

# Periodicidad climática y datación astrocronológica del Grupo Enciso en la cuenca oriental de Cameros (N de España)

Arsenio Muñoz<sup>(1)</sup>, Ana Angulo<sup>(2)</sup>, Carlos L. Liesa<sup>(1)</sup>, M<sup>a</sup> Aránzazu Luzón<sup>(1)</sup>, M<sup>a</sup> José Mayayo<sup>(3)</sup>, Antonio Pérez<sup>(1)</sup>, Ana R. Soria<sup>(1)</sup>, Víctor Val<sup>(1)</sup> y Alfonso Yuste<sup>(3)</sup>

(1) Grupo de Investigación Geotransfer, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain.

armunoz@unizar.es, carluis@unizar.es, aluzon@unizar.es, anperez@unizar.es, anasoria@unizar.es, victorval17@gmail.com

(2) IES Rey Don García, Carretera de Uruñuela, 2, 26300 Nájera, Spain.

anaangulo@outlook.com

(3) Grupo de Investigación *Aragosaurus*, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain.

mayayo@unizar.es, alfon@unizar.es

## RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio cicloestratigráfico de un perfil de 1.371 m levantado en los depósitos sinrift (aluviales y lacustres) del Grupo Enciso a partir de una serie de tiempo basada en la litología. Los resultados del análisis espectral de esta serie de tiempo muestran la presencia de ciclos sedimentarios periódicos atribuibles a excentricidad larga (131,8 m) y corta (39,9 m), oblicuidad (12,6 m) y las dos modas del ciclo de precesión (7,7 y 5,5 m). Además, el análisis espectral muestra la presencia de otros ciclos sedimentarios atribuibles a las mismas frecuencias de Milankovitch que pueden corresponder a momentos con menor tasa de subsidencia tectónica. Considerando el análisis espectral se ha construido una escala de tiempo astrocronológica flotante que ha permitido calcular el intervalo temporal abarcado por la serie estudiada (5,4-5,7 Ma) y una tasa de sedimentación media de ~255-239 m/Ma según se utilicen los ciclos de excentricidad larga o corta, respectivamente. En el trabajo se discriminan los efectos de la tectónica (más importante en la parte central y final de la serie) de los de la señal climática, que se hace patente a lo largo de toda la columna estratigráfica. Las facies y contenido paleontológico de la serie estudiada, muy próxima a la línea de costa, permiten definir una secuencia retrogradante-progradante que se interpreta como un ciclo eustático (transgresivo-regresivo). El anclaje de este ciclo eustático con la curva de variaciones del nivel del mar permite emplazar al Grupo Enciso en el Hauteriviense-Barremiense, aproximadamente entre 132,5-126,8/132,3-126,9 Ma.

Palabras clave: Grupo Enciso, análisis espectral, Cicloestratigrafía, Cretácico Inferior, Cuenca de Cameros.

## ***Climatic periodicities and astrochronological dating of the Enciso Group in the eastern Cameros Basin (N of Spain)***

### ABSTRACT

*This study presents the cyclostratigraphic analysis of a detailed, 1,371 m-thick stratigraphic section logged in the Lower Cretaceous syn-rift lacustrine and alluvial deposits of the Enciso Group, in the eastern Cameros Basin. The spectral analysis of a time series based on lithology reveals periodic sedimentary cycles attributable to variations in the eccentricity of the Earth's orbit around the Sun (131.8 and 39.9 m-thick sedimentary cycles for the long and short orbital eccentricity cycle) and to changes in the obliquity (12.6 m-thick cycle) and the two precession modes (7.7-5.5 m-thick cycles) of the Earth's rotation axis. We have constructed a floating astrochronological time scale based on the spectral analysis allowing us to propose that the time interval registered in the studied series is ca. 5.4-5.7 Ma, and to estimate an average sedimentation rate of ~255-239 m/Ma. The presence of cycles representing a similar time span but having different thickness, reveals a higher influence of tectonic activity in the central and upper parts of the succession, and discriminate tectonic from climatic signal, the latter being significant throughout the succession. The sedimentary facies and paleontological content of the studied profile, deposited very close to the coastline, have allowed us to interpret a deepening-shallowing cycle that it is proposed to be eustasy-related (transgressive-regressive cycle). The anchoring of this cycle with the sea level curve in combination with the scarce paleontological dates permit the Enciso Group to be located in the Hauterivian-Barremian, that was approximately deposited between 132.5-126.8 or 132.3-126.9 Ma, depending on whether the short or long eccentricity cycle is considered, respectively.*

*Keywords: Enciso Group; spectral analysis; cyclostratigraphy, Lower Cretaceous; Cameros Basin.*

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

### **Introduction and methodology**

*This study presents the cyclostratigraphic analysis of a Lower Cretaceous continental succession belonging to the Enciso Group in the eastern Cameros Basin (Fig. 1). The objectives are i) to highlight that it records climatic cyclicity, even though sedimentation took place in a tectonically active rift basin, ii) to know the age and time span represented by this succession characterized by limited biostratigraphic data and non-available magnetostratigraphic calibrations, and iii) to discriminate the effects of the climatic and tectonic signals in sedimentation.*

*The followed methodology includes detailed log (scale 1:100) of a composite stratigraphic section. Cyclostratigraphic analysis was based on lithology (sandstone, siltstone, heterolithic facies, shale, marl and limestone), by assigning numerical values to each of them (from 1 to 6, respectively). The time series (with a sampling interval of 10 cm) was processed with the Acycle v.2 (Li et al., 2019) software and included the trend elimination (with the LOESS model, Cleveland, 1979), the spectral analysis using the Multi-Taper method (MTM, Thomson, 1982), the Wavelet analysis (Torrence and Compo, 1998) and the Fast Fourier Transform (LAH, Kodama and Hinnov, 2015), as well as the smoothing (Gaussian filter) of the time series.*

### **Results and discussion**

#### **Stratigraphy and sedimentology**

*The 1,371 m-thick Ambas Aguas-Navalsaz stratigraphic log has been divided into five units on the basis of lithological features (U1 to U5; Fig. 2). Based on sedimentary facies and previous sedimentological models (e.g., Angulo and Muñoz, 2013; Hernán, 2018), units U1 and U2 are interpreted as distal fluvial deposits, with U2 being gradually overlain by low-energy carbonate lacustrine deposits (U3), mixed lacustrine deposits with predominance of the carbonate facies (U4) and, finally, mainly siliciclastic lacustrine deposits (U5) at the top. Sedimentary facies changes are gradual, suggesting that the vertical evolution reflects, in turn, gradual environmental changes.*

#### **Cyclostratigraphy**

*The results of the spectral analysis from the lithological time series (Fig. 3) by using the Multi-Taper (MTM), the Wavelet and the Fast Fourier Transform (LAH) methods are shown in Figures 4, 5 and 6, respectively. Cyclostratigraphy results evidence thirteen cycles over the 95% confidence band, which have been grouped into five frequency bands (F1 to F5 in Fig. 4). If the results obtained from different methods are compared (Table 1) several main points emerge: i) some of the cycles can be recognized in all the cases (main periodicities) whilst others cannot always be recognized, or have weaker development (subordinated periodicities), and ii) frequency bands are normally represented by a main cycle (131.8 m, 39.9 m and 8.8 m in bands F1, F2 and F4, respectively) together with one or more subordinate cycles (83.6 m, 48.6 m and 19.4 and 7.7 m, respectively). It is worth mentioning that it has not been possible to discriminate between main and subordinate cycles in F3 (periodicities of 14.9, 12.6 and 11.3 m) and F5 (periodicities of 5.5, 4.5 and 4.2 m) bands.*

*The relative proximity between main and subordinate periodicities suggests a possible cyclicity disaggregation in close periodicities (duplicity). Disaggregation could be due to either the recording of different modes of the same cycle (e.g., the two characteristic modes of the short eccentricity or the precession cycles, Milankovitch, 1941), or to the duplicity of the same cyclic process by the effect of other control factors such as changes in sedimentation rate (Weedon, 2003). As our data series represents a depth domain record (Strasser et al., 2006) a constant sedimentation rate has been assumed, but we have not overlooked that the pulsating tectonic subsidence associated to normal fault activity may have varied this rate over time.*

#### **The floating astrochronological scale**

*Correlation of the cycles arising from the analysis with the Milankovitch's frequencies has been based on the comparison of their mutual mathematical relationships, which allows us to propose two possible interpretations (Table 2): 1) the 48.6 m subordinate cycle represents the long eccentricity cycle (405 ka) and the 39.9 m main one would not be explained, or 2) the 39.9 m main cycle is related to the short eccentricity cycle (mode 125 ka).*

Based exclusively on stratigraphic criteria, 45 complete cycles and 2 partial ones, around 20-50 m thick (Figs. 2, 7, 8a and Table 3), were identified in the studied profile, that is to say, those cycles correspond to the F2 frequency band (19.4 to 48.6 m). Similarly, almost 45 cycles (44 complete + 3/4 of cycle) have also been obtained from smoothing the data series with a Gaussian filter with a frequency of  $0.033 \pm 0.011$ , that is, cycles between 22.7 and 45.5 m (Fig. 8b).

Following the above-proposed interpretation 1, the 45 cycles (corresponding to 1,336 m of the stratigraphic succession; Table 3) would represent a time span of 18.2 Ma (45 long eccentricity cycles -405 ka-) and an average sedimentation rate of 73.3 m/Ma. Adding the two partial cycles, the entire series of Ambas Aguas-Naval-saz would comprise a ~18.7 Ma time span. Considering interpretation 2, the 45 cycles of the short eccentricity cycle (mode 125 ka) would suppose a lapse of 5.6 Ma, and ~5.7 Ma for the entire succession. After applying a Gaussian filter, 13 complete cycles (meters 15 to 1,354) referable to the long eccentricity cycle (405 ka, 131.8 m) have been identified (Fig. 9), resulting in a sedimentation rate of 254.6 m/Ma and a time span of ~5.4 Ma for the entire series.

Although both options can be accepted considering the numerical values (Table 2), the second one seems more plausible. Option 1 only explains 131.8, 46.8, 14.9, and 11.1 m periodicities, whilst the second explains more values of periodicity in a satisfactory way: first, the periodicities of 131.8, 39.9, 12.6, 7.7 and 5.5 m, but possibly also the periodicities of 83.6, 19.4, 8.8, 4.5 and 4.2 m, which would probably correspond to periods with a lower accumulation rate. Moreover, unlike interpretation 1, the explained periodicities overall correspond to the main ones with all the Milankovitch cycles being represented. From each interpretation, different values of both, time span (18.7 Ma in option 1 versus 5.4-5.7 Ma in alternative 2) and sedimentation rate (73.3 against 238.6-254.6 m/Ma) of the studied series arise. Moreover, option 2 seems to agree more with the dynamics (subsidence history) and chronostratigraphical framework of the basin, because as Allen and Allen (2013) estimated, an average tectonic subsidence value around 200 m/Ma occurs during the syn-rift stages and the Cameros Basin experienced a huge tectonic subsidence between 129 and 108.7 Ma (Omodeo-Salé et al., 2017). In addition, the time span for the studied succession resulting from alternative 2 (5.4-5.7 Ma) is closer to the values previously proposed for the Enciso Group (5.6±0.4 Ma, Doublet, 2004; 5.7 Ma, Angulo and Muñoz, 2013; and 5.57 Ma, Hernán, 2018). Finally, an 18.7 Ma time interval for the Enciso Group (alternative 1) does not seem to be in accordance with the other basin chronostratigraphic data (Mas et al., 2003; Omodeo-Salé et al., 2016).

### **Tectono-sedimentary features**

The accumulated thickness deviation graph (Fig. 8c) displays changes of accommodation space through time (Schwarzacher, 2005), allowing the differentiation of a first stage with an almost continuous decrease of accommodation space values, which includes unit U1 (cycles 1 to 5). For a second stage, comprising units U2 and U3 (cycles 5 to 31), the trend of the curve changes, and a stabilization or gradual increase in accommodation space values is observed. The general trend is encompassed with local increases and decreases of accommodation values, which are interpreted as reflecting the pulsated activity of the growth of normal faults, as is also suggested by the occurrence of local faulting and soft sediment deformation structures (SSDSs) such as slumps and convolute lamination (Fig. 8c). For the third stage (from cycle 31 to cycle 37; unit U4), a huge increase in the accommodation space happened, which also correlates with the occurrence of deformation structures at different scales (Fig. 2 and 8c). Although the lack of more series prevents the confirmation of this trend, since cycle 37 (unit U5) a certain fall in creation of accommodation seems to have occurred, but with some intervals of increase also associated with SSDSs.

The inferred changes in the accommodation space can be associated to variations of tectonic subsidence, base level and/or sediment supply. The increase of the accommodation space during the second stage (units U2 and U3), and especially during the third stage (unit U4), is interpreted as related to tectonic subsidence, as suggested by the existence of numerous synsedimentary faults, growth strata and deformation structures (slumps, clastic dikes, etc.) in these units, especially affecting clastic sediments in the thickest sedimentary cycles (Figs. 2 and 8c).

When sedimentary facies are considered, a moderate relation between accommodation space and type of sediments emerges, so that the former increases in relation with the carbonate facies (units U3 and U4) and decreases in relation with more detrital ones (units U1, U2, and U5). Accordingly, basin tectonics that is characterized by a typical episodic activity could not have been the only factor responsible for the development

of the thick deepening-shallowing cycle (fluvial-lacustrine-fluvial) deduced from the lithological time series (Fig. 9a). Nevertheless, base level changes must have had an undeniable influence as the Enciso Group was deposited in a coastal lake system (Guiraud and Seguret, 1985, Alonso and Mas, 1993, Mas *et al.*, 1993, Suárez-González *et al.*, 2010, Suárez-González, 2015) where eustatic variations usually control significantly accommodation space and drainage conditions. In this sense, episodes of lower sea level would favour basin drainage towards the sea and detrital sedimentation in the area (e.g. units U1, U2 and U5), whilst episodes of higher sea level would be in accordance with detrital supply reduction to the study area, thus favouring development of extensive carbonate lakes (e.g. U3 and U4). Considering this geological context, the deepening-shallowing cycle is interpreted, although with caution, as generated in relation with a first order eustatic cycle (rising-falling sea level). In our opinion, the deepening-shallowing cycle could have been associated to the transgressive-regressive cycle that characterizes the Lower Cretaceous, with its transgressive maximum around 130 Ma (Haq, 2014) (Fig. 9b). In any case, and taking our own results into account, such eustatic cycle would not be the main force in the accommodation space but could have been the responsible for a change in the palaeogeographical configuration. We correlate the transgressive maximum with the establishment of purely lacustrine sedimentation in the Ambas Aguas-Navalsaz area, a situation probably registered around 560 m by a relatively thick succession of lacustrine marls (Fig. 9). According to previous sedimentological models (Doublet *et al.*, 2003; Angulo and Muñoz, 2013; Hernán, 2018), the marls would represent the deeper lacustrine facies and are located very close to the one of the detected marine incursions. If this correlation is accepted, an age between 132.5-132.3 Ma (Hauterivian) to 126.8-126.9 Ma (Barremian) could be provided for the Enciso Group, depending on whether the short or long eccentricity cycle is considered, respectively (Fig. 9). This age is slightly older than another recently proposed by Hernán (2018), between 122.56 and 128.13 Ma (Barremian-Early Aptian), and by Omodeo-Salé *et al.* (2019), 121-127 Ma (Late Barremian-Early Aptian), both based on the anchoring of the floating chronostratigraphic scale with charophyte biozones. On the contrary, our proposal is more in line with the age proposed by Schudack and Schudack (2009) (Upper Valanginian-Barremian) based on the abundant associations of freshwater ostracods recognized in this group (Fig. 10).

## Introducción

### Planteamiento y objetivos

La aplicación de la Astrocronología a la datación de series estratigráficas ha experimentado un fuerte impulso por los buenos resultados obtenidos (Hinnov y Hilgen, 2012), ya que el reconocimiento en el registro estratigráfico de los ciclos astronómicos de la Tierra permite la construcción de escalas de tiempo astronómico (*Astronomical Time Scale: ATS*). De hecho, tal y como señala Gradstein (2012), en la actualidad la Cicloestratigrafía se ha convertido en el primer método de datación para el Cenozoico y se ha aplicado a numerosos intervalos de tiempo del Mesozoico. En España la Astrocronología se ha empleado con excelentes resultados en series del Cretácico inferior, tanto continentales (Doublet, 2004; Soria *et al.*, 2012; Angulo y Muñoz, 2013; Hernán, 2018), como transicionales (Navarrete, 2015) y marinas (Moiroud *et al.*, 2012; Martínez *et al.*, 2012).

En la Cuenca de Cameros, desarrollada durante la etapa de rift del Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Salas y Casas, 1993; Capote *et al.*, 2002), existe un buen conocimiento del registro sedimentario, integrado fundamentalmente por depósitos continenta-

les (tanto fluviales como lacustres), pero las unidades diferenciadas carecen de un marco temporal preciso. Esto es debido a la escasez de dataciones bioestratigráficas y a la insuficiente precisión que aportan los grupos de fósiles estudiados, normalmente ostrácodos (Salomon, 1982; Schudack y Schudack, 2009) y caráceas (Brenner, 1976; Martín-Closas, 1989 y 2000; Martín-Closas y Alonso Millán, 1998; Salas *et al.*, 2001; Mas *et al.*, 2004) y, muy localmente, algas dasicladáceas y foraminíferos marinos (Alonso y Más, 1993; Suárez-González *et al.*, 2010; Suárez-González, 2015). Además, muchas de las dataciones realizadas carecen de una localización precisa en la serie estratigráfica local (p.e., Schudack y Schudack, 2009). También son escasas las dataciones provenientes de estudios relacionados con el pico de metamorfismo térmico (Goldberg *et al.*, 1988; Casquet *et al.*, 1992; Rat *et al.*, 2019). Sin embargo, estas potentes unidades estratigráficas presentan una ciclicidad sedimentaria muy bien definida por la recurrencia de litologías y facies que, como hipótesis de partida, les confiere un gran interés para la elaboración de un marco temporal basado en la Astrocronología. Los cambios ambientales producidos por oscilaciones climáticas pueden quedar reflejados como variaciones en los sedimentos, lo que permite

que sean unos excelentes indicadores de las condiciones medioambientales y de su evolución temporal. Esta hipótesis se sustenta en los primeros resultados obtenidos por Doublet (2004), Angulo y Muñoz (2013) y Hernán (2018) quienes reconocen ciclos sedimentarios referibles a todas las frecuencias de Milankovitch (1941).

En la Cuenca de Cameros se están analizando parámetros como litología, color, mineralogía o susceptibilidad magnética, con el objetivo de conocer, de una manera precisa, diferentes manifestaciones de ciclicidad sedimentaria. En este trabajo se presenta el análisis cicloestratigráfico de una nueva serie estratigráfica (Ambas Aguas-Navalsaz) en la cuenca oriental de Cameros que abarca la totalidad del Grupo Enciso. En concreto, se presentan los primeros resultados referidos a datos aportados por las variaciones litológicas; es decir, se utiliza la litología como *proxy* con significado paleoambiental para elaborar una serie de tiempo que permita analizar la influencia de los ciclos climáticos en la sedimentación.

El objetivo de este estudio es (i) poner de manifiesto la existencia de ciclicidad climática que haya podido quedar registrada durante la sedimentación del Grupo Enciso aunque se deposite en una cuenca de rift tectónicamente activa; (ii) la construcción de una escala de tiempo astrocronológica flotante para conocer el marco temporal de una serie continental con escaso número de datos bioestratigráficos y poca o nula calibración magnetoestratigráfica, así como para calcular tasas de sedimentación; (iii) la discriminación entre las señales climática y tectónica en la sedimentación de una cuenca extensional y (iv) el anclaje cronológico, en la medida de lo posible, de la serie estudiada.

### **Marco geológico**

La Cuenca de Cameros, localizada en el noroeste de la Cordillera Ibérica (Norte de España, Fig. 1a), se formó durante la segunda etapa extensional del rift mesozoico ibérico (Jurásico Superior-Cretácico Inferior) y experimentó una inversión tectónica (cabalgamiento de Cameros) durante la orogenia Alpina, constituyendo actualmente un relieve positivo que corresponde a la Sierra de Cameros (Casas, 1992; Salas y Casas, 1993; Salas *et al.*, 2001; Capote *et al.*, 2002; Liesa *et al.*, 2018). Esta cuenca ha sido objeto de numerosos estudios multidisciplinarios, muchos de ellos centrados en la reconstrucción de la evolución geológica cretácica, caracterizando con detalle su estratigrafía, sedimentología, estructura y petrología (Casas-Sainz, 1993; Mas *et al.*, 1993, 2002; Guimerà *et al.*, 1995; Doublet, 2004; Omodeo-Salé, 2014; Suárez-González, 2015; Hernán,

2018). Los sedimentos de la Cuenca de Cameros son predominantemente continentales (fluvio-lacustres), con evidencias de algunas incursiones marinas. La característica que diferencia esta cuenca de las demás cuencas formadas durante la segunda etapa del rift ibérico es la gran potencia de sedimentos acumulados durante dicho periodo, en torno a 8.000 m.

En la Cuenca de Cameros se diferencian dos sectores con características sedimentarias y tectónicas distintas: el occidental, donde las series sedimentarias sin-rift son menos potentes, no se observan evidencias de metamorfismo y están afectadas por numerosos pliegues y cabalgamientos, en general con vergencia sur (Guimerà *et al.*, 1995); y el oriental, donde el espesor de la serie sin-rift cuadruplica al del sector occidental, se observa metamorfismo de bajo grado, las estructuras tectónicas son escasas y los cabalgamientos presentan vergencia norte (Casas-Sainz, 1993).

Los sedimentos fluvio-lacustres de esta cuenca se dividen en cinco grupos litoestratigráficos (Tischer, 1966): Tera, Oncala, Urbión, Enciso y Oliván (Fig. 1b). En el bloque inferior del cabalgamiento de Cameros, y estratigráficamente por encima de estos grupos, afloran materiales en facies Urgon y de las Fms Escucha y Utrillas (Muñoz *et al.*, 1997). El relleno sedimentario ha sido dividido por Mas *et al.* (1993 y 2002) en unidades genéticas (secuencias de depósito) limitadas por discontinuidades que se suelen manifestar como discordancias.

El Grupo Enciso, objeto de estudio en este trabajo, ha sido datado como Barremiense superior-Aptiense inferior por Mas *et al.* (1993), como Barremiense-Aptiense por Doublet (2004), como Valanginiense-Barremiense por Schudack y Schudack (2009), como Hauteriviense superior-Barremiense por Clemente (2010), como Hauteriviense-Aptiense por Angulo y Muñoz (2013) y como Barremiense superior-Aptiense superior por Hernán (2018). Este grupo aflora ampliamente en el sector oriental de la Cuenca de Cameros, donde está representado por sedimentos de ambientes fluviales distales y lacustres de carácter mixto carbonatado-siliciclástico (Doublet *et al.*, 2003). Alcanza, en este sector, entre 1.100 y 1.450 m de espesor máximo (Guiraud y Seguret, 1985) e incluye foraminíferos bentónicos relacionados con incursiones marinas puntuales (Guiraud y Seguret, 1985; Alonso y Mas, 1993; Mas *et al.*, 1993; Suárez-González *et al.*, 2010; Suárez-González, 2015). Recientemente, Angulo y Muñoz (2013) han estudiado las facies sedimentarias del Grupo Enciso en la región de Munilla (<10 km al NO de la zona de estudio) diferenciando siete facies ligadas a tres subambientes sedimentarios: fluvial, lago siliciclástico con desarrollo de dispositivos deltaicos y dinámica

de oleaje y lago carbonatado somero. Hernán (2018), en este sector de la cuenca, diferencia 12 elementos arquitectónicos y a partir de las relaciones existentes entre ellos determina la presencia de nueve facies sedimentarias, todas ellas dentro de ambientes fluviales, deltaicos o lacustres.

En el Grupo Enciso se reconocen secuencias sedimentarias de escala métrica y decamétrica que se repiten a lo largo de la serie dando lugar a una ciclicidad que muchos autores han asociado a un control climático de origen orbital (Doublet *et al.*, 2003; Angulo y Muñoz, 2013; Hernán, 2018), aunque otros autores la han relacionado con actividad tectónica (Guiraud y Seguret, 1985; Alonso y Mas, 1993; Mas *et al.*, 1993; Suárez-González *et al.*, 2010).

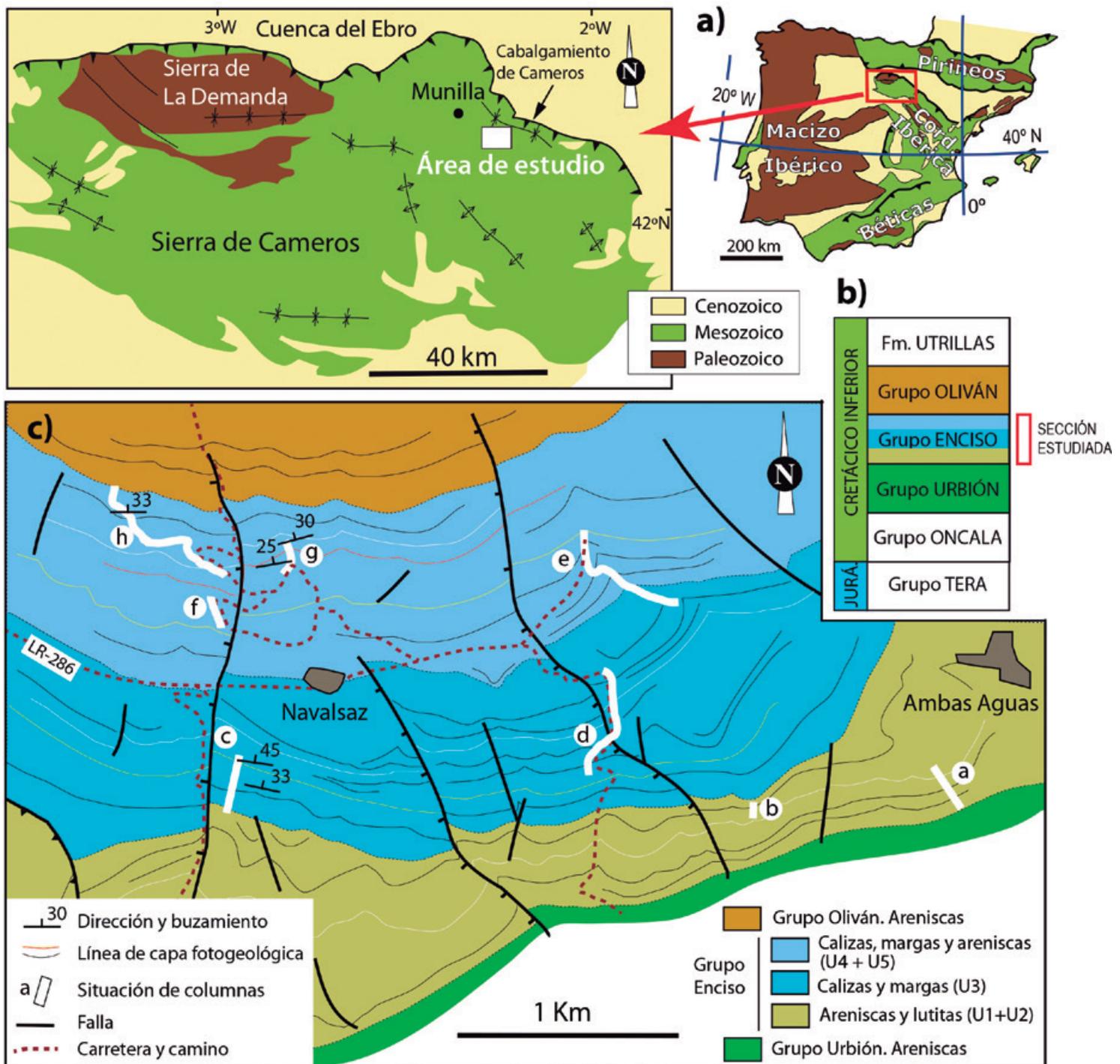
### Metodología

El trabajo de campo ha consistido en el levantamiento de un nuevo perfil estratigráfico (perfil Amba Aguas-Navalsaz) que abarca todo el Grupo Enciso en el sector oriental de la Cuenca de Cameros. Las campañas de campo se realizaron entre junio de 2017 y marzo de 2018. El perfil completo ha sido construido a partir de secciones parciales levantadas en distintas zonas seleccionadas por sus excelentes condiciones de afloramiento (Fig. 1c). Con el propósito de construir una sucesión sedimentaria continua y completa, y antes de proceder al levantamiento del perfil, las diferentes zonas se correlacionaron mediante el seguimiento de capas directamente en el campo y, cuando fue necesario, utilizando líneas de capa foto-geológicas a partir de pares estereoscópicos de fotos aéreas a escala 1:18.000 y de ortoimágenes de alta resolución (*Google Earth*). Con el mismo objetivo, las fallas de escala métrica a kilométrica (sinsedimentarias o no) reconocidas durante el levantamiento del perfil fueron analizadas y reconstruidos sus desplazamientos. El perfil fue levantado en campo a una escala de trabajo de detalle (1:100), aunque en este trabajo, por cuestiones de representación, se muestra una figura sintética del perfil y un detalle del mismo. Esta minuciosa escala de trabajo ha permitido obtener una buena resolución de la litología y espesor de la serie estudiada, parámetros especialmente analizados en este trabajo, y situar estratigráficamente la abundante información adicional recogida durante las campañas de campo y los trabajos de laboratorio posteriores. Esta información adicional incluye observaciones sobre textura y tamaño de grano de los sedimentos, estructuras sedimentarias, contenido fósil, medidas de susceptibilidad magnética en campo y toma de muestras para láminas delgadas, levigados y análisis

en laboratorio (color y contenido en carbonatos). Paralelamente, se tomaron abundantes datos estructurales a distintas escalas (fallas sinsedimentarias y estructuras de deformación en sedimentos blandos).

Los trabajos de gabinete han consistido en la elaboración, a partir de esta columna estratigráfica, de una serie de tiempo continua semicuantitativa, con un intervalo de muestreo de 10 cm. Para ello se han utilizado las diferentes litologías identificadas (arenisca, limolita, facies heterolítica, lutita, marga y caliza) mediante la asignación de valores numéricos a cada una de ellas (1, 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente) en función de la proporción y tamaño de grano de facies detríticas. La serie de tiempo ha sido procesada con el software *Acycle v.2* (Li *et al.*, 2019) para la caracterización de la ciclicidad litológica. La metodología empleada incluye la eliminación de la tendencia (con el modelo *LOESS*; Cleveland, 1979), el análisis espectral utilizando diferentes técnicas como el método *Multi-Taper* (MTM; Thomson, 1982), el análisis *Wavelet* (Torrence y Compo, 1998) y la *Transformada Rápida de Fourier* (LAH; Kodama y Hinnov, 2015), así como el suavizado de la serie de tiempo con un filtro gaussiano para caracterizar los ciclos de más baja frecuencia.

La interpretación de los resultados se basa, primeramente, en la asignación de las periodicidades obtenidas a las diferentes frecuencias de Milankovitch (1941) a partir de la comparación de las relaciones entre las periodicidades obtenidas en nuestro trabajo y las que existen entre las distintas bandas de frecuencia de Milankovitch (excentricidad, oblicuidad y precesión). Los ciclos así definidos han permitido establecer una escala astrocronológica flotante que se ha utilizado para determinar el tiempo que abarca la serie estratigráfica estudiada y calcular la tasa media de sedimentación. La comparación de nuestra serie de tiempo litológica con la curva eustática de Haq (2014), así como otras fuentes de información de la edad de la serie estudiada, han sido utilizadas para anclar ambas curvas, permitiendo proponer una datación absoluta preliminar de la serie estudiada. La asignación de las edades absolutas obtenidas en el anclaje a los pisos está basada en la *Carta Cronoestratigráfica Internacional* (v2019/05) publicada por la *International Commission on Stratigraphy*, cuyas edades numéricas para el Cretácico Inferior, todavía sin clavos de oro, se mantienen desde su publicación (Cohen *et al.*, 2013) y son algo diferentes a las utilizadas por Haq (2014). Por último, se ha realizado un análisis de la influencia en la sedimentación de procesos tectónicos y climáticos a partir del reconocimiento de los ciclos en la columna estratigráfica y la posterior construcción e interpretación de una curva de desviación de espesores (Schwarzacher, 2005).



**Figura 1.** Marco geológico de la zona de estudio. a) Mapa geológico de la Península Ibérica y mapa de detalle de las sierras de La Demanda y Cameros donde se muestra la situación del área estudiada, dentro del sector nororiental de la Cuenca de Cameros. b) Posición del Grupo Enciso en el contexto de las unidades geológicas definidas por Tischer (1966). c) Mapa geológico de la zona de estudio donde se muestran los diferentes segmentos que integran el perfil levantado. U1-U5: Unidades litológicas del Grupo Enciso.

**Figure 1.** Geological framework of the study area. a) Geological map of the Iberian Peninsula and detailed map of the La Demanda and Cameros ranges with the situation of the studied area within the northeastern sector of the Cameros Basin. b) Position of the Enciso Group in the stratigraphical framework proposed by Tischer (1966). c) Geological map of the study area showing the different segments that make up the logged profile. U1-U5: Lithological units of the Enciso Group.

## El perfil Ambas Aguas-Navalsaz

### Localización

El perfil Ambas Aguas-Navalsaz se localiza en la parte oriental de la Cuenca de Cameros (Fig. 1a), entre estas dos localidades riojanas (Fig. 1c). En este sector las capas muestran una dirección muy constante en torno a E-O y un buzamiento moderado (25-45°) hacia el norte, características del flanco sur del sinclinal norte de Cameros (Casas-Sainz, 1993), donde se localiza el área de estudio. Las capas tienen, mayoritariamente, una geometría tabular y gran continuidad lateral, de modo que los intervalos competentes de la serie dan unos claros resaltes que pueden seguirse lateralmente en el paisaje y en fotografía aérea. Algunas fallas, de escala hectométrica a kilométrica, producen saltos métricos a decamétricos en la serie (Fig. 1c). En relación con estas fallas, que tienen normalmente una dirección NO-SE y elevados buzamientos, se han reconocido, durante la realización de este trabajo, cambios de espesor para algunos intervalos estratigráficos, por lo que tienen un claro carácter sin-sedimentario. En general, estas fallas producen un aumento en espesor de la serie hacia el oeste.

Las condiciones de afloramiento son bastante buenas pero para construir un perfil con continuidad en la información y que permitiera observaciones a la escala de detalle que este tipo de investigaciones requiere, ha sido necesario desplazarse lateralmente para enlazar diferentes secciones escogidas por su excelente calidad. Por ello, el perfil Ambas Aguas-Navalsaz es un perfil compuesto en el que se han integrado ocho secciones parciales (secciones a-h en Fig. 1c). La base del perfil se sitúa a unos 600 m al SO de Ambas Aguas (42°06'58.1"N, 2°10'10.9"O), municipio perteneciente a Muro de Aguas, y el techo a 1 km al NO de Navalsaz (42°07'41.9"N, 2°13'00.2"O) (Fig. 1c). El enlace entre las diferentes secciones del perfil se realizó durante su levantamiento, normalmente mediante el seguimiento de capas directamente en el campo, especialmente en las secciones más próximas (secciones a-b, d-e y f-g-h). En otros casos, cuando las secciones escogidas se encontraban más distantes (enlaces de las secciones b-c-d y e-f) este análisis fue precedido del estudio y seguimiento de (i) líneas de capa fotogeológicas en fotografías aéreas 1:18.000 con cobertura estereoscópica y con la ayuda de ortoimágenes de más detalle y (ii) de los desplazamientos producidos por las fallas. Las principales líneas de capa se encuentran representadas en la figura 1c. Este procedimiento laborioso ha permitido finalmente disponer de una columna estratigráfica prácticamente continua, y representativa del sector de estudio, a un gran detalle (escala 1:100). Este perfil tiene una potencia total de 1.371 m y está representado, de forma sintética, en la figura 2.

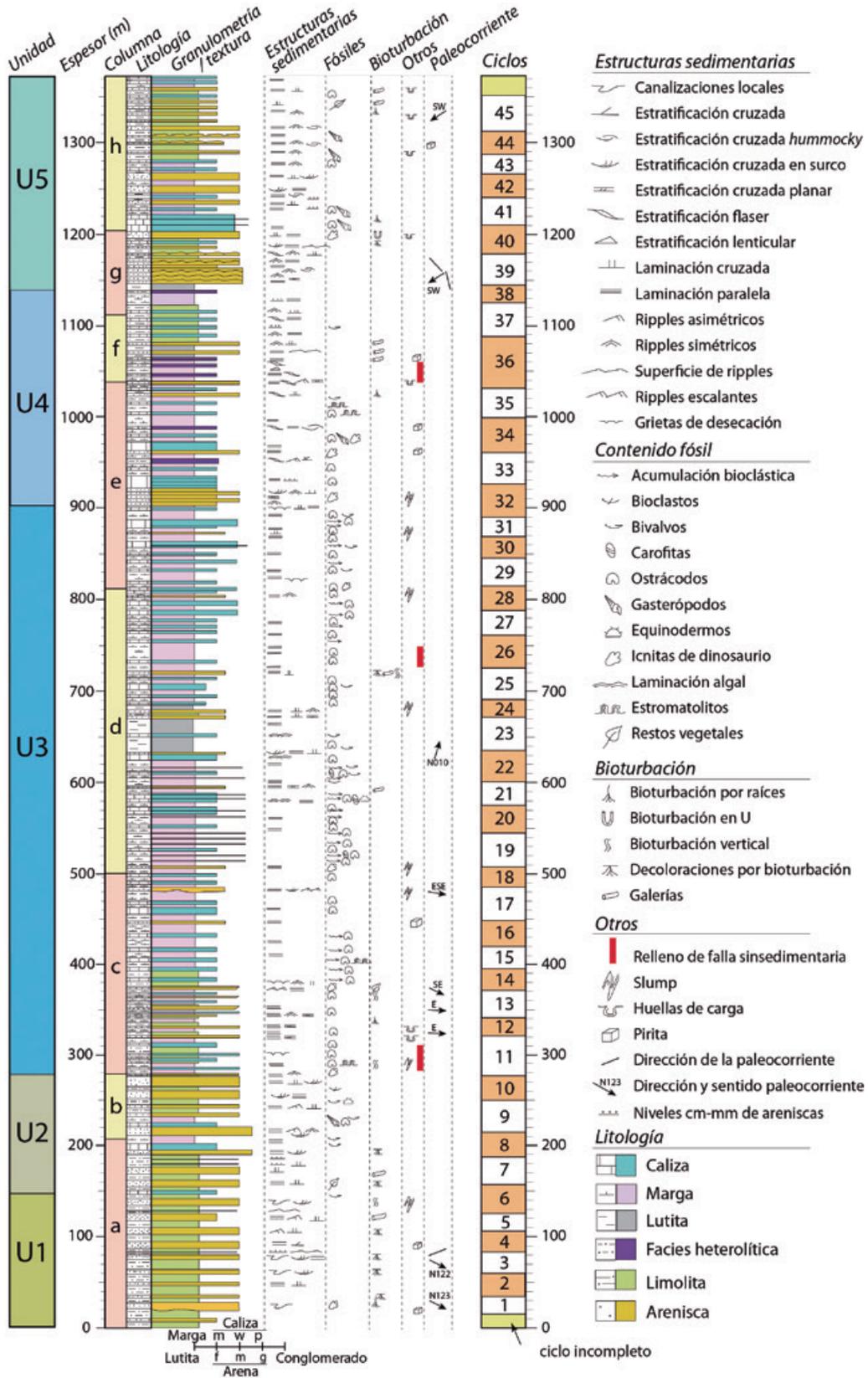
### Estratigrafía y sedimentología

En conjunto, el perfil estratigráfico de Ambas Aguas-Navalsaz se corresponde con el Grupo Enciso. Sobre esta unidad aflora una potente serie detrítica perteneciente al Grupo Oliván (Fig. 1c). En este perfil se han diferenciado 5 unidades litológicas (U1 a U5; Fig. 2), las dos primeras, más detríticas, corresponden, aproximadamente, al Conjunto Detrítico Inferior de Doublet *et al.* (2003) o a la Secuencia Inferior Silici-clástica de Hernán (2018), y las tres restantes al Conjunto Carbonatado de Doublet *et al.* (2003) o Secuencia Superior de Hernán (2018).

La primera unidad (U1), con un espesor de 149 m, está integrada, mayoritariamente, por una alternancia de areniscas, frecuentemente en estratos con geometría canaliforme, y limolitas; con intercalaciones ocasionales de calizas. La unidad U2 tiene un espesor de 129 m y también está integrada mayoritariamente por areniscas y limolitas pero, en este caso, las intercalaciones de margas y calizas son más frecuentes. La unidad U3 es muy potente (629 m) y está constituida casi exclusivamente por carbonatos (calizas y margas), aunque también presenta intercalaciones, especialmente en su parte inferior y central, de areniscas y lutitas. La unidad U4 tiene un espesor de 235 m; está constituida por calizas y margas pero también son frecuentes las capas de areniscas, limolitas, lutitas y de facies heterolíticas (areniscas y arcillas). Por último, la unidad U5, con un espesor de 229 m, está constituida por una alternancia de areniscas y limolitas con algunas intercalaciones potentes de calizas y margas. En este caso, las areniscas se disponen en estratos con geometría tabular y predominio de *ripples* de oscilación.

Los términos litológicos dominantes son: areniscas, limolitas, lutitas, margas y calizas y, en menor medida, facies heterolíticas. Aunque en la columna de la figura 2 se recogen las principales características observadas en cuanto a geometría de estratos, estructuras sedimentarias de corriente, contenido fósil, así como otros tipos de estructuras (bioturbación, estructuras de deformación en sedimentos blandos, etc.), a continuación se describen los rasgos generales más significativos de cada una de las litologías.

Las areniscas son mayoritariamente de grano medio y fino y se disponen en estratos de geometría tabular (canaliforme en la U1). Presentan laminación paralela, laminación cruzada de oscilación y corriente, estratificación cruzada en surco y *ripples* de oscilación, de corriente y de interferencia y, en menor medida, laminación convolucionada y estratificación cruzada *hummocky*. Las limolitas y las lutitas suelen ser masivas o con laminación paralela y, en ocasiones, con desarrollo de trazas verticales y decoloraciones



**Figura 2.** Columna sintética de la serie estratigráfica de Ambas Aguas-Navalsaz con la posición de los 45 ciclos diferenciados.  
**Figure 2.** Synthetic profile of the Ambas Aguas-Navalsaz stratigraphic succession with the position of the 45 differentiated cycles.

por bioturbación. Las facies heterolíticas muestran estratificación lenticular y *flaser*, laminación paralela y cruzada y *ripples* asimétricos. Las margas se disponen en cuerpos tabulares y tienen normalmente laminación paralela. Las calizas presentan texturas *mudstone* a *wackestone*, escasamente *packstone*, y se disponen en estratos tabulares, ocasionalmente con techos ondulados y nodulizados. Tanto en las calizas como en las margas son frecuentes los restos fósiles, normalmente ostrácodos que en ocasiones se disponen en finas acumulaciones bioclásticas y, en menor medida, carofitas, bivalvos, gasterópodos y restos de peces. En la serie es frecuente la presencia de huellas de dinosaurios.

Las características observadas en las facies sedimentarias, y también su semejanza a las descritas por Hernán (2018) en este sector y por Angulo y Muñoz (2013) en la cercana zona de Munilla (Fig. 1a), permiten interpretar que las dos primeras unidades (U1+U2) representan la sedimentación en un sistema fluvial distal sobre el que gradualmente se desarrolla, primero un sistema lacustre esencialmente carbonatado y de baja energía (U3), posteriormente un sistema lacustre mixto, con predominio de las facies carbonatadas (U4), y finalmente un sistema lacustre mixto en el que predominan las facies siliciclásticas (U5).

Si atendemos a los cambios normalmente graduales que se reconocen en la serie, todos estos sistemas sedimentarios parecen estar relacionados lateral y verticalmente. Por ello, la evolución vertical de facies y medios sedimentarios reconocidos en este perfil puede ser el reflejo de los cambios ambientales acontecidos en la cuenca.

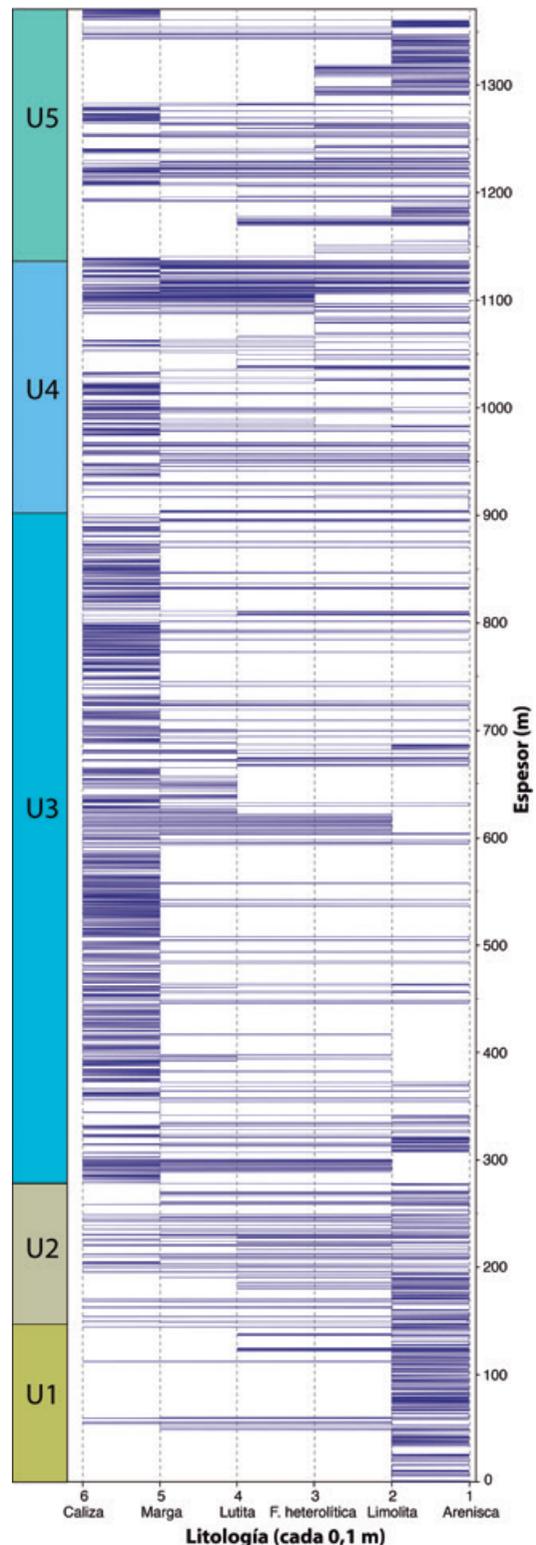
### Cicloestratigrafía

#### La serie de tiempo litológica

La construcción de la serie de tiempo, para su posterior análisis espectral, ha sido realizada a partir de los datos litológicos representados en el perfil de detalle levantado en el campo (1.371 m), dando un valor numérico (1 a 6) a cada litología (arenisca, limolita, facies heterolítica, lutita, marga y caliza, respectivamente) en función de la proporción y tamaño de grano de las facies detríticas. Se tomó un dato cada 10 cm de la columna, por lo que la serie de tiempo está constituida por 13.710 datos (Fig. 3).

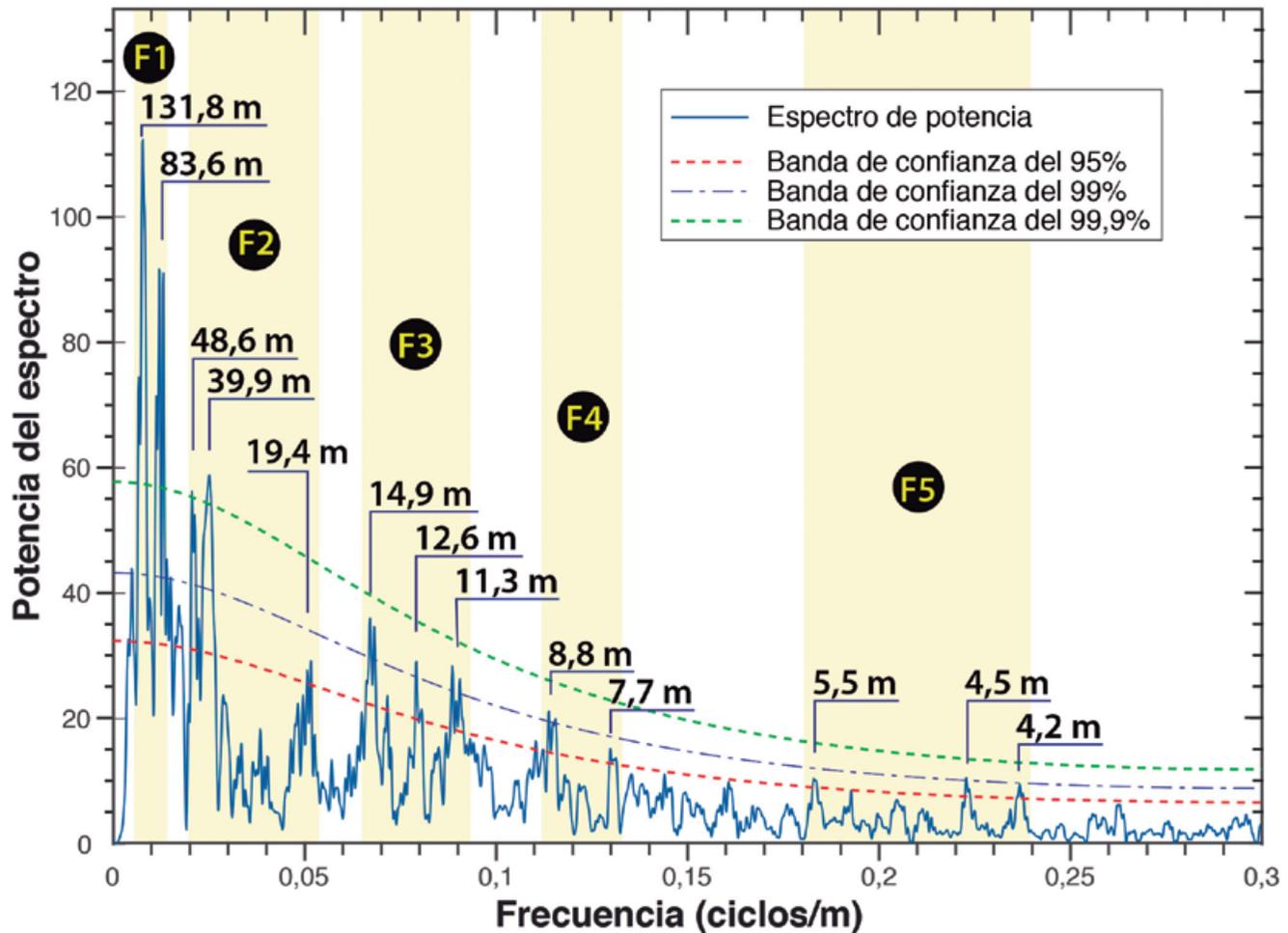
#### Resultados del análisis espectral

Los resultados obtenidos mediante el método Multi-Taper (MTM) se muestran en la figura 4, donde se



**Figura 3.** Serie de tiempo continua semicuantitativa elaborada a partir de las litologías reconocidas en el perfil de Ambas Aguas-Navalsaz. Valores cada 10 cm.

**Figure 3.** Semi-quantitative continuous time series elaborated from lithologies recognized in the Ambas Aguas-Navalsaz profile. Values every 10 cm.



**Figura 4.** Espectro Multi-Taper (MTM) de la serie de tiempo de la litología identificada en el perfil de Ambas Aguas-Navalsaz. Se ha usado un valor de  $2\pi$  MTM y una ventana de suavizado del 50%. En la gráfica aparecen muy bien definidos 13 ciclos que superan la banda de confianza del 95% concentrados en cinco bandas de frecuencia (F1 a F5).

**Figure 4.** Multi-Taper Spectrum (MTM) of the time series based on lithology in the Ambas Aguas-Navalsaz profile. A value of  $2\pi$  MTM and a smoothing window of 50% have been used. The graph shows 13 very well-defined cycles over the 95% confidence level concentrated in five frequency bands (F1 to F5).

reconoce un gran número de máximos de potencia que sobrepasan la banda de confianza del 99%. Algunos de estos máximos se sitúan en frecuencias relativamente próximas, de modo que en conjunto definen una envolvente principal o franja de frecuencias. Esto ocurre para los máximos (ciclos) reconocidos en la franja de frecuencias 0,007-0,013 (F1 en Fig. 4) y, también, para los máximos que aparecen en las franjas de frecuencias 0,021-0,052 (F2), 0,065-0,09 (F3), 0,11-0,13 (F4) y 0,18-0,24 (F5). Los ciclos de la primera franja (F1) se corresponden con periodicidades de 131,8 y de 83,6 m. En la F2, las periodicidades tienen valores de 48,6, 39,9 y 19,4 m. En la F3, destacan tres máximos en 14,9, 12,6 y 11,3 m. En la F4, se reconocen dos periodicidades muy próximas en 8,8 y 7,7 m. En la franja de frecuencias más altas (F5)

también destacan tres periodicidades que aparecen en 5,5 m, 4,5 m y 4,2 m.

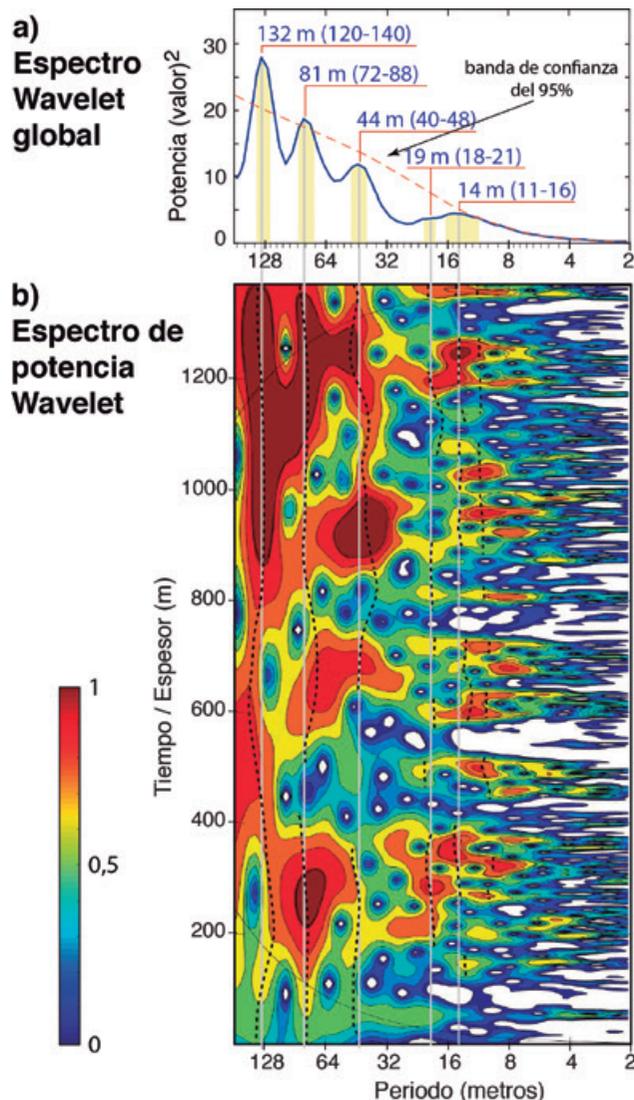
El resultado obtenido mediante el espectro de potencia Wavelet global (Fig. 5a) permite reconocer cuatro máximos localizados en torno a periodicidades de 132 m (rango 120-140 m), 81 m (rango 72-88 m), 44 m (rango 40-48 m) y 14 m (rango 11-20 m) que superan, excepto el ciclo de 40-48 m, la banda de confianza del 95%. En la imagen del espectro de potencia Wavelet según el espesor (Fig. 5b) se observa que los diferentes ciclos aparecen de forma discontinua y con máximos relativamente amplios, por lo que con esta metodología no resulta posible precisar el valor de las frecuencias de los ciclos. No obstante, sí es factible observar en qué parte de la serie aparece cada uno de los ciclos periódicos. El ciclo en torno a 132 m aparece en la parte media-alta de la serie (desde los 400 m), estando espe-

cialmente bien desarrollado en los 500 m superiores. El ciclo en torno a 81 m aparece muy bien desarrollado en la parte inferior (100 a 400 m) y superior (desde los 1000 m) y de forma más discontinua en el resto de la serie. El ciclo en torno a 44 m está muy bien representado en la parte alta de la serie (desde los 800 m) y más discontinuamente en la parte media (600-700 m) e inferior (100-400 m). El ciclo en torno a 14 m aparece, aunque de manera discontinua, a lo largo de la serie. También aparece un ciclo, aunque de forma mucho menos definida, en torno a 19 m. Aunque muy discontinuo, está bien desarrollado entre los 200 y los 400 m.

Los resultados obtenidos con la Transformada Rápida de Fourier (LAH) se muestran en la figura 6, donde se observan un gran número de máximos de frecuencia. Este método, al igual que el Wavelet, permite analizar la continuidad y desarrollo de los máximos a lo largo de la serie estratigráfica. Los máximos más continuos y mejor desarrollados son aquellos de frecuencia más baja, especialmente el de periodicidad de 142 m, sustancialmente patente en la parte media y alta de la serie estratigráfica. Por el contrario, el otro ciclo de baja frecuencia (80 m) está mejor desarrollado en la parte inferior y superior de la serie. Los ciclos de la banda de frecuencia F2 presentan una distribución similar, estando más patente el ciclo de 38,5 m en la parte media de la serie, el de 47,6 m en la parte alta y el de 19,6 m en la parte inferior. Los ciclos de alta frecuencia, a excepción de los de la banda F3, presentes en toda la serie, (periodicidades de 14,7 m, 12,7 m y 11,2 m), están mejor desarrollados en la parte media (periodicidades de la banda F4; 8,9 m y 7,4 m) o en la parte inferior de la serie estratigráfica (periodicidades de la banda F5; 6,2 m, 5,4 m, 4,5 m y 4,2 m).

### Interpretación

Los tres métodos utilizados en el análisis espectral muestran máximos bien definidos para varias periodicidades (Tabla 1) estando algunos de ellos muy próximos entre sí, de modo que se han distinguido varias franjas de frecuencias (F1 a F5 en Figs. 4 y 6). Si comparamos los resultados obtenidos por los distintos métodos es de destacar, por un lado, que muchas de las periodicidades (e.g., 131,8 m, 83,6 m, 39,9 m, 12,6 m) han sido reconocidas a partir de todos los métodos utilizados (Tabla 1). Estas periodicidades están, además, bien desarrolladas en la mayor parte de la serie estudiada. Los máximos correspondientes a las frecuencias más altas (4-9 m) no se han reconocido por el método Wavelet debido al suavizado de 1 m aplicado a la serie de tiempo antes de utilizar este procedimiento, ya que con este suavizado se aprecia

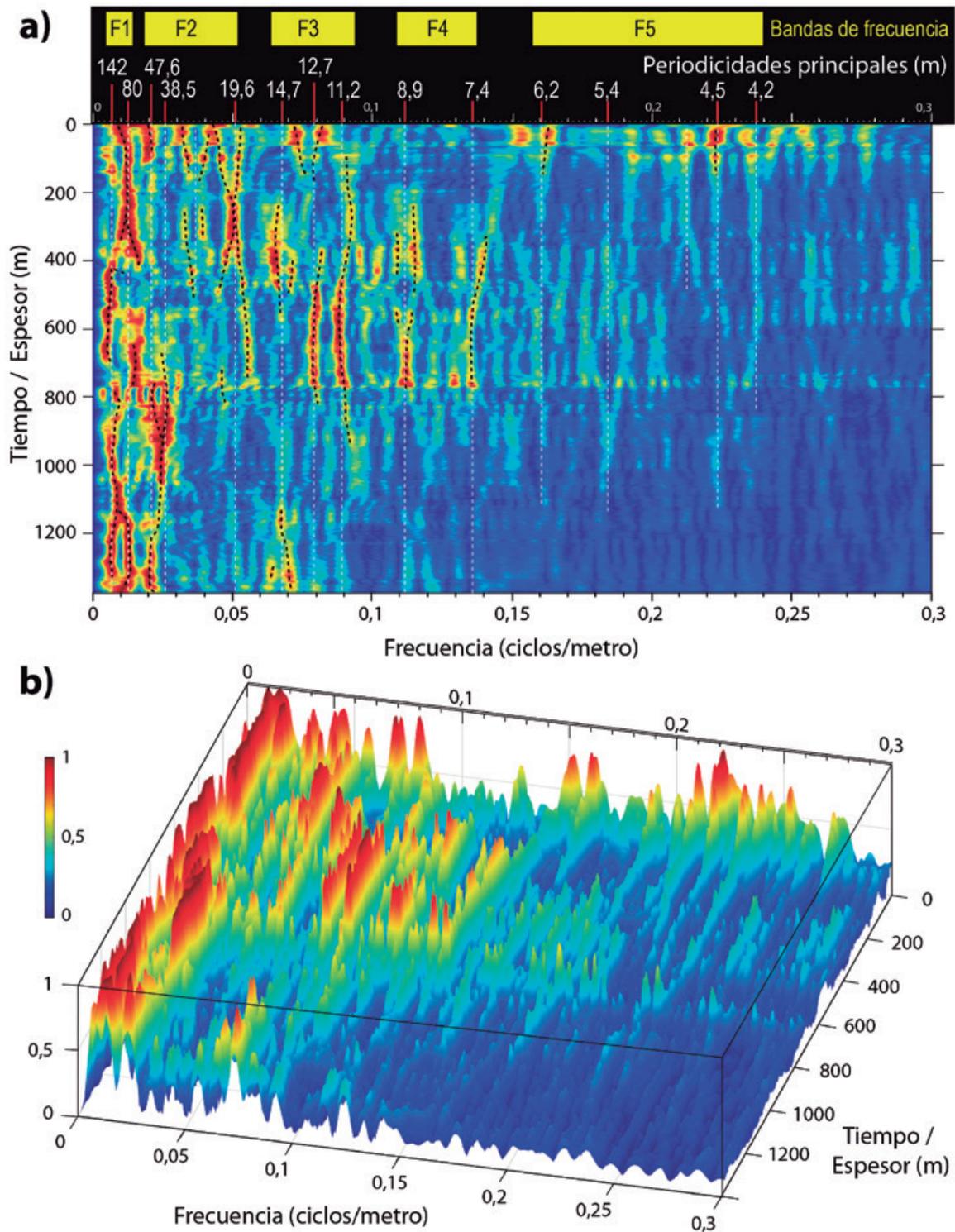


**Figura 5.** Análisis Wavelet de la serie de Ambas Aguas-Navalsaz, realizado a partir de la serie de tiempo litológica suavizada cada metro. a) Espectro global que muestra cinco periodicidades, en torno a 132, 81, 44, 19 y 14 m, respectivamente. b) Espectro de potencia Wavelet en el que se observa como el ciclo de periodicidad más alta (~132 m) aparece a lo largo de toda la serie de tiempo mientras que los ciclos de periodicidad decaométrica aparecen de forma más discontinua.

**Figure 5.** Wavelet analysis of the Ambas Aguas-Navalsaz succession carried out from the lithological time series smoothed every metre. a) Global spectrum shows five periodicities, around 132, 81, 44, 19 and 14 m, respectively. b) Wavelet power spectrum in which it can be observed that the cycle of highest periodicity (~132 m) appears throughout the entire time series whilst the cycles of deca-metric periodicity appear more discontinuously.

mejor el valor y posición de las periodicidades presentes en la serie de tiempo.

En los diferentes métodos de análisis espectral utilizados aparecen otras periodicidades con valores muy próximos a alguna de las periodicidades "principales"; quedando incluidas ambas en una de las franjas de frecuencias descritas. Por ello estas periodicidades



Método	Periodicidad (m)														
	Bandas de frecuencia														
	F1		F2			F3			F4		F5				
Multi-Taper (MTM)	<b>131,8</b>	83,6	48,6	<b>39,9</b>	19,4	<b>14,9</b>	<b>12,6</b>	<b>11,3</b>	<b>8,8</b>	7,7			5,5	<b>4,5</b>	4,2
Wavelet global	~132 (120-140)	~81 (72-88)	~44 (40-48)		~19 (18-21)	~14 (11-16)									
Transformada Rápida de Fourier (LAH)	<b>142</b>	80	47,6	<b>38,5</b>	<b>19,6</b>	14,7	<b>12,7</b>	<b>11,2</b>	8,9	7,4	6,2	5,4	4,5	4,2	

**Tabla 1.** Resultados del análisis espectral en la serie Ambas Aguas-Navalsaz del Grupo Enciso. Se agrupan con distintos colores las periodicidades incluidas dentro de la misma franja de frecuencias distinguidas en el método Multi-Taper (MTM). En negrita, periodicidades más relevantes.

**Table 1.** Results of the spectral analysis in the Ambas Aguas-Navalsaz succession of the Enciso Group. Periodicities distinguished with the Multi-Taper method (MTM) in the same frequency range are grouped with different colours. More relevant periodicities are in bold.

han sido denominadas como “subordinadas”. Así, en la franja de frecuencias F1 se incluyen la periodicidad principal 131,8 m y la subordinada 83,6 m; en la franja F2 la periodicidad principal 39,9 m y las subordinadas 48,6 y 19,4 m; en la franja F4 la periodicidad principal 8,8 y la subordinada 7,7 m y en las franjas F3 y F5 no se puede determinar cuál de ellas es la periodicidad principal y cuáles las subordinadas.

Las duplicidades observadas podrían interpretarse como resultado del registro de las diferentes modas de un mismo ciclo (por ejemplo, las dos modas características del ciclo de excentricidad corta o del de precesión; Milankovitch, 1941). También pueden estar representando el mismo proceso cíclico, estando influenciada la variación de su valor por otros factores de control de la ciclicidad, como por ejemplo cambios en la tasa de sedimentación (Weedon, 2003). En el análisis de ciclicidad realizado, la serie de datos representa un registro del dominio de espesores (o *depth domain record* siguiendo a Strasser *et al.*, 2006), de modo que se ha asumido que la tasa de sedimentación ha sido constante. Ahora bien, esta tasa puede haber variado a lo largo del tiempo controlada, por ejemplo, por las variaciones en la subsidencia asociadas a la actividad de fallas normales en esta cuenca extensional.

Así, los máximos que se repiten en todos los métodos se interpretan como las periodicidades obtenidas del análisis espectral de la serie de tiempo litológica del perfil Ambas Aguas-Navalsaz, siendo las periodicidades principales probablemente las que representan las modas mejor registradas de los distintos ciclos astronómicos (excentricidad, oblicuidad y precesión) en esta serie.

En la Tabla 2a se muestran los máximos y las relaciones existentes entre las principales frecuencias de Milankovitch (1941) que hemos calculado para el intervalo 125-134 Ma (Cretácico Inferior, por ser el in-

tervalo temporal aproximado en el que se emplaza la serie de Ambas Aguas-Navalsaz) mediante Multi-Taper a partir de las curvas de excentricidad, oblicuidad y precesión (ETP) de Laskar *et al.* (2011), y en la Tabla 2b las relaciones existentes entre las periodicidades obtenidas en el análisis espectral Multi-Taper a partir de nuestra serie de tiempo. Como se ha indicado, el análisis comparativo de estos valores es la herramienta fundamental para identificar y correlacionar los ciclos encontrados en nuestro análisis con las frecuencias de Milankovitch. Los valores numéricos obtenidos permiten esta correlación con un alto grado de fiabilidad, aunque el análisis comparativo permite plantear dos posibles alternativas en la interpretación (Tabla 2):

Alternativa 1: Que el ciclo subordinado de 48,6 m (el principal de 39,9 m no quedaría explicado) corresponda al ciclo de excentricidad larga (405 ka) mientras que el ciclo de 131,8 m corresponda al periodo de modulación de amplitud larga del ciclo de oblicuidad (1,2 Ma). De acuerdo con esta interpretación los ciclos de 14,9 y 11,3 m representarían las dos modas del ciclo de excentricidad corta (125 y 95 ka) y el ciclo de 4,2 m correspondería a la moda principal del ciclo de oblicuidad (37,2 ka).

Alternativa 2: Interpretar el ciclo principal de 39,9 m como el registro del ciclo de excentricidad corta (moda de 125 ka) y el ciclo de 131,8 m como el ciclo de excentricidad larga (405 ka). En este caso, el ciclo de 12,6 m estaría relacionado con el ciclo de oblicuidad y los ciclos de 7,7 m y de 5,5 m con las dos modas del ciclo de precesión. En esta interpretación los ciclos de 83,6 y 19,4 m corresponderían a los de excentricidad larga y corta, respectivamente, en zonas con una menor tasa de sedimentación.

Ninguna de las dos alternativas ofrece una correlación inequívoca con las frecuencias establecidas por Milankovitch (1941), ya que en la primera los picos de 83,6, 39,9 y 19,4 m no tienen una explicación direc-

**a) Relaciones entre los ciclos (tiempo) de Milankovitch**

Tiempo (ka)	Excentricidad				Oblicuidad	Precesión	
	Larga	Corta		Larga		Corta	
	1200	405	125	95	37,2	22,4	18,2
1200	1	3	9,6	12,6	32,3	53,6	65,9
405		1	3,2	4,3	10,9	18,1	22,3
125			1	1,3	3,4	5,6	6,9
95				1	2,6	4,2	5,2
37,2					1	1,7	2,0
22,4						1	1,2
18,2							1

Interpretación:

**Alternativa 1:** la periodicidad de 131,8 m representa el ciclo de 1200 ka

**Alternativa 2:** La periodicidad de 131,8 m representa el ciclo de excentricidad larga (405 ka)

Alternativas 1 y 2

**b) Relaciones entre los ciclos (espesor) reconocidos en el análisis espectral Multi-Taper (MTM)**

Bandas de frecuencia	Periodicidad (m)	F1		F2			F3			F4		F5		
		131,8	83,6	48,6	39,9	19,4	14,9	12,6	11,3	8,8	7,7	5,5	4,5	4,2
F1	131,8	1	1,6	2,7	3,3	6,8	8,8	10,5	11,7	15,0	17,1	24,0	29,3	31,4
	83,6		1	1,7	2,1	4,3	5,6	6,6	7,4	9,5	10,8	15,2	18,6	19,9
F2	48,6			1	1,2	2,5	3,3	3,9	4,3	5,5	6,3	8,8	10,8	11,6
	39,9				1	2,1	2,7	3,2	3,5	4,5	5,2	7,3	8,9	9,5
F3	19,4					1	1,3	1,5	1,7	2,2	2,5	3,5	4,3	4,6
	14,9						1	1,2	1,3	1,7	1,9	2,7	3,3	3,5
	12,6							1	1,1	1,4	1,6	2,3	2,8	3,0
F4	11,3							1	1,3	1,5	2,1	2,5	2,7	
	8,8								1	1,1	1,6	2,0	2,1	
F5	7,7									1	1,4	1,7	1,8	
	5,5										1	1,2	1,3	
	4,5											1	1,1	
	4,2												1	

**Tabla 2.** a) Relaciones entre los ciclos de Milankovitch calculados para el Cretácico inferior (125 a 134 Ma) a partir de los valores ETP de Laskar et al. (2011). b) Relaciones entre los máximos obtenidos en el análisis espectral (Multi-Taper) de la serie de tiempo litológica (Figs. 3 y 4). La comparación de las relaciones presentadas en a) y b) permiten hacer dos interpretaciones alternativas (opción 1 y opción 2) de la ciclicidad. Ver explicación en el texto.

**Table 2.** a) Relations between the Milankovitch cycles calculated for the Lower Cretaceous (125 to 134 Ma) from ETP values of Laskar et al. (2011). b) Relations between the maxima obtained in the spectral analysis (Multi-Taper) of the lithological time series (Figs. 3 and 4). The comparison between the relationships presented in a) and b) allows us to propose two alternative interpretations (1 and 2) for cyclicity. See explanation in the text.

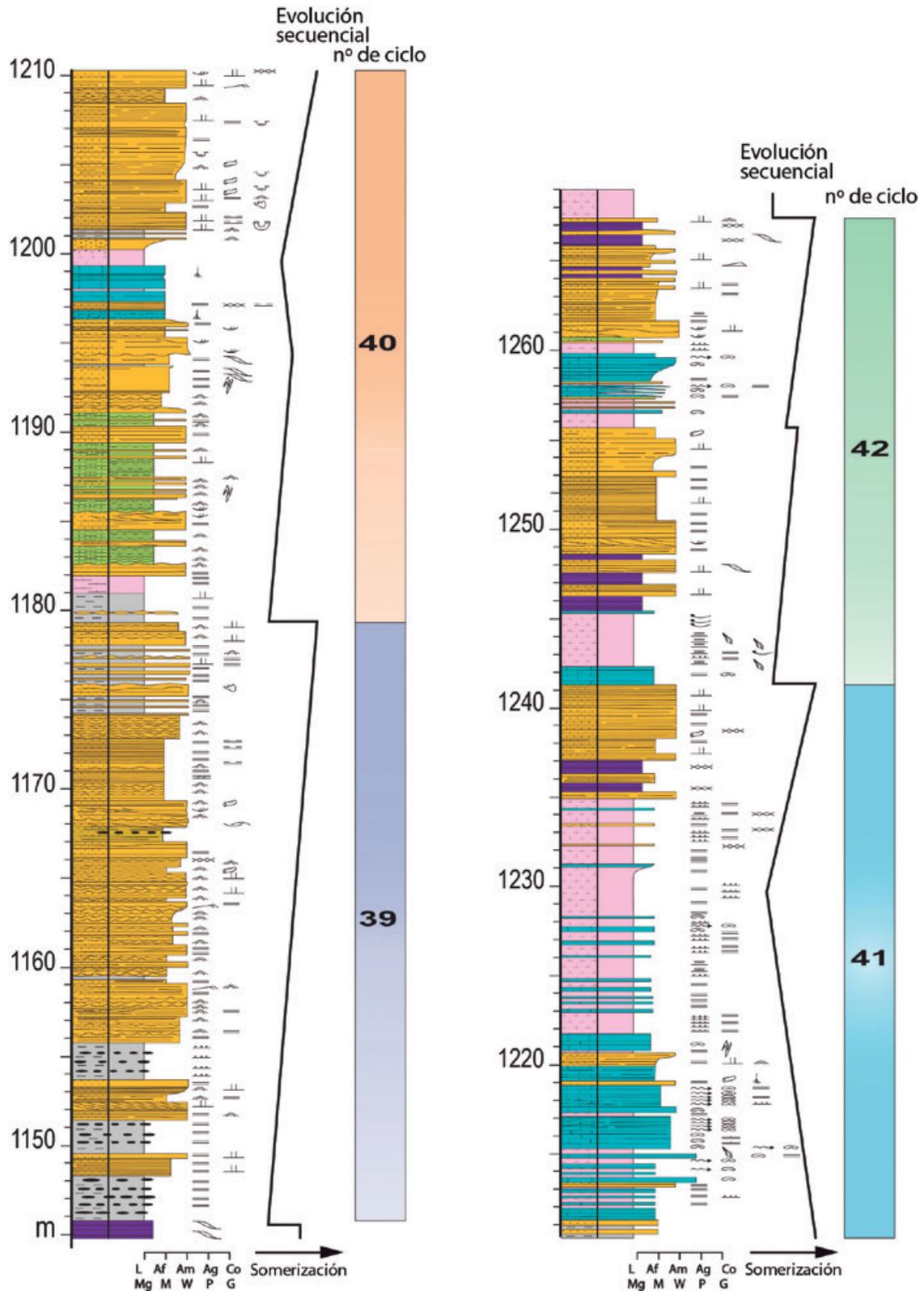
ta. Por otro lado, en la segunda no estaría presente la moda de 95 ka del ciclo de excentricidad corta. En la siguiente sección se discutirán ambas opciones con el objetivo de valorarlas e intentar alcanzar unas conclusiones válidas.

**La construcción de la escala astrocronológica**

La construcción de la escala astrocronológica requiere identificar alguno de los ciclos astronómicos sobre la

serie de datos, es decir, sobre la columna litológica. El ciclo de excentricidad larga (405 ka), por permanecer relativamente estable durante los últimos 250 Ma (Laskar et al., 2004), ha sido considerado como un metrónomo, por lo que, independientemente de la alternativa considerada, será utilizado como referente para la construcción de la escala astrocronológica y, más tarde, para el estudio de las relaciones tectónica/sedimentación.

Para una mayor facilidad en el análisis, se ha procedido a reconocer y delimitar en la columna estrati-



**Figura 7.** Detalle de la columna estratigráfica de Ambas Aguas-Navalsaz donde se muestran los ciclos 39 a 42 definidos a partir de las características estratigráficas y su evolución secuencial. Leyenda en la figura 2.

**Figure 7.** Detail of the stratigraphic profile of Ambas Aguas-Navalsaz where cycles 39 to 42 determined from stratigraphic characteristics and their sequential evolution are shown. Legend in Figure 2.

gráfica los ciclos sedimentarios con espesores situados en torno a 20-50 metros, es decir, aquellos ciclos que se corresponderían con la banda de frecuencias F2 (rango 48,6-19,4 m). Aunque en la columna se reconocen ciclos de muy diferente espesor, se ha escogido esta periodicidad intermedia porque los ciclos de este espesor son más fáciles de reconocer sobre la columna estratigráfica detallada que aquellos de periodicidad mayor (131,8 m) o menor (<12 m) y porque en la primera de las interpretaciones, estos ciclos se corresponderían con el ciclo de excentricidad larga. Los límites de los ciclos establecidos están basados en criterios estratigráficos y de evolución secuencial que varían en función del ambiente sedimentario en el que se depositaron. En las unidades U1 y U2, constituidas por sedimentos formados en un sistema fluvial distal, los ciclos están organizados, mayoritariamente, en secuencias granodecrecientes, y los límites de ciclo están caracterizados por niveles arenosos erosivos que aparecen sobre facies detríticas finas depositadas en zonas de llanura de inundación. En la parte superior de la unidad U2 y a lo largo de toda la unidad U5, donde las facies fluviales alternan con las zonas marginales de lagos siliciclásticos o carbonatados, los ciclos son referibles a secuencias deltaicas cuyo límite superior corresponde a una rápida profundización del sistema lacustre (Fig. 7, ciclos 39 y 40). En las unidades U3 y U4, caracterizadas por depósitos generados en lagos mayoritariamente carbonatados, los ciclos muestran, por lo general, una evolución profundizante-somerizante, situándose los límites en los cambios de tendencia (Fig. 7 ciclo 41). El resultado de este análisis, basado exclusivamente en criterios estratigráficos ha permitido identificar 45 ciclos completos y 2 ciclos parciales situados, respectivamente, a base y techo de la columna (Tabla 3). Los ciclos completos tienen espesores que oscilan entre 19 y 57 m (Fig. 8) y aparecen posicionados y numerados correlativamente en el perfil estratigráfico de la figura 2. El espesor medio de los ciclos (Fig. 8a) es de 29,7 m (desviación estándar 7,6).

De forma paralela, se ha aplicado a la serie de tiempo litológica (línea azul en Fig. 8b) un filtro gaussiano centrado en la frecuencia 0,033 con un rango de variación de  $\pm 0,011$ , es decir, incluyendo ciclos en el intervalo 45,5-22,7 m. Los resultados obtenidos (línea roja en Fig. 8b) permiten interpretar la presencia de 44 ciclos completos y 1 ciclo casi completo (~3/4 partes de ciclo), valor muy similar al obtenido mediante criterios sedimentológicos.

En la primera interpretación (alternativa 1), los ciclos de excentricidad larga se corresponden con los ciclos en torno a 40 m identificados a partir del análisis espectral y también reconocidos en la columna estratigráfica. A partir de esta interpretación (45 ciclos

Ciclo	Inicio (m)	Espesor (m)
incompleto	0	
1	15	19
2	34	26
3	60	23
4	83	24
5	107	19
6	126	31
7	157	30
8	187	29
9	216	34
10	250	28
11	278	43
12	321	20
13	341	31
14	372	24
15	396	24
16	420	29
17	449	37
18	486	22
19	508	38
20	546	29
21	575	26
22	601	35
23	636	36
24	672	19
25	691	35
26	726	36
27	762	26
28	788	27
29	815	32
30	847	22
31	869	21
32	890	37
33	927	34
34	961	38
35	999	32
36	1031	57
37	1088	37
38	1125	21
39	1146	33
40	1179	31
41	1210	31
42	1241	26
43	1267	20
44	1287	25
45	1312	39
incompleto	1351	

**Tabla 3.** Ciclos caracterizados en la serie Ambas Aguas-Navalsaz a partir, exclusivamente, de criterios estratigráficos y su espesor.

**Table 3.** Cycles characterized in the Ambas Aguas-Navalsaz succession based exclusively on stratigraphic criteria and thickness values.

completos de excentricidad larga -405 ka- que corresponden a 1.336 m de serie, más dos ciclos incompletos a base y techo de la misma, Tabla 3) se puede calcular una tasa de sedimentación de 73,3 m/Ma (1.336 m/18,225 Ma) y, si se tienen en cuenta los dos ciclos parciales inferior y superior, estimar una duración de ~18,7 Ma para toda la serie de Ambas Aguas-Navalsaz (18,12 Ma si se consideran los 44+3/4 ciclos obtenidos al suavizar la serie de datos con el filtro gaussiano).

En la segunda interpretación (alternativa 2), los ciclos en torno a 40 m reconocidos en la columna se corresponderían con la moda de 125 ka del ciclo de excentricidad corta. Con esta interpretación (45 ciclos de excentricidad corta -125 ka-, que supondrían un lapso de 5,6 Ma) se puede calcular una tasa de sedimentación de 238,6 m/Ma (1.336 m/5,6 Ma), estimándose una edad de ~5,7 Ma para el conjunto de la serie estudiada (5,6 Ma si se consideran los 44+3/4 ciclos obtenidos al suavizar la serie de datos). En este caso, aplicando también una metodología de filtrado (filtro gaussiano centrado en la frecuencia 0,008 con un rango de variación de  $\pm 0,0055$ , es decir, incluyendo ciclos en el intervalo 74-400 m centrado en 125 m, ver Fig. 9), se han podido reconstruir también 13 ciclos completos referibles al ciclo de excentricidad larga (405 ka) utilizado como metrónomo para tiempos pre-cenozoicos. Del mismo modo, con esta interpretación (13 ciclos de excentricidad larga-405 ka- entre los metros 15 y 1.354) se puede calcular una tasa de sedimentación de 254,6 m/Ma (1.339 m/5,26 Ma) y estimar también una duración de ~5,4 Ma para toda la serie de Ambas Aguas-Navalsaz.

## Discusión

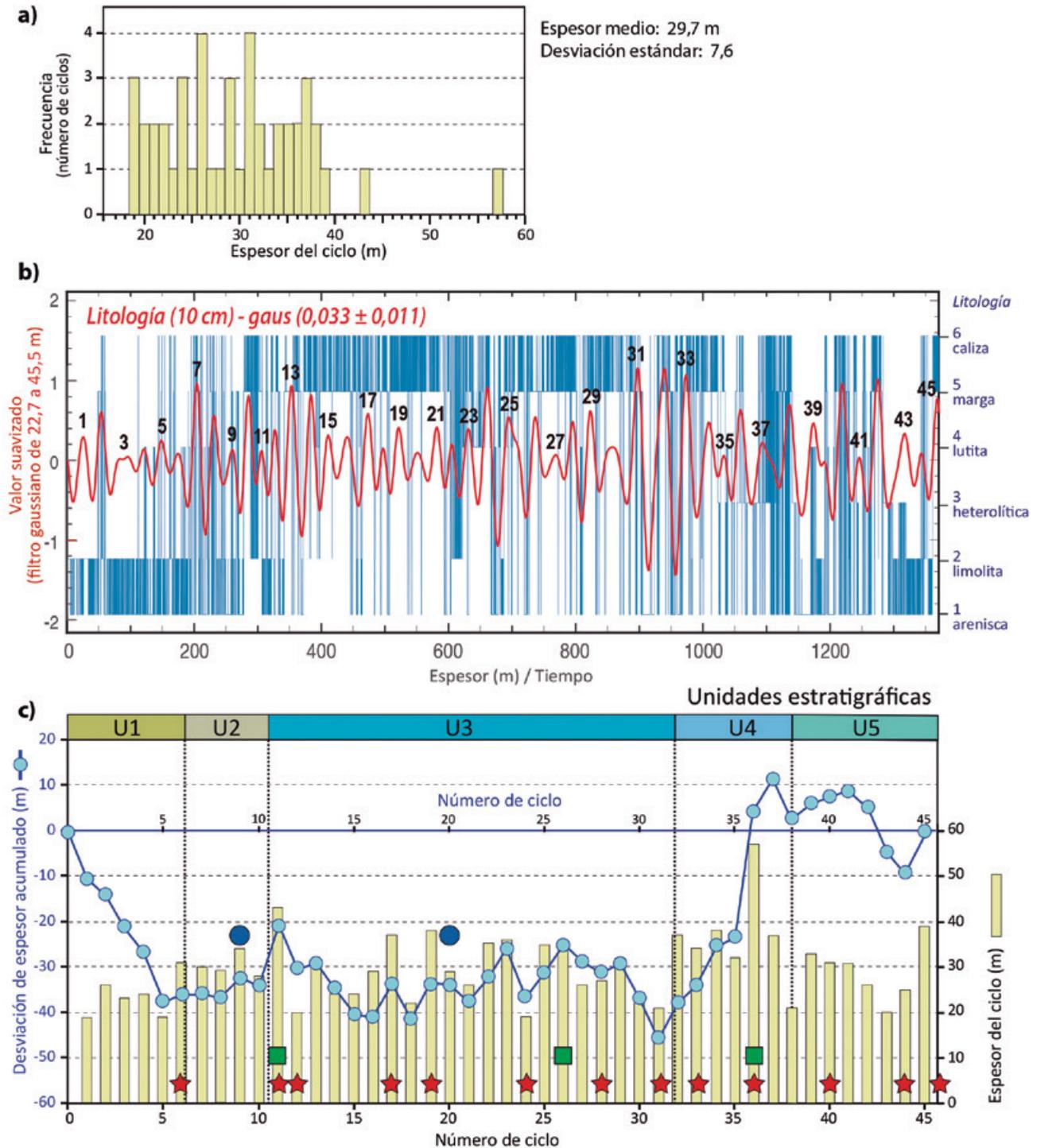
### **Intervalo temporal abarcado por la serie de Ambas Aguas-Navalsaz**

El análisis cicloestratigráfico de los cambios litológicos registrados en el perfil Ambas Aguas-Navalsaz ha permitido reconocer la existencia de 13 ciclos bien definidos que superan la banda de confianza del 95%, agrupados en cinco franjas de frecuencia (Fig. 4). La comparación de los resultados de los distintos métodos utilizados muestra, por un lado, que algunos de los ciclos se reconocen en todos ellos (periodicidades principales) mientras que otros no se reconocen o tienen un desarrollo mucho más pobre (periodicidades subordinadas) y, por otro, observar que cada franja de frecuencias está compuesta normalmente por un ciclo principal (131,8 m, 39,9 m y 8,8 m en las franjas 1, 2 y 4, respectivamente) y otros, subordinados (83,6 m, 48,6 m 19,4 m y 7,7 m, respectivamente).

Las dos alternativas a la interpretación de la ciclicidad parten de que el ciclo de 48,6 m (en la alternativa 1) o de 39,9 m (en la alternativa 2) reconocidos en la sucesión litológica se correspondan con el ciclo de excentricidad larga (405 ka) (alternativa 1) o con la moda de 125 ka del ciclo de excentricidad corta (alternativa 2). Aunque las dos interpretaciones pueden ser válidas por la comparación de los valores numéricos (Tabla 2), la segunda parece ser la correcta por varios motivos: En la primera interpretación sólo se explican de una manera satisfactoria cinco de los ciclos reconocidos (periodicidades de 131,8, 48,6, 14,9, 11,3 y 4,2 m), mientras que la segunda alternativa explica los ciclos de 131,8, 39,9, 12,6, 7,7 y 5,5 m correspondientes a todas las frecuencias de los ciclos de Milankovitch (los dos últimos referibles a las dos modas del ciclo de precesión) y la mayor parte del resto de los ciclos (83,6, 19,4, 8,8, 4,5 y 4,2 m) serían equiparables a las mismas frecuencias de Milankovitch en zonas con menor tasa de sedimentación. A este respecto, los ciclos subordinados son muy similares a los definidos por Angulo y Muñoz (2013) en la zona de Munilla (90,56, 16,66, 7,14, 5,37 y 3,93 m), donde el espesor total de esta unidad es también menor (996 m). Otro aspecto por el que la segunda alternativa parece ser más apropiada es que las periodicidades explicadas se corresponden mayoritariamente con periodicidades principales (lo que no ocurre en la alternativa 1) y también que estas representan todos los ciclos de Milankovitch (1941), excentricidad larga y corta (moda 125 ka), oblicuidad y las dos modas de precesión (Tabla 2).

Por otra parte, ambas alternativas se traducen en valores muy distintos para el lapso temporal abarcado por la serie estudiada (18,7-18,2 Ma en la alternativa 1 frente a 5,4-5,7 Ma en la alternativa 2) así como para la tasa de sedimentación (73,3-75,3 frente a 238,6-254,6 m/Ma). Allen y Allen (2013) señalan que el valor promedio de subsidencia tectónica durante las etapas sin-rift de cuencas extensionales se sitúa en torno a 0,2 mm/año (200 m/Ma), valor que se encuentra más próximo a los obtenidos en la segunda alternativa. Además, considerando que dentro del dominio centro-ibérico es la Cuenca de Cameros la que experimentó la tasa de subsidencia más alta (Salas *et al.*, 2001) y que Omodeo-Salé *et al.* (2017) señalan que el intervalo temporal entre 129 y 108,7 Ma está caracterizado por una importante subsidencia tectónica, parece que la alternativa 2, con una tasa de sedimentación en torno a ~245 m/Ma, sería más acorde con la dinámica (historia de subsidencia) de la cuenca.

Por otro lado, comparando los resultados de duración de la serie de Ambas Aguas-Navalsaz obtenidos a partir de las dos alternativas propuestas, con los valores aportados por otros autores para el Grupo Enciso



**Figura 8.** a) Histograma de frecuencias del espesor de los ciclos sedimentarios reconocidos en la columna de Ambas Aguas-Navalsaz a partir de criterios estratigráficos. b) Filtro gaussiano (frecuencia:  $0,033 \pm 0,011$ ) de la serie de tiempo litológica del perfil Ambas Aguas-Navalsaz donde aparecen 44 ciclos completos y 1 ciclo casi completo (3/4 partes). c) Desviaciones sobre el espesor promedio de los ciclos identificados en el Grupo Enciso (según la metodología de Schwarzacher, 2005). También se muestra en forma de histograma el espesor de cada ciclo sedimentario. Estrella roja: estructuras de deformación de sedimentos blandos. Cuadrado verde: fallas normales sinsedimentarias. Círculo azul: incursiones marinas. Ver explicación en el texto.

**Figure 8.** a) Histogram of frequencies of the thickness of the sedimentary cycles recognized in the Ambas Aguas-Navalsaz profile based on stratigraphic criteria. b) Gaussian filter (frequency:  $0.033 \pm 0.011$ ) of the lithological time series of the Ambas Aguas-Navalsaz profile where 44 and 3/4 cycles are identified. c) Deviations on the average thickness of the cycles identified in the Enciso Group (according to Schwarzacher, 2005 methodology). Thickness of each sedimentary cycle is also shown as a histogram. Red star: soft sediment deformation structures. Green square: syn-sedimentary normal faults. Blue circle: marine incursions. See explanation in the text.

(5,6±0,4 Ma, Doublet, 2004; 5,7 Ma, Angulo y Muñoz, 2013 y 5,57 Ma, Hernán, 2018), se deduce que la segunda alternativa aquí contemplada (5,4-5,7 Ma) está más próxima a los valores obtenidos por estos autores. Además, la posibilidad de asignar al Grupo Enciso un intervalo temporal de 18,7 Ma (alternativa 1) parece poco adecuada si consideramos la cronoestratigrafía de la Cuenca de Cameros previamente establecida (Mas *et al.*, 2003 y Omodeo-Salé *et al.*, 2016).

### **Relaciones tectónica/sedimentación**

En la zona de estudio y su entorno se ha puesto de manifiesto el desarrollo de una tectónica extensional que se revela por la existencia de fallas normales sinsedimentarias de escala kilométrica, con orientaciones NNO-SSE y NNE-SSO y saltos decamétricos a hectométricos (Fig. 1). Para discriminar entre la señal climática y la señal tectónica que ha quedado registrada en los materiales del Grupo Enciso se han analizado las variaciones de espesor de los diferentes ciclos identificados en la serie estratigráfica. Al representar todos los ciclos la misma duración temporal, su espesor es considerado como un parámetro que depende del espacio de acomodación creado en dicho periodo por subsidencia tectónica, si se asume que los sedimentos rellenan todo el espacio de acomodación.

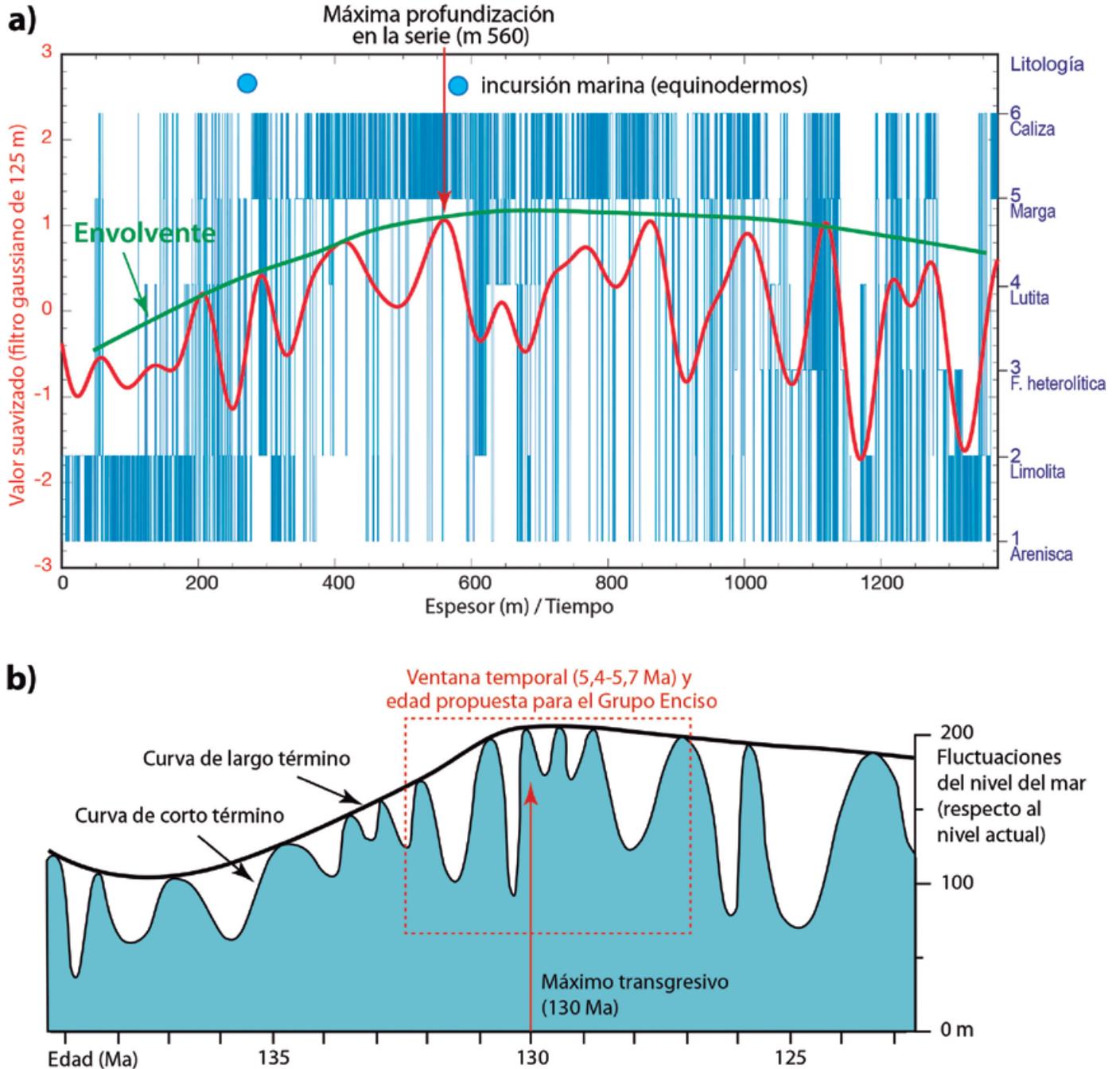
La figura 8c muestra un histograma con los espesores de cada ciclo y, siguiendo la metodología establecida por Schwarzacher (2005), un gráfico con las desviaciones de espesor acumuladas que presenta cada ciclo en relación con el espesor promedio de los ciclos (29,7 m) calculado para toda la columna. Este gráfico permite analizar las variaciones del espacio de acomodación a lo largo del tiempo, de modo que una bajada en la curva indica que el ciclo tiene un espesor menor que la media y viceversa, una subida indica un ciclo con mayor espesor que la media.

El análisis de este gráfico permite diferenciar una primera etapa correspondiente a la casi totalidad de la unidad U1 (ciclos 1 a 5), con un descenso casi continuado del espacio de acomodación. Desde el ciclo 5 hasta el 31 (unidades U2 y U3) la tendencia de la curva cambia, observándose una estabilidad o ligero aumento del espacio de acomodación que va acompañado de ascensos y descensos puntuales. Estos cambios de tendencia se han interpretado en relación con la actividad pulsada de fallas sinsedimentarias, como así lo sugieren las observaciones de campo sobre fallas concretas y la presencia de estructuras de deformación en sedimentos blandos (*slumpy* laminación convolucionada) en este tramo de la serie. Nótese como las estructuras de deformación aparecen distribuidas

a lo largo de la serie y se localizan normalmente en los ciclos de mayor espesor o que representan un aumento en el espacio de acomodación (Fig. 8c). Entre los ciclos 31 y 37 (unidad U4) se observa un importante aumento de espacio de acomodación. Este cambio de tendencia es interpretado como resultado de una reactivación de la actividad tectónica extensional en la zona de Ambas Aguas-Navalsaz durante la sedimentación de estas unidades lacustres. En todo este intervalo se observan numerosas fallas sinsedimentarias, abanicos de capas y estructuras de deformación (*slumps*, diques clásticos, etc.), especialmente localizadas en los sedimentos detríticos de los ciclos de mayor espesor (Figs. 2, 8c), que en ocasiones muestran estratificación cruzada *hummocky*. Estas observaciones corroboran la existencia de una importante tectónica sinsedimentaria durante este intervalo. Finalmente, desde el ciclo 37 hasta el techo de la serie (unidad U5), aunque la falta de más serie impide confirmar la tendencia, parece deducirse una lenta caída de la subsidencia de la cuenca aunque con intervalos de creación de espacio de acomodación donde también se han reconocido estructuras de deformación.

El aumento en el espacio de acomodación se puede explicar a partir de una mayor subsidencia tectónica de la cuenca pero también con una subida del nivel de base. Considerando las características de las facies sedimentarias, mayoritariamente areniscosas durante las unidades U1, U2 y U5 y carbonatadas en las unidades U3 y U4, se evidencia una cierta relación entre el cambio en el espacio de acomodación y el tipo de sedimentos, de manera que el espacio de acomodación aumenta en relación con el predominio de facies carbonatadas y disminuye con las facies detríticas. El aumento de espacio de acomodación en las facies carbonatadas del Grupo Enciso también está controlado, como hemos dicho, por la actividad tectónica contemporánea, reconocible por la presencia de estructuras de deformación en sedimentos blandos y fallas normales sinsedimentarias. En la primera parte de la serie (unidad U1) se puede interpretar una actividad tectónica menos importante que supone un descenso del espacio de acomodación. Por el contrario, para el resto de la serie, excepto la parte superior (unidad U5) se puede interpretar una tectónica más activa, responsable del aumento en la subsidencia de la cuenca.

Durante la sedimentación del Grupo Enciso en la Cuenca de Cameros, la variación del nivel de base tendría, probablemente, una cierta influencia en la variación del espacio de acomodación. Esta unidad ha sido interpretada como depositada en sistemas fluvio-lacustres con influencia marina (Guiraud y Seguret, 1985; Alonso y Mas, 1993; Mas *et al.*, 1993; Suárez-González *et al.*, 2010; Suárez-González, 2015).



**Figura 9.** a) Serie de tiempo litológica continua semicuantitativa (Fig. 3) suavizada con un filtro gaussiano centrado en una frecuencia de  $0,008 \pm 0,0055$  (125 m). El suavizado pone de manifiesto la existencia de 13 ciclos completos referibles al ciclo de excentricidad larga (405 ka). b) Fluctuaciones del nivel del mar de corto y largo término para el Cretácico Inferior (según Haq, 2014).

**Figure 9.** a) Semi-quantitative continuous lithological time series (Fig. 3) smoothed with a Gaussian filter centred at a frequency of  $0.008 \pm 0.0055$  (125 m). The smoothing shows the occurrence of 13 complete cycles referring to the long eccentricity cycle (405 ka). b) Long-term and short-term sea level curves for the Early Cretaceous (after Haq, 2014).

En la columna de Ambas Aguas-Navalsaz también se han encontrado restos de equinodermos en los metros 247 y 580. Este tipo de sistemas, cuando se desarrollan cerca de la costa, son muy sensibles a las variaciones eustáticas. De hecho, la altura del nivel de base determina la separación o conexión entre las áreas mayoritariamente fluviales o lacustres costeras y las áreas propiamente marinas, condicionando la mayor o menor facilidad para el drenaje en la zona emergida de la cuenca sedimentaria y, por tanto, el desarrollo de un tipo determinado de facies. Así, un nivel de base bajo (bajo nivel del mar) favorecería el drenaje en la cuenca y la sedimentación de facies detríticas cerca del mar, mientras que un nivel de base alto (alto nivel del mar) dificultaría el drenaje, favoreciendo la implantación de extensas zonas lacustres donde pudo desarrollarse una sedimentación carbonatada. De este modo, interpretamos que el ciclo de profundización-somerización reconocido en el perfil de Ambas Aguas-Navalsaz estuvo probablemente condicionado por un ciclo eustático (ascenso-descenso del nivel del mar) de primer orden en la cuenca marina adyacente, que dejó su impronta en los sistemas continentales costeros a través de un ascenso del nivel de base. A partir de nuestros resultados este ciclo eustático sería el responsable del cambio paleogeográfico y evolutivo descrito (fluvial-lacustre-fluvial), pero no parece ser el principal factor en el control de los cambios registrados en el espacio de acomodación de la serie, que estaría fundamentalmente condicionado por la tectónica.

### **Datación de la serie**

A partir de los datos disponibles en la columna de Ambas Aguas-Navalsaz se puede constatar la influencia de variables como la eustasia y la subsidencia además del control ejercido por ciclos orbitales de precesión, oblicuidad y excentricidad en el relleno de la Cuenca de Cameros, siendo un buen ejemplo de la interacción de diferentes factores de control en la sedimentación continental durante el Cretácico Inferior. Las variaciones en las facies sedimentarias (fluvial-lacustre-fluvial) se han interpretado como el reflejo, en un lago costero conectado con el mar, de un ciclo de ascenso-descenso eustático (Guiraud y Seguret, 1985; Alonso y Mas, 1993; Mas *et al.*, 1993; Suárez-González *et al.*, 2010; Suárez-González, 2015). Si tenemos en cuenta que las unidades infrayacente (Grupo Urbión) y suprayacente (Grupo Oliván) se depositaron en medios fluviales (Suárez-González, 2015), este ciclo de ascenso-descenso eustático podría abarcar un lapso de tiempo mayor y representar, por tanto, un ciclo eustático de primer orden.

Nuestra hipótesis de trabajo, aun por corroborar, es que el ciclo de ascenso-descenso del nivel de base reconocido en la Cuenca de Cameros puede estar asociado al ciclo transgresivo-regresivo que caracteriza el Cretácico Inferior, con su máximo transgresivo localizado en torno a 130 Ma (Haq, 2014). Esta relación entre la transgresión y la implantación de la sedimentación netamente lacustre en la zona de Ambas Aguas-Navalsaz nos puede permitir anclar la escala cronoestratigráfica flotante y la escala cronoestratigráfica del Cretácico Inferior y, por tanto, datar la serie estratigráfica estudiada. En concreto, situamos el máximo transgresivo en las facies lacustres margosas reconocidas en torno al metro 560 (ciclo 20; Fig. 2), que según los modelos sedimentológicos (Doublet *et al.*, 2003; Angulo y Muñoz, 2013; Hernán, 2018) se corresponden con las facies más profundas del sistema lacustre y se sitúan muy próximas a la segunda incursión marina reconocida (metro 580 de la serie). Si tenemos en cuenta dicha relación, se puede estimar que la base del Grupo Enciso se situaría en torno a 132,5-132,3 Ma (Hauteriviense) y el techo en torno a 126,8-126,9 Ma (Barremiense), según se utilicen los intervalos temporales obtenidos a partir de la utilización de los ciclos de excentricidad corta o larga, respectivamente (Fig. 9). Esta interpretación supone asignar una edad ligeramente más antigua a las establecidas recientemente para esta unidad por Hernán (2018), entre 122,56-128,13 Ma (Barremiense-Aptiense inferior), y por Omodeo-Salé *et al.* (2019), entre 121-127 Ma (Barremiense superior-Aptiense inferior), a partir del anclaje de la escala cronoestratigráfica flotante con biozonas de carofitas, siendo más conforme con la propuesta de edad (Valanginiense superior-Barremiense) realizada por Schudack y Schudack (2009) a partir de las abundantes asociaciones de ostrácodos de agua dulce reconocidas en este grupo (Fig. 10).

### **Conclusiones**

El análisis cicloestratigráfico del Grupo Enciso realizado en el perfil de Ambas Aguas-Navalsaz a partir de datos litológicos ha permitido reconocer, mediante el método Multi-Taper (MTM), 13 máximos de potencia que superan la banda de confianza del 95% agrupados en 5 bandas de frecuencia. Estos ciclos han sido reconocidos, con diferentes grados de precisión, en los tres métodos utilizados en el análisis (MTM, Wavelet y LAH) y son interpretados como periodicidades principales de los ciclos de Milankovitch.

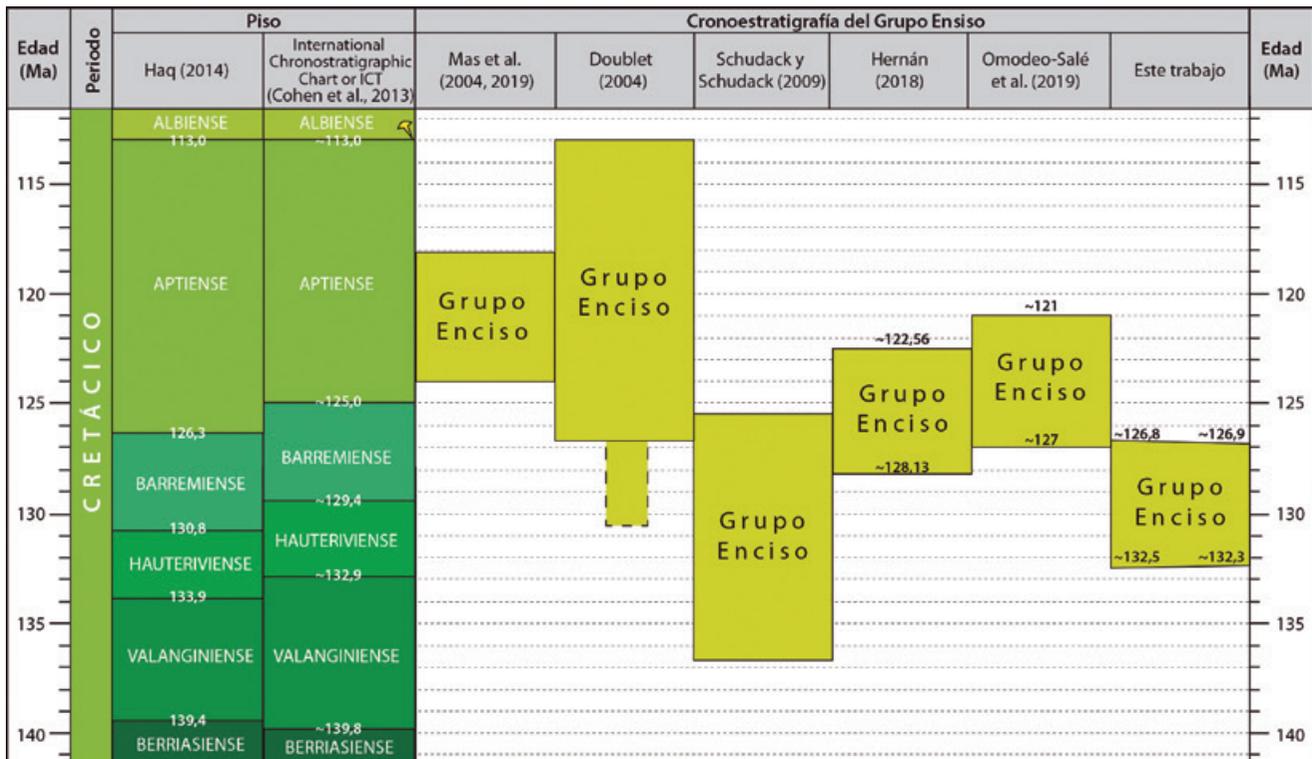
La correlación de los resultados obtenidos con los datos sobre la historia de la subsidencia de la cuenca apunta a que los ciclos de 131,8-83,6 m y 39,9-19,4 m

se corresponden con los ciclos de excentricidad larga y corta (405 y 125 ka respectivamente), para diferentes valores de tasa de sedimentación. El ciclo de 12,6 m estaría relacionado con el ciclo de oblicuidad y los ciclos de 7,7 y 5,5 m con las dos modas del ciclo de precesión. A partir de esta interpretación, la duración del Grupo Enciso se estima en unos 5,4-5,7 Ma.

El contexto sinrift en el que se deposita el Grupo Enciso es el adecuado para analizar las interacciones entre los diferentes factores que controlan el relleno de la cuenca. Las variaciones de espesor de los ciclos litológicos definidos en la columna estratigráfica permiten identificar y estudiar las variaciones del espacio de acomodación a lo largo del tiempo y establecer así una base que permita discriminar entre la señal tectónica y la señal climática. Se identifica un descenso gradual del espacio de acomodación coincidiendo con la instalación en la cuenca de un sistema lacustre con facies fundamentalmente carbonatadas. Posteriormente, se observa una estabilización o ligero incremento durante el episodio de sedimentación lacustre y, seguidamente, un importante aumento del espacio de acomodación que ha sido interpretado como consecuencia de un incremento de la actividad tectónica, interpretación avalada, además, por

la existencia de fallas sinsedimentarias, abanicos de capas y estructuras de deformación. Durante la etapa final del Grupo Enciso se observa una ligera disminución del espacio de acomodación. A partir del análisis de las interacciones entre los diferentes factores de control se deduce que el eustatismo controla el contexto paleogeográfico durante la sedimentación del Grupo Enciso, mientras que la tectónica es la principal responsable de las variaciones en la creación del espacio de acomodación.

La instalación del ambiente lacustre marca la máxima profundización del sistema para el conjunto de los grupos Urbión (infrayacente), Enciso y Oliván (suprayacente) ya que tanto el Grupo Urbión como el Oliván se depositaron en ambientes fluviales, lo que definiría un ciclo de ascenso-descenso eustático de primer orden. En este contexto podría correlacionarse el pico de máxima profundización del sistema con el máximo transgresivo del Cretácico Inferior, que se sitúa en torno a los 130 Ma. Esta interpretación supone asignar una edad ligeramente más antigua a las establecidas para esta unidad, que se situaría entre 132,5-132,3 Ma y 126,8-126,9 Ma (Hauteriviense-Barremiense), según se utilicen los ciclos de excentricidad corta y larga, respectivamente.



**Figura 10.** Cronoestratigrafía del Grupo Enciso según diferentes autores y asignación temporal realizada en este trabajo.  
**Figure 10.** Chronostratigraphy of the Enciso Group after different authors and time assignation carried out from this study.

## Agradecimientos

La investigación ha sido financiada en el marco del proyecto UZ2017-CIE-08 de la Universidad de Zaragoza, el proyecto estratégico del grupo de investigación *Geotransfer* (E32-17R y E32-20R) co-financiado por el Gobierno de Aragón y el PO FEDER-Aragón 2014-2020 "Construyendo Europa desde Aragón" y el Proyecto DISCLITEC (PID2019-108705GB-I00) de la Agencia Estatal de Investigación del Gobierno de España. Los autores desean agradecer la colaboración del Servicio General de Apoyo a la Investigación-SAI de la Universidad de Zaragoza. Agradecemos las observaciones y sugerencias aportadas por los revisores Javier García Gil, José García-Hidalgo, Miguel López Blanco y Jesús Miguel Soria Mingorance y el trabajo del editor Eulogio Pardo-Igúzquiza que han contribuido a mejorar y clarificar el manuscrito.

## Referencias

- Allen, P.A. and Allen, J.R. 2013. *Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment*. John Wiley & Sons Oxford, 632 pp.
- Alonso, A. and Mas, J.R. 1993. Control tectónico e influencia del eustatismo en la sedimentación del Cretácico inferior de la Cuenca de Los Cameros. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 17, 285-310.
- Angulo, A. and Muñoz, A. 2013. Análisis de la periodicidad climática de baja frecuencia registrada en los sedimentos lacustres del Grupo Enciso (Cretácico inferior de la Cuenca de Cameros, La Rioja). Aplicaciones a la correlación y datación de la serie. *Boletín Geológico y Minero de España*, 124 (2), 203-219.
- Brenner, P. 1976. Ostrakoden und Charophyten des spanischen Wealden (Systematik, Ökologie, Stratigraphie, Paläogeographie). *Palaeontographica*, (A) 152, 113-201.
- Capote, R., Muñoz, J.A., Simón, J.L., Liesa, C.L. and Arlegui, L.E. 2002. Alpine Tectonics I: The Alpine system north of the Betic Cordillera. In: Gibbons, W. and Moreno, T. (eds.) *Geology of Spain*, The Geological Society, London, 367-400.
- Casas, A.M. 1992. El frente norte de las Sierras de Cameros: Estructuras cabalgantes y campo de esfuerzos. *Zubia*, 4, 11-220.
- Casas-Sainz, A.M. 1993. Oblique tectonic inversion and basement thrusting in the Cameros Massif (Northern Spain). *Geodinamica Acta*, 6, 202-216.
- Casquet, C., Galindo, C., González-Casado, J.M., Alonso, A., Mas, R., Rodas, M., García, E. and Barrenechea, J.F. 1992. El metamorfismo en la Cuenca de los Cameros. Geocronología e implicaciones tectónicas. *Geogaceta*, 11, 22-25.
- Clemente, P. 2010. Review of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous stratigraphy in western Cameros Basin, Northern Spain. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23 (3-4), 101-143.
- Cleveland, W.S. 1979. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74 (368), 829-836.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. and Fan, J.-X. 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36, 199-204.
- Doublet, S. 2004. *Contrôles tectonique et climatique de l'enregistrement stratigraphique dans un bassin continental de rift: le bassin de Cameros (Jurassique supérieur-Crétacé inférieur) provinces de Soria-La Rioja, Espagne*. PhD Thesis, Université de Bourgogne, Centre des Sciences de la Terre. Bourgogne, 497 pp.
- Doublet, S., García, J.P., Guiraud, M. and Ménard, A. 2003. Wave-dominated siliciclastic and carbonate sedimentation in a Lower Cretaceous lake (Cameros basin, Northern Spain). *Journal of Iberian Geology*, 29, 11-28.
- Goldberg, J.M., Guiraud, M., Maluski, H. and Séguret M. 1988. Caractères pétrologiques et âge du métamorphisme en contexte distensif du bassin sur décrochement de Soria (Crétacé inférieur Nord Espagne). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 307, 521-527.
- Gradstein, F.M. 2012. Introduction. In: Gradstein, F.M., Ogg, G., Schmitz, M.D. and Ogg, G. (eds.), *The geologic time scale*, Elsevier, 1-29.
- Guimerà, J., Alonso, A. and Mas, R. 1995. Inversion of an extensional-ramp basin by a newly formed thrust: the Cameros basin (N Spain). In: Buchanan, J.G. and Buchanan, P.G. (eds.), *Basin Inversion*. Geological Society Special Publication, 88, 433-453.
- Guiraud, M. and Seguret, M. 1985. A realising solitary overstep model for the Late Jurassic-Early Cretaceous (Wealdian) Soria strike-slip basin (Northern Spain). In: Biddle, K.T. and Cristhrie-Blick, N. (eds.), *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 37, 159-175.
- Haq, B.U. 2014. Cretaceous eustasy revisited. *Global and Planetary change*, 113, 44-58.
- Hernán, J. 2018. *Estratigrafía y sedimentología de las formaciones con icnitas de dinosaurios del Grupo Enciso (Cameros, La Rioja, Aptiense)*. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 521 pp.
- Hinnov, L. A. and Hilgen, F. J. 2012. Cyclostratigraphy and astrochronology. In: Gradstein, F.M., Ogg, G., Schmitz, M.D. and Ogg, G. (eds.), *The geologic time scale*, Elsevier, 63-83.
- Kodama, K.P. and Hinnov, L. 2015. *Rock Magnetic Cyclostratigraphy*. Wiley-Blackwell, Oxford, 176 pp.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M. and Levrard, B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 428, 261-285.

- Laskar, J., Fienga, A., Gastineau, M., and Manche, H. 2011. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 532, A89.
- Li, M., Hinnov, L. and Kump, L. 2019. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Computers and Geosciences*, 127, 12-22.
- Liesa, C.L., Casas, A.M., and Simón, J.L. 2018. La tectónica de inversión en una región intraplaca: la Cordillera Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 31 (2), 23-50.
- Martín-Closas, C. 1989. *Els caròfits del Cretaci inferior de les conques perifèriques del bloc de l'Ebre*. PhD Thesis. Universidad de Barcelona. 581 pp.
- Martín-Closas, C. 2000. *Els caròfits del Juràssic superior i el Cretaci inferior de la Península Ibérica* (Vol. 125). Institut d'Estudis Catalans. 304 pp.
- Martín-Closas, C. and Alonso Millán, A. 1998. Estratigrafía y bioestratigrafía (Charophyta) del Cretácico Inferior en el sector occidental de la Cuenca de Cameros (Cordillera Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 11 (3-4), 253-269.
- Martinez, M., Pellenard, P., Deconinck, J. F., Monna, F., Riquier, L., Boulila, S., Moiroud, M. and Company, M. 2012. An orbital floating time scale of the Hauterivian/Barremian GSSP from a magnetic susceptibility signal (Río Argos, Spain). *Cretaceous Research*, 36, 106-115.
- Mas, J.R., Alonso, A., and Guimerà, J. 1993. Evolución tectosedimentaria de una cuenca extensional intraplaca: La cuenca finijurásica-eocretácica de Los Cameros (La Rioja-Soria). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6 (3-4), 129-144.
- Mas, R., Benito, M.L., Arribas, J., Serrano, A., Guimerà, J., Alonso, A. and Alonso Azcárate, J. 2002. La Cuenca de Cameros: desde la extensión finijurásica-eocretácica a la inversión terciaria – implicaciones en la exploración de hidrocarburos. *Zubía*. Monográfico 14, 9-64.
- Mas, R., Benito, M.L., Arribas, J., Serrano, A., Guimerà, J., Alonso, A. and Alonso Azcárate, J. 2003. The Cameros Basin: From Late Jurassic-Early Cretaceous Extension to Tertiary Contractive Inversion-Implications of Hydrocarbon Exploration. Northwest Iberian Chain, North Spain. *Geological Field Trip*, 11, American Association of Petroleum Geologists, 58 pp.
- Mas, R., García, A., Salas, R., Meléndez, A., Alonso, A., Aurell, M., Bádenas, B., Benito, M.L., Carenas, B., García-Hidalgo, J.F., Gil, J. and Segura, M. 2004. Segunda fase de rifting: Jurásico Superior-Cretácico Inferior. In: Vera, J.A. (ed.), *Geología de España*. SGE-IGME, 503-510.
- Milankovitch, M.M. 1941. Canon of insolation and the iceage problem. *Koniglich Serbische Akademie Beograd Special Publication*, 132.
- Moiroud, M., Martinez, M., Deconinck, J.F., Monna, F., Pellenard, P., and Riquier, L. 2012. High-resolution clay mineralogy as a proxy for orbital tuning: Example of the Hauterivian-Barremian transition in the Betic Cordillera (SE Spain). *Sedimentary Geology*, 282, 336-346.
- Muñoz, A., Soria, A., Canudo, J.I., Casas, A.M., Gil, A. and Mata, M.P. 1997. Caracterización estratigráfica y sedimentológica del Albiense marino del borde Norte de la Sierra de Cameros. Implicaciones paleogeográficas. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 22, 139-163.
- Navarrete, R. 2015. *Controles alocíclicos de la sedimentación barremiense en la subcuenca de Galve (Formación Camarillas, margen occidental de la cuenca del Maestrazgo)*. PhD Thesis. Universidad de Zaragoza. 444 pp.
- Omodeo-Salé, S. 2014. *Modelización de la evolución sedimentaria y térmica de una cuenca extensional intraplaca (Cuenca de Cameros)*. Aplicación a la prospección de hidrocarburos. PhD Thesis, Universidad Complutense de Madrid, 507 pp.
- Omodeo-Salé, S., Suárez-Ruiz, I., Arribas, J., Mas, R., Martínez, L., and Herrero, M.J. 2016. Characterization of the source rocks of a paleo-petroleum system (Cameros Basin) based on organic matter petrology and geochemical analyses. *Marine and Petroleum Geology*, 71, 271-287.
- Omodeo-Salé, S., Salas, R., Guimerà, J., Ondrak, R., Mas, R., Arribas, J., Suárez-Ruiz, I., and Martínez, L. 2017. Subsidence and thermal history of an inverted Late Jurassic-Early Cretaceous extensional basin (Cameros, North-central Spain) affected by very low-to low-grade metamorphism. *Basin Research*, 29, 156-174.
- Omodeo-Salé, S. Ondrak, R., Arribas, J., Mas, R., Guimerà, J. and Martínez, L. 2019. Petroleum systems modelling in a fold-and-thrust belt setting: the inverted Cameros Basin, North-central Spain. *Journal of Petroleum Geology*, 42 (2), 145-171.
- Rat, J., Mouthereau, F., Bricchau, S., Crémades, A., Bernet, M., Balvay, M., Ganne, J., Lahfid, A. and Gautheron, C. 2019. Tectonothermal Evolution of the Cameros Basin: Implications for Tectonics of North Iberia. *Tectonics*, 38 (2), 440-469.
- Salas, R. and Casas, A. 1993. Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy and crustal evolution during the Alpine Cycle of the Eastern Iberian Basin. *Tectonophysics*, 228, 33-55.
- Salas, R., Guimerà, J., Mas, R., Martín-Closas, C., Meléndez, A. and Alonso, Á. 2001. Evolution of the Mesozoic Central Iberian Rift System and its Cainozoic inversion (Iberian Chain). *Peri-Tethys Memoir*, 6, 145-186.
- Salomon, J. 1982. *Les formations continentales du Jurassique supérieur-Crétacé inférieur: (Espagne du Nord, chaînes cantabrique et NW Ibérique)*. Institut des Sciences de la Terre. (Vol. 6), 227 pp.
- Schudack, U. and Schudack, M. 2009. Ostracod biostratigraphy in the Lower Cretaceous of the Iberian chain (Eastern Spain). *Journal of Iberian Geology*, 35 (2), 141-169.

- Schwarzacher, W. 2005. The stratification and cyclicity of the Dachstein Limestone in Lofer, Leogang and Steinernes Meer (Northern Calcareous Alps, Austria). *Sedimentary Geology*, 181, 93-106.
- Soria A.R., Muñoz, A., Liesa, C.L., Luzón, A., Meléndez, A. and Meléndez, M.N. 2012. Climate-driven cyclicity in an Early Cretaceous syn-rift lacustrine series (Aguilón sub-basin, NE Spain). *Terra Nova*, 24, 407-416.
- Strasser, A., Hilgen, F.J., and Heckel, P.H. 2006. Cyclostratigraphy—concepts, definitions, and applications. *Newsletters on Stratigraphy*, 42 (2), 75-114.
- Suárez-González, P. 2015. *Sedimentología y paleogeografía de los sistemas de humedales costeros de la Fm Leza (Cretácico inferior, Cuenca de Cameros). Implicaciones en el origen y desarrollo de los depósitos microbianos asociados*. PhD Thesis, Universidad Complutense de Madrid, 412 pp.
- Suárez-González, P., Emma Quijada, I., Mas, J.R. and Benito, M.I. 2010. Nuevas aportaciones sobre la influencia marina y la edad de los carbonatos de la Fm Leza en el sector de Préjano (SE de La Rioja). Cretácico inferior, Cuenca de Cameros. *Geogaceta*, 49, 7-10.
- Thomson, D.J. 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis, *Proc. IEEE*, 70, 1055-1096.
- Tischer, G. 1966. El delta wealdico de las montañas ibéricas occidentales y sus enlaces tectónicos. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 81, 53-78.
- Torrence, C. and Compo, G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61-78.
- Weedon, G.P. 2003. *Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy*. Cambridge University Press, Cambridge, 259 pp.

Recibido: julio 2019

Revisado: noviembre 2019

Aceptado: enero 2020

Publicado: marzo 2021