desarrolló en el contexto del rifting ibérico finijurásico-eocretácico. Esta cuenca tiene unas particularidades que la hacen ser única en el ámbito de la Cordillera Ibérica. Por un lado el registro estratigráfico desde el Titónico al Albiense inferior llega a ser de hasta 9000 m en las zonas depocentrales (que representan hasta 5000 m de potencia acumulada de sedimentos en la vertical) (Mas et al., 1993; Mas et al., este volumen). Por otro lado, estos materiales fueron afectados por un metamorfismo de bajo grado y de carácter hidrotermal, en su sector nororiental (Casquet et al., 1992; Mas et al., 1993; Barrenechea, et al., 1995; 2000; Alonso-Azcárate et al., 1995; 1999a; 1999b, Mantilla Figueroa, 1999; Mas et al., este volumen).

El relleno de la Cuenca de Cameros está constituido por depósitos de carácter continental, con sólo pequeñas incursiones marinas (Mas et al., 1993; Arribas et al., 2003; Mas et al., este volumen). Estos depósitos se apoyan discordantemente sobre los depósitos del Jurásico marino, que comúnmente corresponden a los arrecifes de la Fm. Torrecilla en Cameros. Esta discontinuidad se presenta en toda la cuenca en forma de superficies erosivas, paleosuelos y paleokarstificaciones.

Por esta razón, la importancia de realizar este estudio no sólo radica en comparar la evolución sedimentaria de los complejos arrecifales en las distintas áreas de la Cuenca Cameros, sino que, debido a que la Fm. Torrecilla en Cameros constituye la base sobre la que se apoyan los depósitos continentales de la cuenca, en ella han quedado registrados todos los procesos diagenéticos ocurridos posteriormente durante el desarrollo, metamorfismo e inversión de la Cuenca de Cameros. En concreto, el estudio de la diagénesis ha resultado fundamental a la hora de esclarecer los procesos ocurridos en la cuenca durante los periodos de tiempo en los que no existe registro sedimentario.

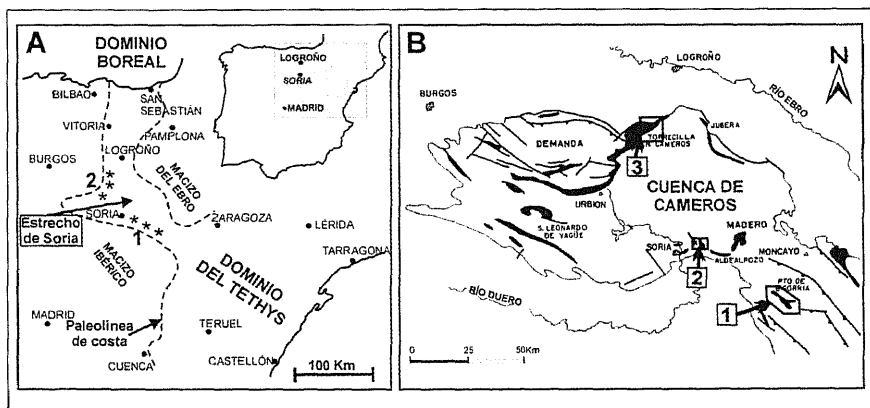


Fig. 1. A. Paleogeografía del NE de la Iberia durante la sedimentación de la Fm. Torrecilla en Cameros (Kimmeridgiense inferior). La localización de las áreas en las que predominan los arrecifes de coral se ha representado mediante asteriscos: 1. Región sur (sectores de Bigornia y Soria). 2. Región norte (sector de Torrecilla). Modificada de Alonso et al. (1990). **B.** Esquema geológico del área de Cameros en el que se han representado los afloramientos del Jurásico marino (en color negro) y los sectores estudiados: 1. Sector de Bigornia, 2. Sector de Soria, 3. Sector de Torrecilla.

El Jurásico marino, y en concreto, la Fm. Torrecilla en Cameros no aflora en las áreas más internas de la cuenca, por lo que su estudio sedimentológico y diagenético se ha llevado a cabo en tres sectores de la cuenca: el sector de Torrecilla, situado al norte de la cuenca, y los sectores de Bigornia y Soria, situados al sur (Fig. 1B). En los tres sectores, la Fm. Torrecilla en Cameros presenta un carácter predominantemente arrecifal. Además, en cada uno de ellos el espesor de sedimentos acumulados sobre ella es distinto, por lo que se ha podido realizar el estudio comparativo de su evolución diagenética. El sector de Bigornia se sitúa fuera (aunque próximo) del ámbito de la Cuenca de Cameros (Fig. 1B) y el espesor de sedimentos acumulados desde al Titónico al Cretácico Superior no superaron los 1500 m (Alonso et al., 1988; 1990; 1993; Guimerá et al., 2004). El sector de Soria se sitúa al sur de la Cuenca de Cameros (Fig. 1B) y en él el espesor de sedimentos acumulados desde el Titónico al Cretácico no fue superior a los 3000 m (Alonso et al., 1993; Mas et al., 1993, Guimerá et al., 1995). El sector de Torrecilla está situado al norte de la cuenca (Fig. 1B) y en él la potencia de sedimentos acumulados desde el Titónico y hasta el Cretácico superior pudo llegar hasta 3500 m (Alonso et al., 1993; Mas et al., 1993; Guimerá et al., 1995), correspondiendo al máximo espesor que ha podido ser encontrado en las áreas en las que aflora la unidad arrecifal.

Este trabajo se ha basado, además de en las observaciones de campo, en el estudio petrográfico y geoquímico detallado de la unidad arrecifal. Para ello se ha llevado a cabo el estudio petrográfico de más de 500 láminas delgadas. Todas las láminas delgadas fueron examinadas mediante un microscopio de polarización acoplado a un equipo de catodoluminiscencia (CL) y fueron teñidas con Alizarina roja S y ferricianuro potásico. Posteriormente, y basándose en las imágenes obtenidas con CL, se realizaron los análisis microtermométricos y geoquímicos (elementales e isotópicos) de las distintas generaciones de carbonatos, directamente sobre láminas delgadas de 150 a 200 micras de espesor (Benito, 2004).

1. EVOLUCIÓN SEDIMENTARIA DE LOS COMPLEJOS ARRECIFALES DE LA FM. TORRECILLA EN CAMEROS

Los complejos arrecifales de la Formación Torrecilla en Cameros se desarrollaron en el área del Estrecho de Soria durante el Kimmeridgiense inferior (Benke et al., 1981; Conze et al., 1984; Errenst, 1990; 1991) y pertenecen a la secuencia deposicional Kimmeridgiense J3.5 definida en la Cuenca Ibérica por Aurell et al. (2000).

Los arrecifes están mejor desarrollados en el área sureste del Estrecho de Soria (sectores de Bigornia y Soria) y hacia el norte, en los alrededores de Torrecilla en Cameros (Figs. 1A, 2), y su geometría estuvo controlada tanto por el ascenso eustático que se estaba produciendo durante el Kimmeridgiense inferior, como por los movimientos tectónicos locales durante este periodo (Alonso et al., 1986-1987; Mas et al., 1997; Benito, 2004). De este modo, en los sectores situados al sur, la geometría de los arrecifes estuvo dominada por una acreción vertical y hacia mar adentro (Fig. 2B), lo cual sugiere que, a pesar de la acción combinada del eustatismo y la subsidencia, las altas tasas de producción de carbonatos controlaron en su conjunto el crecimiento agradante y progradante de los complejos arrecifales en esta zona (Mas et al., 1997; Benito et al., 2001; Benito et al., 2002). Sin embargo, al norte,

en el sector de Torrecilla, predominó la acreción frontal en los arrecifes que, además, desarrollaron geometrías de *off-lap* y *down-lap* en respuesta a la tectónica local (Alonso et al., 1986-1987; Mas et al., 1997) (Fig. 2A).

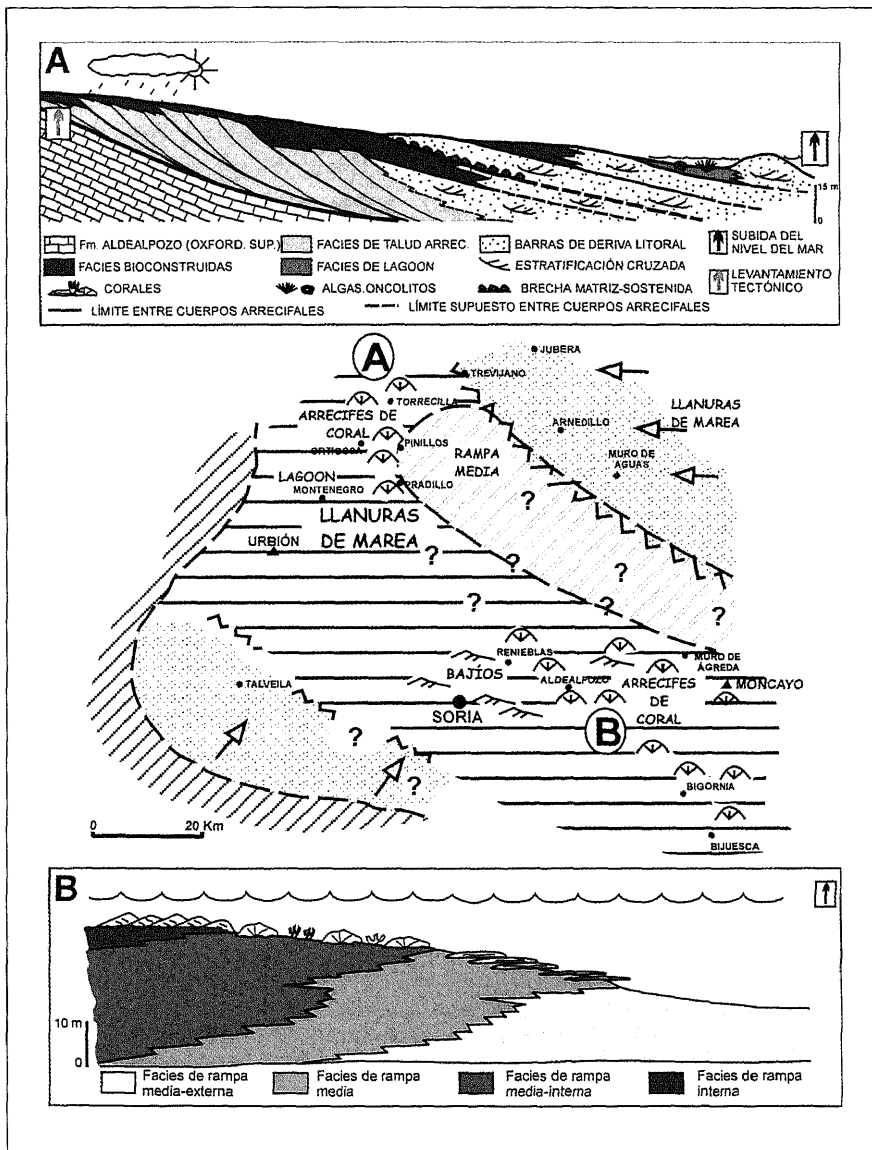


Fig. 2. Esquema paleogeográfico durante la sedimentación de la Fm. Torrecilla en Cameros en el área del Estrecho de Soria y esquemas de la evolución sedimentaria en las regiones norte (A) y sur (B) del estrecho.

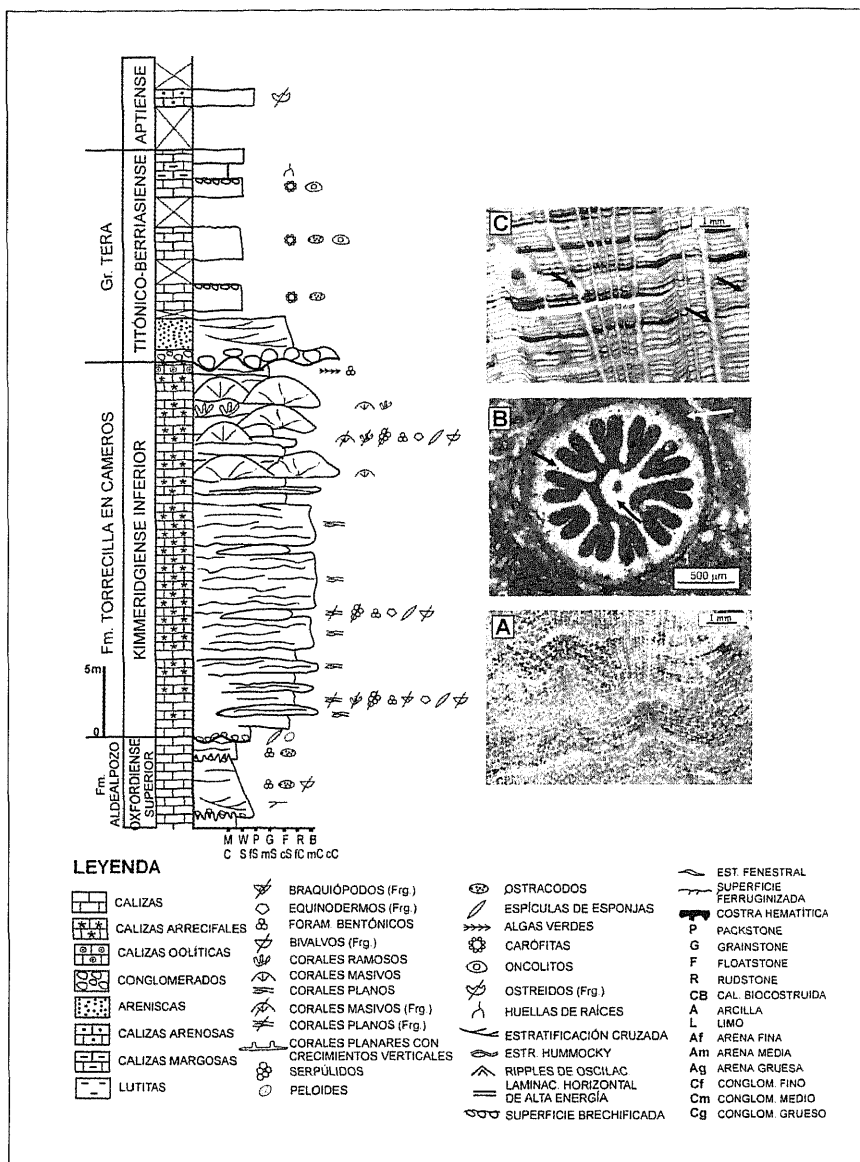


Fig. 3. Columna estratigráfica simplificada de la Fm. Torrecilla en Cameros en el Sector de Bigornia. **A.** Detalle de un coral de morfología planar (*Microsolena*) procedente de la parte baja-media de la unidad. **B.** Colonia ramosa delicada de *Stylosmilia* procedente de la parte alta de la unidad arrecifal. El esqueleto del coral está disuelto y en su lugar ha precipitado un cemento de calcita en mosaico (flechas negras). Existe un encostramiento micrítico alrededor del coral (flecha blanca). **C.** Colonia dómica de *Clausastraea* procedente de la parte alta de la unidad. La porosidad primaria está parcialmente rellena de micrita peloidal (flechas blancas). El esqueleto está disuelto y tanto la porosidad primaria (no rellena de micrita) como la porosidad móldica está cementada por calcita en mosaico (flechas negras).

En el sector de Bigornia (Figs. 2, 3) la sedimentación de la Fm. Torrecilla en Cameros comenzó en una zona media-externa de la rampa, en la que se depositaron *packstone* de espículas de esponja y peloides y en la que posteriormente se desarrolló un sistema arrecifal progradante que era afectado por frecuentes episodios de tormenta (Benito, 2004). La mayor parte del desarrollo arrecifal tuvo lugar en una zona media de la rampa donde existió una componente importante de acreción vertical y donde la relación facies bioconstruidas/sedimento alóctono fue muy alta (hasta el 70% del volumen total está formado por corales en posición de vida). Durante esta etapa predominaron las colonias de corales laminares y planas, principalmente de corales microsolenidos (Fig. 3A), adaptados a condiciones ambientales de baja luminosidad y baja energía. Progresivamente fueron predominando las colonias de corales dómicas y ramosas delicadas que, por otro lado, pueden presentar incrustaciones algales y microbianas incipientes (Fig. 3B-C). Estas colonias se desarrollaron en una zona media-interna de la rampa en la que el material alóctono, más abundante que en la etapa anterior, presenta muestras de retrabajamiento por el oleaje (Benito, 2001). La sedimentación marina del Jurásico en este sector finalizó con el depósito de barras oolíticas submareales en una zona de rampa interna.

En el Sector de Soria (Figs. 2, 4) la Fm. Torrecilla en Cameros es más potente y la relación facies alóctonas/facies bioconstruidas es máxima. En este sector se diferencian tres episodios principales de evolución netamente diferenciados (Benito, 2004). La sedimentación de la Fm. Torrecilla en Cameros comenzó en una zona interna-media de la rampa dominada por las tormentas, de tendencia retrogradante, y con gran cantidad de aportes siliciclásticos (Fig. 4). La sedimentación continuó con el desarrollo de colonias de corales, con abundantes depósitos de tormenta intercalados que, en conjunto, presentan una tendencia progradante. Esta tendencia queda reflejada por el cambio en la morfología de los corales y por el grado de retrabajamiento de los depósitos intercalados entre las colonias de coral. Durante el comienzo de esta etapa, la sedimentación se produjo en una zona de rampa media en la que se desarrollaron colonias laminares y planas intercaladas entre depósitos de tormenta (Fig. 4A) sin signos de retrabajamiento por el oleaje. Progresivamente la sedimentación tuvo lugar en una zona media-interna de la rampa donde predominaron las colonias planas con crecimientos pseudoramosos, las colonias ramosas (robustas y en menor proporción delicadas) y algunas colonias dómicas. Los depósitos de tormenta intercalados entre estas colonias de coral presentan signos de retrabajamiento por el oleaje. Finalmente fueron dominando las colonias masivas y faceloides delicadas, que crecieron en una zona de rampa media-interna, sobre las que se desarrollaron incrustaciones algales y microbianas (Fig. 4B). La sedimentación de la Fm. Torrecilla en Cameros en este sector finalizó con el depósito de barras oolíticas (Fig. 4C) sobre las facies arrecifales. La migración de estas barras, con muy poco contenido en siliciclásticos (al contrario que en el Sector de Bigornia), se produjo sobre todo durante los episodios de tormenta, aunque durante las últimas etapas de sedimentación estos depósitos oolíticos fueron también retrabajados por la acción del oleaje en tiempo normal.

En el sector de Torrecilla (Figs. 2, 5), y al contrario que en los dos sectores descritos anteriormente, se desarrolló un sistema arrecifal franjeante en el que tuvo lugar la formación de varios cuerpos arrecifales progradantes adosados lateralmente (Fig. 5). Durante las primeras etapas de desarrollo arrecifal, la sedimentación se

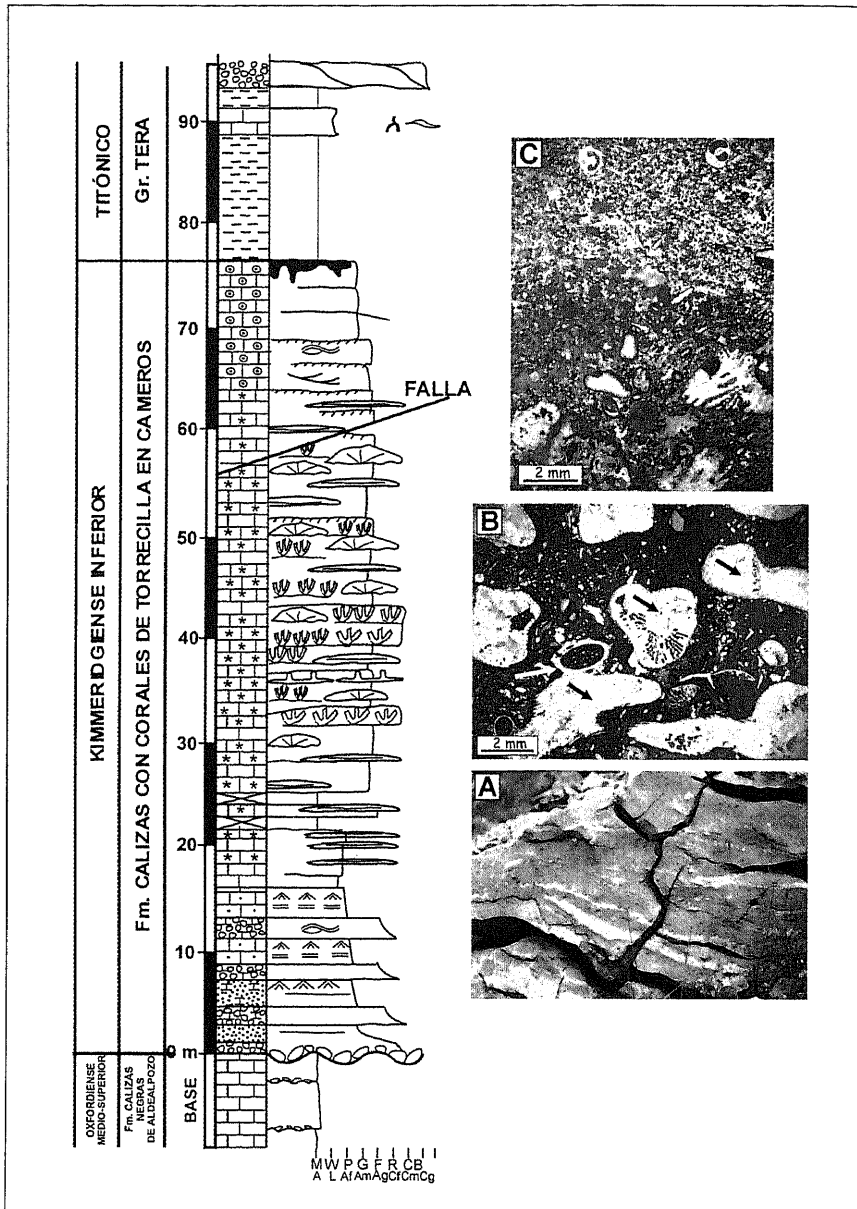


Fig. 4. Columna estratigráfica simplificada de la Fm. Torrecilla en Cameros en el Sector de Soria (la leyenda es la misma que para la figura 3). **A.** Colonias de corales laminares de la parte baja-media de la unidad, por encima de los depósitos siliciolásticos. **B.** Colonia ramosa delicada procedente de la parte media de la unidad arrecifal. El esqueleto de los corales se encuentra disuelto y en su lugar ha precipitado un cemento de calcita en mosaico (flechas negras). Serpúlidos y micrita densa encostran los corales (flecha blanca). **C.** Calizas oolíticas procedentes de la parte alta de la unidad. Nótese la gradación positiva de este depósito.

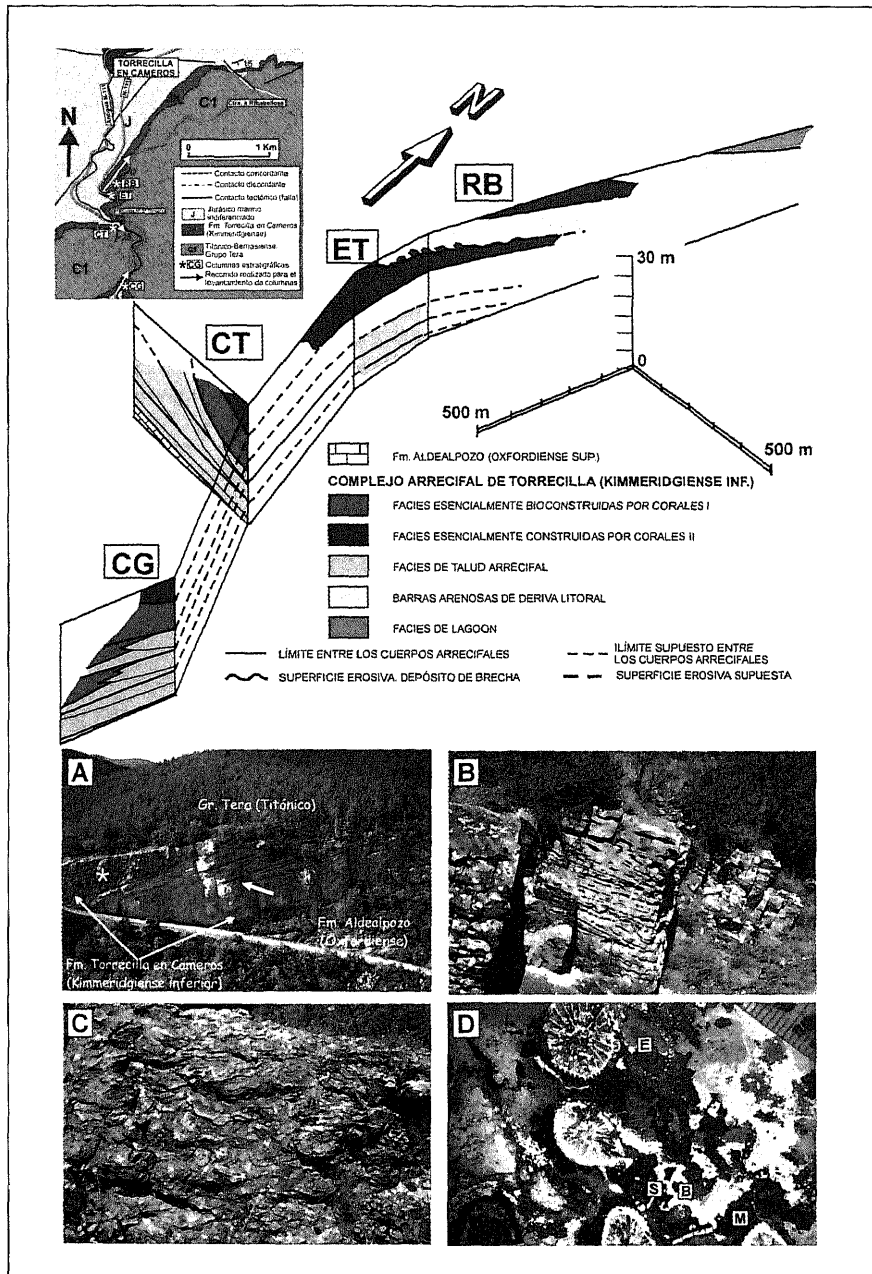


Fig. 5. Panel esquemático de correlación entre las distintas facies observadas en las columnas estratigráficas realizadas en la Fm. Torrecilla en Cameros en el Sector de Torrecilla (el esquema adjunto muestra la localización de cada una de las columnas). **A.** Panorama de los primeros cuerpos arrecifales desarrollados en el sector de Torrecilla, mostrando cliniformas y relaciones de *down-lap* (flecha

produjo en una plataforma con ruptura de pendiente distal donde los arrecifes desarrollaron clinofomas y geometrías de *down-lap* y *off-lap* (Alonso et al., 1986-1987; Benito, 2001) (Figs. 2A, 5A). Estos arrecifes se caracterizan por tener un importante desarrollo de las facies de talud arrecifal, por la escasa cantidad de colonias de coral en posición de vida, ya que en su mayor parte se encuentran rotas y retrabajadas, y por el escaso desarrollo de organismos incrustantes (Fig. 5: facies bioconstruidas por corales I). Progresivamente comenzaron a desarrollarse barras submareales de deriva litoral con abundantes terrígenos en una zona de rampa interna con poca pendiente (Figs. 2, 5B). Estas barras dejaban por detrás zonas protegidas y someras en las que crecieron abundantes colonias de coral. Estos arrecifes, al contrario que los desarrollados anteriormente, se caracterizan por la ausencia de facies de talud arrecifal, la gran proporción de corales en posición de vida (hasta un 70 % del volumen total), los bajos volúmenes de sedimento alóctono (que contiene gran cantidad de material siliciclástico) y el gran desarrollo de organismos incrustantes y microbialitas (Fig. 5: facies bioconstruidas por corales II). Durante las últimas etapas de evolución la sedimentación se caracterizó por la formación de lagones y de playas rocosas (Alonso et al., 1986-1987; Benito, 2001) (Figs. 2, 5).

La geometría y evolución de los arrecifes en el sector de Torrecilla es consistente con la de los *off-lapping reefs* (Pomar, 1991; Pomar y Ward, 1994) que se desarrollan en contextos de descenso del nivel del mar. Sin embargo, el Kimmeridgiense inferior fue un periodo de tiempo caracterizado por una tendencia general de ascenso del nivel del mar. De hecho, en los sectores de Soria y Bigornia no se observan evidencias que sugieran que se produjo un descenso relativo del nivel del mar durante el desarrollo arrecifal. Por tanto, la evolución de los arrecifes en el sector de Torrecilla tuvo que estar controlada, además de por el ascenso del nivel del mar, por la tectónica local que estaba produciendo el levantamiento del sector de la Demanda (Alonso et al., 1986-1987) (Fig. 1). Esta actividad tectónica dio lugar a un proceso de regresión forzada durante el cual los cuerpos arrecifales podían quedar emergidos durante los episodios de elevación tectónica e inundados por el mar de nuevo por la acción del eustatismo positivo. Progresivamente, los sucesivos episodios de elevación tectónica no pudieron ser ya compensados por el ascenso del nivel del mar, por lo que la mayor parte de la plataforma quedó emergida mientras se estaban produciendo los últimos estadios de desarrollo arrecifal (Alonso et al., 1986-1987; Benito, 2001) (Fig. 2)

blanca). Las facies de núcleo arrecifal del último cuerpo visible, de aspecto masivo (asterisco), se apoyan directamente sobre las facies estratificadas de talud del cuerpo arrecifal anterior. **B.** Barras arenosas con estratificación cruzada a meso-escala. **C.** Colonias de corales laminares desarrolladas por encima de las facies masivas de núcleo arrecifal de la fotografía superior. **D.** Colonia ramosa de *Calamophylliopsis* incrustada por micrita densa (M), esponjas (E), serpúlidos (S) y briozoos (B). La distancia entre las barras de la escala es de 0.5 milímetros.

2. EVOLUCIÓN DIAGENÉTICA DE LOS COMPLEJOS ARRECIFALES DE LA FM. TORRECILLA EN CAMEROS

La evolución diagenética de la Fm. Torrecilla en Cameros en cada uno de los sectores estudiados estuvo controlada principalmente por: 1) la evolución sedimentaria y la distribución de facies, 2) los procesos diagenéticos tempranos asociados a la exposición subaérea de los arrecifes, 3) la historia de enterramiento. Los procesos diagenéticos ocurridos en cada uno de los sectores, así como su asignación a los distintos ambientes diagenéticos y a las distintas etapas de evolución de la cuenca han sido resumidos en las figuras 6, 7 y 8.

La asignación de edades a cada una de las etapas de desarrollo de los distintos procesos diagenéticos ocurridos entre la sedimentación de la Fm. Torrecilla en Cameros y la de las formaciones suprayacentes (datadas como Titónico ó Titónico-Berriasiense), se ha realizado exclusivamente en función de la ausencia o presencia de las distintas fases diagenéticas en los depósitos de cada una de las unidades estudiadas y de las relaciones de corte entre las mismas.

2.1. DIAGÉNESIS SINSEDIMENTARIA (KIMMERIDGIENSE INFERIOR)

Durante la etapa coetánea con el desarrollo de los arrecifes predominaron en los tres sectores estudiados los procesos submarinos de micritización y, localmente, precipitación de micrita peloidal y cemento fibroso en la porosidad primaria intergranular, intragranular y *growth-framework* (*sensu* Choquette et al., 1970) (Figs 3C, 7A-B). Sin embargo, en el sector norte de Torrecilla, donde se desarrollaron los arrecifes franjeantes, la diagénesis durante esta etapa fue más compleja que en los sectores situados al sur de la cuenca, debido a los efectos combinados de la subida del nivel del mar que se estaba produciendo durante el Kimmeridgiense inferior y de la elevación tectónica del sector de la Demanda (Benito, 2004) (Fig. 6-1). Así, durante los episodios de levantamiento tectónico, los cuerpos arrecifales desarrollados durante las primeras etapas de evolución quedaron expuestos. Esto dio lugar a la entrada de las aguas meteóricas que produjeron la disolución y neomorfismo de parte de los esqueletos aragoníticos de los corales y la formación de la mayor parte de la porosidad móldica en los arrecifes del Sector de Torrecilla. Sin embargo, estos cuerpos arrecifales tuvieron que quedar sumergidos de nuevo, ya que tanto en la porosidad móldica, recién creada, como en la porosidad primaria remanente precipitó un cemento de calcita columnar no luminiscente (NL) o de luminiscencia mate (LM) de color marrón oscuro cuyas características petrográficas, elementales e isotópicas son típicas de los cementos precipitados en un ambiente freático marino (Benito et al., 2005) (Figs. 7C, 8G-H). Sin embargo, durante las últimas etapas de desarrollo arrecifal, la tasa de subida del nivel del mar ya no pudo compensar la tasa de elevación tectónica. Este hecho provocó que mientras se estaba produciendo la sedimentación de las últimas etapas de desarrollo arrecifal en un ambiente marino muy somero, los cuerpos arrecifales más antiguos quedaran definitivamente expuestos en superficie (Figs. 2A, 5). La exposición subaérea de estos depósitos dio lugar a la precipitación de un cemento de calcita no ferrosa de origen meteórico y a la formación de un paleosuelo (Benito et al., 2005) (Figs 6-1, 7C, 8G).

En los sectores del Bigornia y Soria, por el contrario, no se ha encontrado ninguna evidencia que indique que la unidad arrecifal quedó emergida o que fue afec-

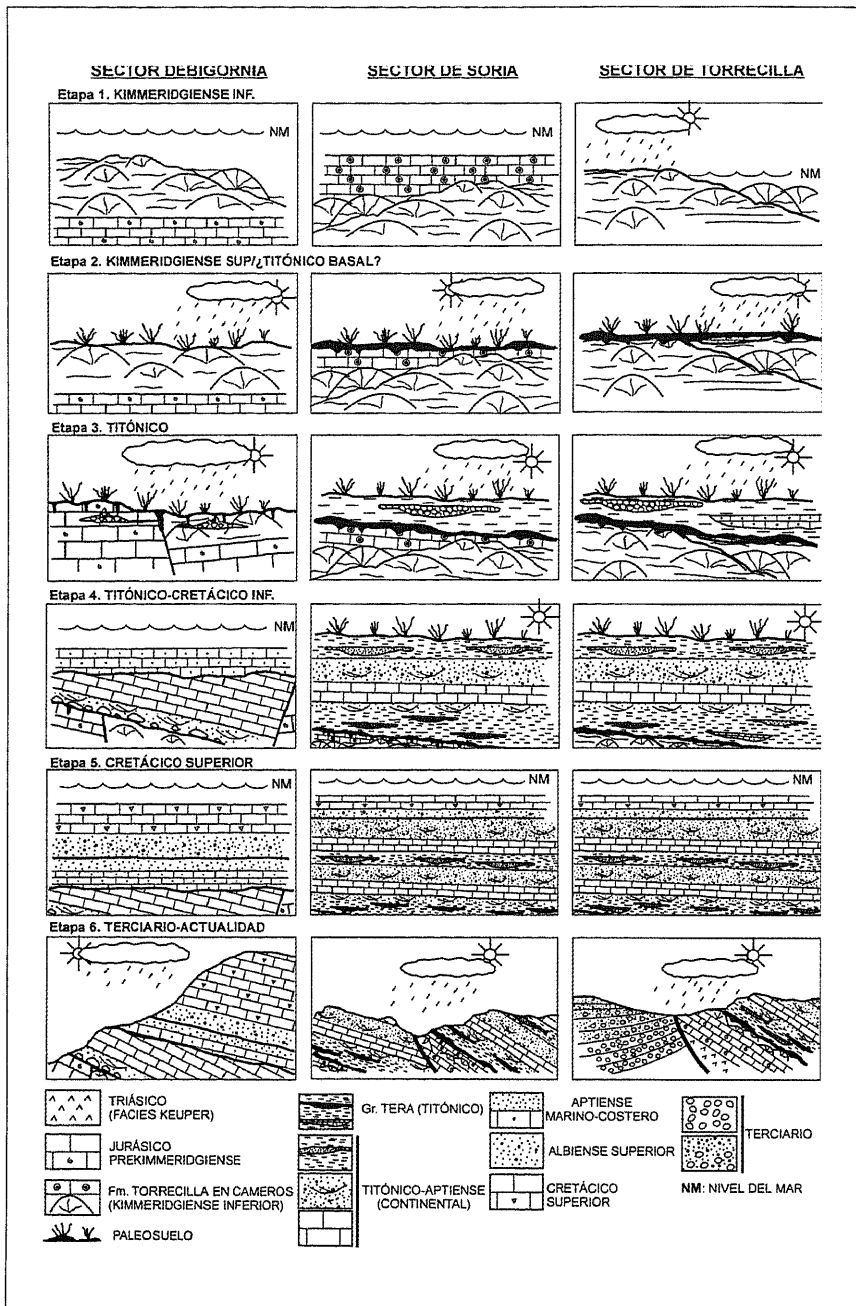


Fig. 6. Resumen ilustrativo que muestra las distintas etapas de la evolución tecto-sedimentaria que afectaron a la Fm. Torrecilla en Cameros en los tres sectores estudiados. Modificada de Benito (2004).

tada por las aguas meteóricas durante esta etapa (Benito, 2004; Benito et al., 2001; Benito et al., 2002).

2.2. DIAGÉNESIS TEMPRANA METEÓRICA (KIMMERIDGIENSE SUPERIOR-¿TITÓNICO BASAL?)

En el Kimmeridgiense superior los complejos arrecifales en todo el área del Estrecho de Soria quedaron definitivamente expuestos en superficie (Fig. 6-2) debido a la progresiva retirada del mar hacia el SE y N que se produjo como consecuencia de la caída del nivel del mar a partir del Kimmeridgiense superior (Haq et al., 1988; Alonso et al., 1990; Aurell et al. 1994; Bádenas et al., 2001) y de la tectónica distensiva que dio lugar a la Cuenca de Cameros (Mas et al., 1993; Guimerá et al., 1995; Salas et al., 2001).

En los sectores situados al sur de la cuenca (Bigornia y Soria) durante esta etapa, y debido a la entrada de las aguas meteóricas en la unidad arrecifal, se produjo la disolución de la mayor parte de los esqueletos de los corales y del resto de los componentes aragoníticos, lo que dio lugar a la creación de la mayor parte de la porosidad secundaria, móldica fundamentalmente (Figs. 3B-C, 4B).

En el Sector de Bigornia, donde predominaron las facies bioconstruidas por corales frente al sedimento alóctono, la proporción de porosidad secundaria generada por la disolución de los corales fue muy alta, aunque la mayor parte se ocluyó muy pronto, mientras la unidad estaba expuesta en superficie, por tres generaciones distintas de calcita que precipitaron en un ambiente meteórico (Benito et al., 2001) (Figs. 7A-8A). Estas tres generaciones están formadas por calcita en mosaico no ferrosa que, con catodoluminiscencia (CL), presentan una primera zona no luminiscente (NL) y finalizan con un zonado de luminiscencia brillante (LB) amarillenta o con un zonado NL-LB (Fig. 8A-C). Cada una de ellas corresponde a un episodio específico y temporalmente distinto de alteración de la unidad arrecifal por fluidos meteóricos durante su exposición subaérea que duró hasta el Titónico-Berriasiense (Benito, 2004; Benito et al., 2001).

En el Sector de Soria, la porosidad móldica creada tras la disolución de los corales, como consecuencia de la entrada de aguas meteóricas, fue menor que en el sector de Bigornia debido a la menor proporción de corales frente al sedimento alóctono. La porosidad fue parcialmente cementada por una generación de cemento de calcita no ferrosa y luminiscencia NL-LB de poco espesor, por lo que, al contrario que en el sector de Bigornia, la mayor parte de la porosidad quedó sin ocluir cuando comenzó el enterramiento de la unidad (Figs. 7B, 8D-F) (Benito, 2004; Benito et al., 2002). Es probable que la razón por la cual solamente precipitara una única generación de cemento meteórico en este sector se debiera a que la duración de la exposición subaérea fue menor que en el sector de Bigornia. De hecho, en el sector de Soria, el depósito de la unidad continental suprayacente, y por tanto el comienzo del enterramiento de la unidad arrecifal, comenzó en el Titónico, antes que en el sector de Bigornia (Aurell, 1990; Mas et al., 1993; Gómez Fernández et al., 1994) (Fig. 6-3, 7).

Por último, en el sector de Torrecilla, durante esta etapa se produjo la exposición subaérea definitiva de toda la unidad arrecifal y su alteración por la entrada

de aguas meteóricas. Así, durante esta etapa continuó el desarrollo del paleosuelo y la precipitación del cemento meteórico de calcita no ferrosa y NL-LB (Figs. 7C, 8G) que había comenzado a precipitar durante la etapa anterior. Como en el sector de Soria, la sedimentación continental asociada a la formación de la Cuenca de Cameros comenzó en el Titónico (Fig. 6-3), por lo que gran parte de la porosidad quedó sin ocluir al comienzo del enterramiento de los arrecifes.

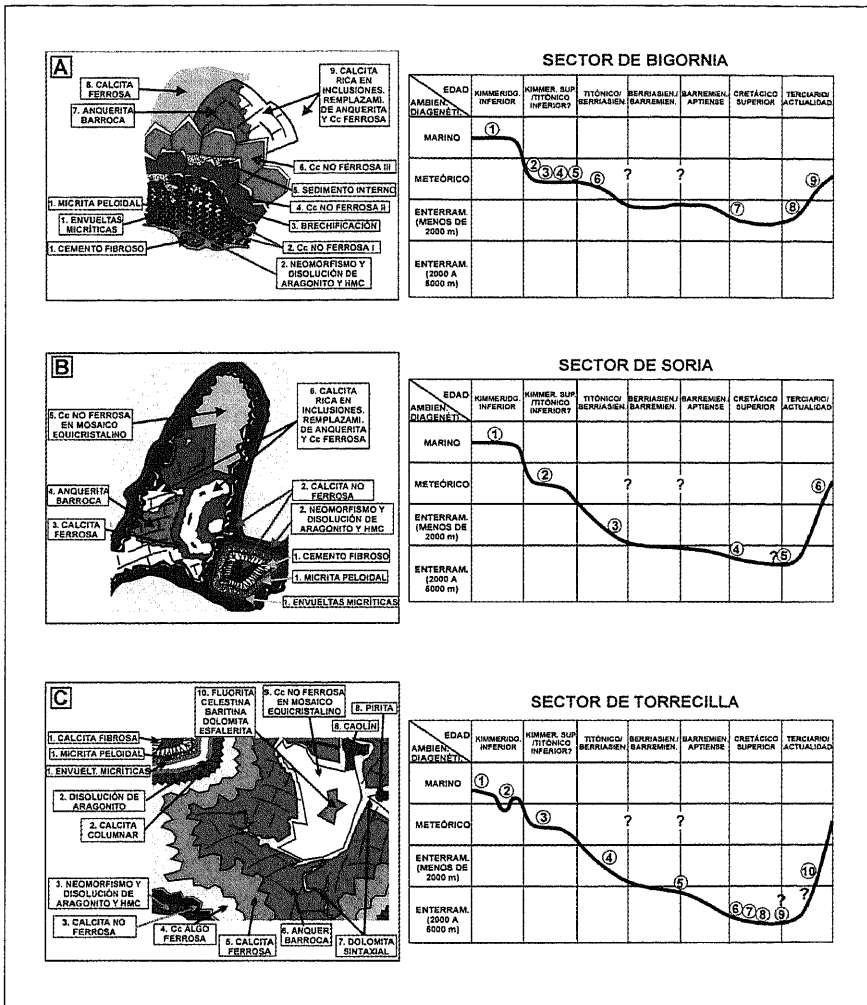


Fig. 7. Esquemas idealizados que ilustran la secuencia paragenética de las principales fases diagenéticas precipitadas en cada uno de los sectores estudiados, así como el ambiente, la edad de precipitación estimada para cada uno de ellos y la curva de enterramiento. **A.** Sector de Bigornia, **B:** Sector de Soria, **C:** Sector de Torrecilla. Traducida de Benito et al., 2003.

2.3. DIAGÉNESIS DE ENTERRAMIENTO (TITÓNICO-CRETÁCICO SUPERIOR)

Esta etapa estuvo principalmente controlada por el enterramiento de la unidad arrecifal como consecuencia del *rifting* que dio lugar a la formación y relleno de la Cuenca de Cameros desde el Titónico al Albiense inferior y por el episodio hidrotermal que afectó al área de Cameros durante el Cretácico Superior (Fig. 6-4, 6-5).

2.3.1. TITÓNICO-ALBIENSE INFERIOR (Fig. 6-4)

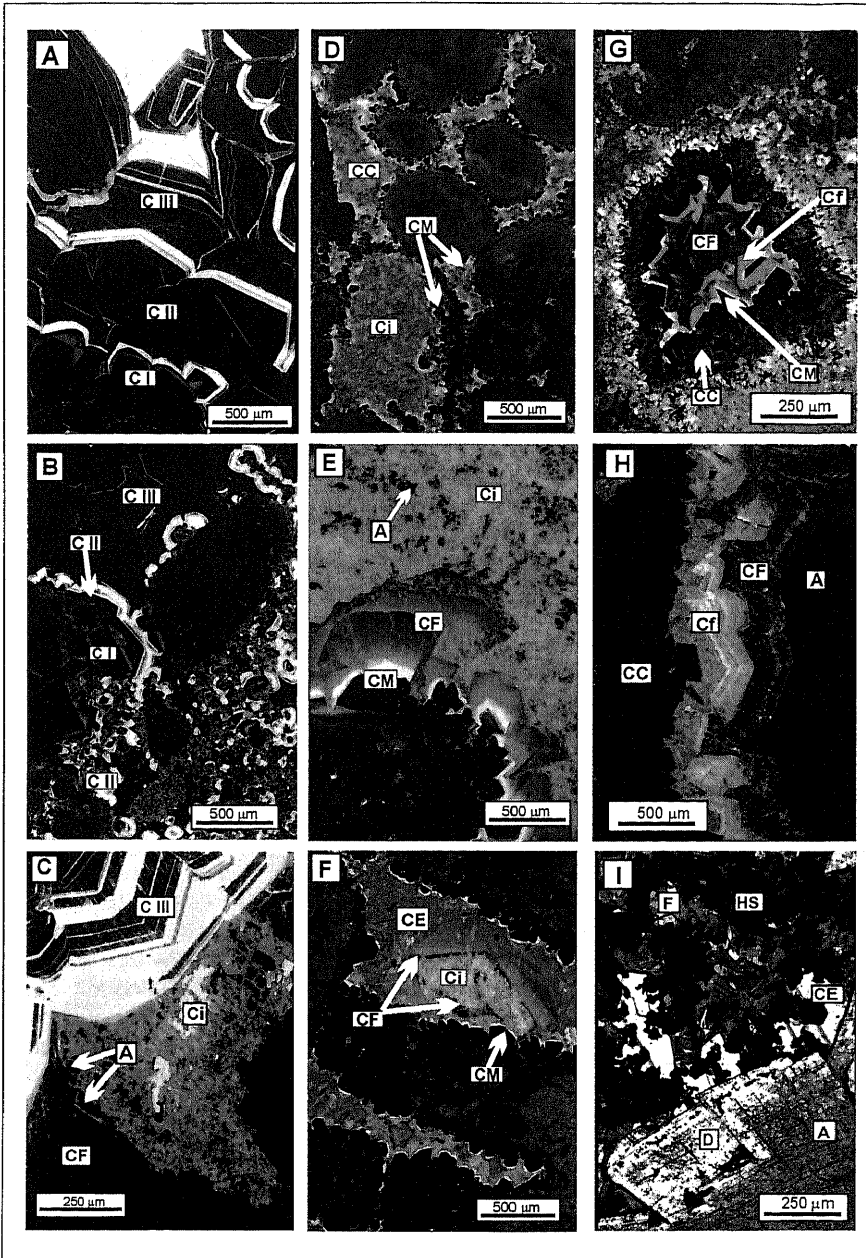
Durante la etapa de *rifting*, y en los sectores de Torrecilla y de Soria, se produjo el progresivo enterramiento de la unidad arrecifal (que llegó a ser de 2000 a 2500 m en el Sector de Soria y de unos 3000 m en el de Torrecilla) y tuvo lugar un proceso de fracturación, asociado al proceso de *rifting*, y de precipitación de un cemento de calcita ferrosa tanto en las fracturas como en el resto de la abundante porosidad que no había sido ocluida por los cementos marinos o meteóricos precipitados anteriormente (Figs. 7B, C, 8F-H). Este cemento de calcita, de mayor contenido en Fe a medida que progresaba el enterramiento, tiene características petrográficas y geoquímicas muy similares en ambos sectores y precipitó a partir de un fluido de carácter reductor y rico en Mg y, en el caso del Sector de Torrecilla, a una temperatura de al menos 130-140^o C (Benito, 2004).

Sin embargo, en el Sector de Bigornia, donde el enterramiento comenzó más tarde que en los sectores de Soria y Torrecilla, durante la etapa de *rifting* finijurásico-eocretácico tuvo lugar la sedimentación de los depósitos continentales de edad Titónico-Berriasiense y de los depósitos de transición del Aptiense inferior que, en conjunto, no superaron los 400 m de espesor. Este hecho dio lugar a que durante esta etapa, la unidad arrecifal fuera todavía afectada por procesos diagenéticos de (Fig. 7) carácter meteórico (Benito, 2004; Benito et al., 2001).

2.3.2. CRETÁCICO SUPERIOR (Fig. 6-5)

Durante la etapa *postrift* del Cretácico Superior, los depósitos acumulados no superaron en ninguno de los sectores los 800-900 m de espesor (Alonso et al., 1993). Por otro lado, en el Cretácico medio-superior, tuvo lugar el episodio de metamorfismo hidrotermal que afectó a la Cuenca de Cameros (Casquet et al., 1992; Mas et al., 1993; Barrenechea, et al., 1995; 2000; Alonso-Azcárate et al., 1995; 1999a; 1999b, Mantilla-Figueroa, 1999; Mas et al., este volumen). Asociado a este metamorfismo, tuvo lugar la precipitación de un cemento de anquerita barroca cuyas características petrográficas y geoquímicas son muy similares en los tres sectores estudiados (Figs. 7A-C, 8C, E, H, I) (Benito, 2004; Benito et al., 2001; Benito y Mas, 2002). En el sector de Torrecilla, donde se pudo realizar el estudio microtermométrico de este cemento, la anquerita precipitó al menos a una temperatura de entre 140 y 157^o C (Benito, 2004). Tras ella, y también asociada al evento hidrotermal en el sector de Torrecilla, precipitó un cemento de dolomita sintaxial a una temperatura de, al menos, entre 155 y 179^oC, así como caolín y piritita (Benito, 2004) (Figs. 7C, 8I). Estas temperaturas en ningún caso podrían haberse alcanzado exclusivamente con el enterramiento que, en ninguno de los sectores superó los 4000 m, y con un gradiente geotérmico de entre 20 y 30 ^o C/Km (Benito, 2004; Benito et al., 2001; Benito et al., 2002).

Tras la precipitación del cemento anquerita, en el Sector de Soria, y del cemento sintaxial de dolomita, caolín y pirita, en el de Torrecilla, tuvo lugar un episodio de fracturación y precipitación de un cemento no ferrosa equicristalina, que presenta una petrografía y una composición elemental e isotópica similar en ambos sectores (Figs. 7B-C, 8F, I). Este cemento ocluyó la mayor parte de la poro-



salud remanente en ambos sectores. El hecho de que este cemento presente unas características tan similares en estos dos sectores situados en dos áreas opuestas de la Cuenca de Cameros, nos hace considerar que su precipitación se pudo deber al desarrollo de un mismo evento tectónico. Este cemento se caracteriza por sus bajos contenidos en Fe y por su relativamente alto contenido en Mg (Benito, 2004), composiciones que no son típicas de los cementos meteóricos. Asimismo su composición isotópica en O no sugiere que precipitara a temperaturas elevadas (Benito, 2004). Es posible que el fluido a partir del cual precipitó este cemento, pudiera

Fig. 8. Fotografías en las que se aprecian los principales procesos diagenéticos ocurridos en los tres sectores estudiados: A, B y C corresponden al sector de Bigornia, D, E, F pertenecen al sector de Soria; G, H, I pertenecen al sector de Torrecilla. Todas las fotografías, salvo la I, están tomadas con catodoluminiscencia (CL). **A.** Fotografía en la que se pueden reconocer tres generaciones distintas de cemento de calcita (CI, CII y CIII). Cada una de ellas comienza con una zona ancha no luminiscente (NL) seguida de una banda fina de luminiscencia mate (LM) anaranjada (solamente presente en la CI), y finalmente de un zonado NL-LB (luminiscente brillante de color amarillo). El contacto entre cada una de las tres generaciones es concordante. **B.** Fotografía en la que se puede observar como la primera generación de cemento (CI) que no presenta luminiscencia (NL), aparece fracturada y brechificada. Los cementos II y III (CII y CIII) precipitaron tras este proceso de brechificación. **C.** Fotografía en la que se observa que el cemento de anquerita (A), que es NL, crece sobre el Cemento III (CIII). La calcita no ferrosa con abundantes inclusiones (Ci) reemplaza a la anquerita y presenta una luminiscencia heterogénea amarillo-anaranjada. Tras la anquerita se encuentra un cemento de calcita ferrosa (CF) de luminiscencia mate (LM) muy oscura que precipita también directamente sobre el Cemento III (obsérvese el borde izquierdo de la fotografía). **D.** Fotografía en la que se observa la porosidad intergranular y móldica de una caliza oolítica rellena, en primer lugar, por una franja fina de un cemento de calcita NL-LB-LM (CM), seguida de un mosaico de calcita no ferrosa muy rica en inclusiones (Ci) de luminiscencia heterogénea LB-LM. **E.** Fotografía de una cavidad de disolución cementada en primer lugar por calcita NL-LB-LM (CM), seguida de un cemento de calcita ferrosa (CF) poco desarrollado y LM oscuro. Tras una superficie de corrosión, la calcita ferrosa va seguida de un mosaico de calcita muy rico en inclusiones (Ci) de luminiscencia heterogénea LB-LM que reemplaza a la anquerita (A), de la que se sólo se observan pequeños relictos NL. **F.** Fotografía en la que se observa una cavidad móldica de un coral cementada en primer lugar por una franja de calcita (CM) de poco espesor y NL-LB-LM. Tras este cemento se encuentra un cristal escalenoédrico de calcita ferrosa (CF) de LM muy oscura que se encuentra muy corroído y reemplazado por calcita rica en inclusiones (Ci) de luminiscencia heterogénea LB-LM. Finalmente la cavidad se rellena por completo con un cemento en mosaico equicristalino de calcita de luminiscencia mate de color marrón anaranjado (CE). **G.** Fotografía de una cavidad primaria cementada, sucesivamente, por una franja muy estrecha e isopaca de calcita fibrosa y LB amarillenta, calcita columnar de luminiscencia mate muy oscura (CC), calcita NL-LB (CM), calcita algo ferrosa y LM anaranjada (CF), y calcita ferrosa y LM oscura (CF) que ocluye por completo la porosidad. **H.** Fotografía de una cavidad de disolución cementada sucesivamente por calcita columnar NL (CC), calcita algo ferrosa y LM anaranjada (CF), calcita ferrosa y LM oscura (CF) y anquerita NL (A). **I.** Fotografía realizada con luz transmitida de una cavidad de disolución en la que se observa: 1. Cemento de anquerita barroca (A). 2. Cemento sintaxial de dolomita de aspecto más claro (D). 3. Calcita no ferrosa en mosaico equicristalino (CE). 4. Fluorita de color morado (F). Tanto la calcita no ferrosa como la fluorita contienen abundantes inclusiones de color negro que están formadas por caolín vermicular, pirita e hidrocarburos sólidos (HS).

tener un origen marino en ambos sectores y pudo haber llegado a estas zonas enterradas de la cuenca a través de fracturas desarrolladas durante los últimos episodios de sedimentación del Cretácico superior (Alonso et al., 1993; Benito, 2004). En cualquier caso, esta hipótesis tendría que ser contrastada con estudios geoquímicos y microtermométricos adicionales.

2.4. DIAGÉNESIS ASOCIADA AL LEVANTAMIENTO TECTÓNICO Y NUEVA EXPOSICIÓN SUBAÉREA DE LA UNIDAD ARRECIFAL (TERCIARIO-ACTUALIDAD)

En el Paleógeno y hasta el Mioceno inferior-medio tuvo lugar el levantamiento tectónico de esta región como consecuencia de la compresión alpina (Guimerá et al., 1995) (Fig. 6-6).

En el Sector de Torrecilla durante este periodo compresivo se produjo un episodio de fracturación, la formación de las mineralizaciones, de tipo Mississippi-Valley de fluorita, celestina, baritina, esfalerita, y dolomita barroca poco ferrosa y la llegada de los hidrocarburos, actualmente en estado en estado sólido (Benito, 2004) (Figs. 7C, 8I). Posteriormente a la formación de estas mineralizaciones tuvo lugar otro episodio de fracturación y la precipitación de un cemento de calcita ferrosa tanto en estas fracturas como en parte de la escasa porosidad remanente de la unidad arrecifal.

En los sectores de Soria y Bigornia se produjo el desarrollo de fracturas que fueron cementadas por calcita ferrosa que, como en el sector de Torrecilla, sus características geoquímicas también sugieren que precipitó a temperaturas relativamente elevadas (Benito, 2004) (Fig. 8C). En estos dos sectores del área sur de la cuenca no se han identificado ni mineralizaciones ni la presencia de hidrocarburos en la Fm. Torrecilla en Cameros. Sin embargo, si han sido descritas mineralizaciones de Pb-Zn en algunas zonas próximas al Sector de Soria (en el sector del Madero) (Fig. 1B) (IGME, 1970). En el Sector del Bigornia, por su parte, se ha descrito la presencia de hidrocarburos rellenando la porosidad de las areniscas del Aptiense, cuya migración ha sido asignada al Terciario (Ellenor, 1978; Mas et al., este volumen).

Por último, en respuesta al levantamiento tectónico producido en todos los sectores se produjo un proceso erosivo que dio lugar a la exhumación de las distintas unidades mesozoicas, por lo que la Fm. Torrecilla en Cameros fue de nuevo afectada por las aguas meteóricas (Fig. 6-6). Bajo estas nuevas condiciones meteóricas, la anquerita y la calcita ferrosa fueron reemplazadas en un ambiente subóxico por mosaicos de calcita con abundantes inclusiones de óxidos/hidróxidos de hierro (Figs. 7A-B, 8C-F) (Benito, 2004; Benito et al., 2001; Benito et al., 2002).

5. CONCLUSIONES

La evolución sedimentaria de los arrecifes de coral de la Fm. Torrecilla en Cameros en el Estrecho de Soria, estuvo controlada tanto por el ascenso del nivel del mar predominante durante el Kimmeridgiense inferior como por la tectónica local. Los arrecifes presentan características distintas al norte y al sur del estrecho. En los sectores situados al sur del estrecho la evolución de los arrecifes se caracte-

rizó por la acreción vertical y la progradación. Sin embargo, al norte del estrecho se produjo un proceso de regresión forzada tectónicamente inducida debido a la elevación tectónica del sector de la Demanda.

La evolución diagenética de la Fm. Torrecilla en Cameros es también distintiva en cada uno de los sectores y estuvo principalmente controlada por la evolución sedimentaria de los arrecifes en cada uno de ellos, así como por la profundidad del enterramiento y por el evento hidrotermal que afectó a la Cuenca de Cameros durante el Cretácico Medio-Superior.

Durante la compresión alpina se produjeron fracturas que favorecieron la migración de hidrocarburos y la precipitación de mineralizaciones de tipo Mississippi-Valley en los arrecifes situados al norte del Estrecho.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos PB97-0298 y BTE2001-0026 del Ministerio de Educación y Cultura. Los autores agradecen a D. Gilberto Herrero y Dña. Beatriz Moral la elaboración de las láminas delgadas, al Dr. Kyger C. Lohmann, Lora Wingate y Alfredo Fernández su inestimable ayuda en la obtención e interpretación de los datos geoquímicos, y al Dr. Carlos Rossi la realización del estudio microtermométrico en las inclusiones fluidas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, A., Mas, R., 1988. La transgresión Aptiense al Sur del Moncayo (límite de las provincias de Soria y Zaragoza). *Comunicaciones II Congreso Geológico de España*, Granada, 1988 (1)11-14.
- Alonso, A., Mas, R., 1990. El Jurásico Superior marino en el sector Demanda-Cameros (La Rioja-Soria). *Cuadernos de Geología Ibérica* (14), 173-198.
- Alonso, A., Meléndez, Mas, R., 1986-1987. Los arrecifes coralinos del Malm en la Sierra de los Cameros (La Rioja, España). *Acta Geológica Hispánica* (21-22), 296-306.
- Alonso, A., Floquet, M., Mas, R., Meléndez, A., 1993. Late Cretaceous Carbonate Platforms: Origin and Evolution. Iberian Range, Spain. En: *Cretaceous Carbonate Platforms* (Eds. T. Simó; R.W. Scott y J.P. Masse). *Memoir Am. Ass. Petrol. Geol.* (56), 297-316.
- Alonso-Azcárate, J., Barrenechea, J.F., Rodas, M., Mas, R., 1995. Comparative study of the transition between very low grade and low grade metamorphism in siliciclastic and carbonate sediments, Early Cretaceous, Cameros Basin (North Spain). *Clay Minerals* (30), 409-422.
- Alonso-Azcárate, J., Boyce, A.J., Bottrell, S.H., Macaulay, C., Rodas, M., Fallick, A.E., Mas, 1999a. Geochemical development and use of in situ laser sulfur isotope analysis for pyrite-anhydrite geothermometry: An example from the pyrite deposits of Cameros Basin, NE Spain, *Geoch. et Cosmoch. Acta* (63), 509-513.

- Alonso-Azcárate, J., Rodas, M., Bottrell, S.H., Raiswell, R., Velasco, F., Mas, R., 1999b. Pathways and distances of fluid flow during low-grade metamorphism: evidence from pyrite deposits of the Cameros Basin, Spain. *Jour. Metamorphic Geol.* (17), 339-348.
- Arribas, J., Alonso, A., Mas, R., Tortosa, A., Rodas, M., Barrenechea, J.F., Alonso-Azcárate, J.; Artigas, R., 2003. Sandstone petrography of continental depositional sequences of and intraplate rift basin: Western Cameros Basin (North Spain): *Journal of Sedimentary Research* (73), 309-327
- Aurell, M., Meléndez, A., 1993. Sedimentary evolution and sequence stratigraphy of the Upper Jurassic in central Iberian Chain, northeast Spain. En: *Sequence stratigraphy and Facies Associations* (Ed. Possamentier et al.), Spec. Publ. Int. Ass. Sediment. (18), 343-368.
- Aurell, M., Mas, R., Meléndez, A., Salas, R., 1994. El tránsito Jurásico-Cretácico en la Cordillera Ibérica: relación tectónica-sedimentación y evolución paleogeográfica. *Cuad. Geol. Iber.* (18), 369-396.
- Aurell, M., Bosence, D., Waltham, D., 1995. Carbonate ramp depositional systems from a late Jurassic epeiric platform (Iberian Basin, Spain): a combined computer modelling and outcrop analysis. *Sedimentology* (42), 75-94.
- Aurell, M., Meléndez, G., Bádenas, B., Pérez-Urresti, I., Ramajo, J., 2000. Sequence stratigraphy of the Callovian-Berriasian (Middle Jurassic-Lower Cretaceous) of the Iberian Basin (NE Spain). En: Hall, R.L., Smith, P.L. (Eds.), *Advances in Jurassic Research 2000 Geol. Res. Forum* (6), 281-292.
- Aurell, M., Robles, S., Bádenas, B., Rosales, I., Quesada, S., Meléndez, G., García-Ramos, J.C., 2004. Transgressive-regressive cycles and Jurassic palaeogeography of northeast Iberia. *Sedimentary Geology* (162), 239-271.
- Bádenas, B., Aurell, M., 2001. Kimmeridgian palaeogeography and basin evolution of northeastern Iberia. *Palaeogeo., Palaeoclim., Palaeoecol.* (168), 291-310.
- Barrenechea, J.F.; Rodas, M., Mas, J.R., 1995. Clay mineral variation associated to diagenesis and low grade metamorphism of early Cretaceous sediments in the Cameros basin, Spain. *Clay Minerals* (30), 89-103.
- Barrenechea, J.F.; Rodas, M.; Frey, M.; Alonso-Azcárate, J., Mas, J.R. (2000) Chlorite, corrensite and chlorite-mica stacks in late Jurassic fluvio-lacustrine mudrocks of the Cameros Basin (NE Spain). *Clays and Clay minerals* (48), 256-265.
- Benito, M.I., 2004. *Estudio comparativo de la evolución sedimentaria y diagenética de los litosomas carbonatados arrecifales (pre-rifting) de la Cuenca de Cameros. Kimmeridgiense. La Rioja-Soria*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 375 pp..
- Benito, M.I., Mas, R., 2002. Evolución diagenética de los carbonatos arrecifales de la Formación Torrecilla en Cameros y de los carbonatos continentales suprayacentes (Kimmeridgiense inferior-Titónico) en el Sector de Soria. Cuenca de Cameros. N. España. *J. Iber. Geol.* (28), 65-92.

- Benito, M.I., Lohmann, K.C., Mas, J.R., 2001. Discrimination of multiple episodes of meteoric diagenesis in a kimmeridgian reefal complex, North Iberian Basin, Spain. *J. Sed. Res.* (70), 381-393.
- Benito, M.I., Lohmann, K.C., Mas, J.R., 2005. Late Jurassic palaeogeography and palaeoclimate in the Northern Iberian Basin of Spain: Constraints from diagenetic records in reefal and continental carbonates. *J. Sed. Res.* (75), 82-96.
- Benito, M.I., Mas, R., Lohmann, K.C., 2003. Eustatic and tectonic controls on coral reef morphology and porosity: The Torrecilla en Cameros Fm. Early Kimmeridgian, Northern Spain. En: *Crossroad of geology, energy and cultures. AAPG International conference and exhibition. Extended Abstract*, 1-6.
- Benke, K., Dürkoop, A., Errenst, C., Mensik, H., 1981. Die Korallenkalke im Oberjura der nordwestlichen Iberischen Ketten (Spanien). *Facies* (4), 27-94.
- Bulard, P.F. 1972. Le Jurassique Moyen et Supérieur de la Chaîne Ibérique sur la bordure du bassin de l'Ebre (Espagne). Tesis Doc.. Fac. Sc. Univ. Nice, 2 vol., 702 pp.
- Casquet, C., Galindo, C., González Casado, J.M., Alonso, A., Mas, R., Rodas, M., García, E., Barrenechea, J.F., 1992. El metamorfismo de la Cuenca de los Cameros. Geocronología e implicaciones tectónicas. *Geogaceta* (11), 22-25.
- Choquette, P.W., Pray L.C., 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 54. 207-250.
- Conze, R., Errenst, C., Mensink, H., 1984. Die Ammoniten des Ober-Callovium bis Unter-Kimmeridgium in den Nordwestlichen Keltiberischen Ketten. *Palaeontographica*, A, (183), 162-211.
- Ellenor, D.W., 1978. The hydrocarbon potencial of the Almazán Basin, Central Spain. *Informe interno de Shell-Camps para el permiso de investigación de la Cuenca De Almazán*. 1-7.
- Errenst, C., 1990. Das korallenführende Kimmeridgium der nordwestlichen Iberischen Ketten und angrenzender gebiete (Fazies, paläogeographie und beschreibung der korallenfauna). Teil 1. *Palaeontographica*, A (214), 121-207.
- Errenst, C., 1991. Das korallenführende Kimmeridgium der nordwestlichen Iberischen Ketten und angrenzender gebiete (Fazies, paläogeographie und beschreibung der korallenfauna). Teil 2. *Palaeontographica*, A (215), 1-42.
- Gómez Fernández, J.C., Meléndez, N., 1994. Estratigrafía de la "Cuenca de Cameros" (Cordillera Ibérica Noroccidental, N de España) durante el tránsito Jurásico-Cretácico. *Rev. Soc. Geol. España*, 7 (1-2). 121-139.
- Guimerá, J.; Alonso, A., Mas, R., 1995. Inversion of an extensional-ramp basin by a newly formed thrust: the Cameros basin (N. Spain). En: *Basin Inversion* (Eds. J.G. Buchanan y P.G. Buchanan). Geol. Soc. Spec. Publ. (88), 433-453
- Guimerá, J., Mas, R., Alonso, A., 2004. Intraplate deformation in the NW Iberian Chain: Mesozoic extensión and Tertiary contractonal inversión. *Jour. Geol. Soc. London* (161), 291-303.

- Hallam, A., 1988. A reevaluation of Jurassic eustasy in the light of new data and the revised Exxon curve. En: *Sea-level changes - an integrated approach*. Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., van Wagoner, J.C. (Eds.). SEPM Spec. Publ. (42), 261-273.
- Haq, B.U.; Hardenbol, J., Vail, P.R. 1988 Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. En: *Sea-level changes - an integrated approach* (Eds. C.K. Wilgus; B.S. Hastings; C.G. St.C. Kendall; H.W. Posamentier; C.A. Ross y J.C. van Wagoner). SEPM Special Publication (42), 71-108.
- IGME, 1970. *Investigación de plomo-cinc en la reserva de Loma Charra (Soria)*. Ministerio de Industria, 1-103.
- Mantilla-Figueroa, L.C., 1999. *El metamorfismo hidrotermal de la Sierra de Cameros (La Rioja-España): Petrología, geoquímica, geocronología y contexto estructural de los procesos de interacción fluido-roca*. Tesis Doctoral. Univ. Complut. Madrid. -361. Inédita.
- Mas, J.R., Alonso, A., Guimerá, J., 1993. Evolución tectonosedimentaria de una cuenca extensional intraplaca: La cuenca finijurásica-eocretácica de Los Cameros (La Rioja-Soria). *Rev. Soc. Geol. Esp.* (6), 129-144.
- Mas, J.R., Alonso, A., Benito, M.I., 1997. Depositional and diagenetic evolution of late Jurassic coral reefs in Northern Iberian Ranges (North Sapin). *Bol. Real Soc. Hist. Nat.* (92), 143-160.
- Mas, R., Benito, M.I., Arribas, J., Serrano, A., Guimerá, J., Alonso, A., Alonso-Azcárate, J., este volumen. *La cuenca de cameros (cordillera ibérica noroeste): desde la extensión finijurásica-eocretácica a la inversión contractiva terciaria - implicaciones en la exploración de hidrocarburos*.
- Pomar, L., 1991. Reef geometries, erosion surfaces and high frequency sealevel changes, upper Miocene reef comple, Mallorca, Spain. *Sedimentology*, 38, 243-270.
- Pomar, L., Ward, W.C., 1994. Response of a Miocene carbonate platform to high-frequency eustasy. *Geology*, 22, 131-134.
- Salas, R., Guimerá, J., Mas, R., Martín-Closas, C., Meléndez, A., Alonso, A., 2001. Evolution of the Mesozoic Central Iberian Rift System and its Cainozoic Inversion (Iberian Chain). En: *Peri-Tethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins*. Cavazza, W., Roberston, A.H.F.R., Ziegler, P. (Eds.). Mus. Nat. Hist. Nat. Mem. (186), 145-185.
- Vail, P.R., Mitchum, R.M., Jr., Todd, R.G., Widmier, J.M., Thompson, S., III, Sangree, J.B., Bubbs, J.N., Hatelid, W.G., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level. En: *Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration*. Clayton, C.E. (Ed.). AAPG Mem. (26), 49-212.
- Vail, P.R., Hardenbol, J., Todd, R.G., 1984. Jurassic unconformities, chronostratigraphy and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy. En: *Interregional unconformities and hydrocarbon accumulation*. Schlee, J.S. (Ed.). AAPG Mem. (36), 129-144.