

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

GRADO EN GEOLOGÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

CARACTERIZACIÓN SEDIMENTARIA Y CICLOESTRATIGRÁFICA DE LOS MATERIALES OLIGO-MIOCENOS DEL LIG DE ALCOLEA DE CINCA

Álvaro Nieves Calvo

Trabajo dirigido por María Aránzazu Luzón Aguado



ÍNDICE.

1. Abstract.....	2
2. Planteamiento y objetivos.....	3
3. Antecedentes relevantes.....	3
4. Metodología.....	3
5. Contexto geográfico y geológico.....	4
6. Presentación de los principales resultados obtenidos.....	6
6.1 Columna de Alcolea de Cinca Sur.....	6
6.2 Descripción e interpretación de facies y secuencias.....	10
6.2.1 Litofacies sedimentarias.....	10
6.2.2 Secuencias de facies sedimentarias.....	13
6.3 Análisis cicloestratigráfico.....	14
6.3.1 Identificación de los ciclos de Milankovitch mediante análisis espectral.....	15
7. Discusión.....	20
8. Conclusiones.....	21
9. Bibliografía.....	22
10. Anexos.....	24
Anexo 1: Perfil en detalle de Alcolea de Cinca Sur	24
Anexo 2: Tablas de datos.....	32
Anexo 3: Fotos extra de litofacies, afloramientos y otros.....	32

1. Abstract

This project entails the stratigraphical study of mainly Miocene sedimentary materials, which deposited in the municipalities of Alcolea de Cinca and Ontiñena. These materials constitute the sedimentary record of a large alluvial fan which spread from the growing areas of the Pyrenees, south all the way into the centre of the Ebro basin, and their transition into lacustrine environments. Several progradation-retrogradation cycles have been recognised that may be related to tectonic and climate influence. The main objective of this work is to correlate the varying stratigraphic successions to climate change by identifying the effect of Milankovitch cycles, these being eccentricity (long and short), obliquity and precession. Creating a stratigraphical chart of the outcrops has permitted to identify sedimentary sequences with the computer program Past (v4.03), which applies statistical data directly obtained from the stratigraphical chart, such as the magnetic susceptibility, the lithology and the colour time series, and uses various mathematical processes, providing graphs and data tables which have given key data such as the frequency of the potential cycles. By then using the paleomagnetic series created by Perez-Rivarés et al. (2018), we have estimated an age of 900,000 years for the materials of this work, making it possible to give ages to the stratigraphical sequences identified by Past, that have been equated to the actual sequences. There appears to be a direct correlation between the sequences and the cycles, although these have been slightly altered by factors such as the inconsistency of the incoming sediments, or the major influence of tectonic uplift in the Pyrenean range, as the study's materials belong to the tectosedimentary unit T4, near the limit to T5.

2. Planteamiento y objetivos

El Lugar de Interés Geológico (LIG) de las ripas de Alcolea de Cinca (ARP0453), en el sector central de la Cuenca del Ebro, tiene un interés principal de índole geomorfológico y se corresponde con un talud vertical de unos 60 metros de altura generado por erosión fluvial del río Cinca, catalogado como depósitos, suelos edáficos y formas de modelado singulares representativos de la acción del clima (Ley 42/2007). En cambio, no hay estudios de detalle que caractericen e interpreten los materiales que los integran. Son materiales asociados a un sistema aluvial de edad miocena, particularmente al abanico fluvial de Huesca (Luzón y González, 2003). La alternancia de facies muestra unas características litológicas muy interesantes, desde el ámbito de la sedimentología y cicloestratigrafía, que puede proporcionar nuevos datos, buscando una relación entre la sedimentación y la influencia climática, y obtener mayor información sobre los afloramientos de este LIG. El objetivo principal del trabajo es caracterizar sedimentológicamente estos materiales, realizar un análisis cicloestratigráfico y determinar si existe un reflejo de los ciclos de Milankovitch en la sucesión sedimentaria. Otros objetivos son los siguientes:

- Caracterización paleoambiental de los materiales.
- Datación de los sedimentos estudiados.
- El uso de diferentes técnicas para adquirir los resultados.
- Emplear los conocimientos adquiridos a lo largo del grado.

3. Antecedentes relevantes

Los trabajos de la zona son principalmente estratigráficos, y en menor medida paleontológicos. El primer estudio exhaustivo moderno realizado en este sector de la Cuenca del Ebro es de Quirantes Puertas (1978). Otros trabajos destacados incluyen el mapa de Hernández (1990) y la memoria asociada de la cartografía del IGME a escala 1:50000, correspondiente a la hoja nº 357 (Sariñena), en particular el apartado estratigráfico, elaborado por Hernández y del Olmo (1998), la tesis doctoral de Luzón (2001), centrada en el análisis tectosedimentario de los materiales cenozoicos o la síntesis estratigráfica de Luzón y González (2003). Además hay diversos estudios asociados parcialmente a la zona de estudio y al contexto general del área, algunos de los cuales se han empleado para la elaboración de este trabajo, como los paleontológicos de Cuenca et al. (1992), y la serie magnetoestratigráfica de Rivarés et al. (2018), entre otros.

4. Metodología

Este TFG se ha realizado mediante la combinación de trabajo de campo, gabinete y laboratorio.

Trabajo de Campo: Se realizaron 4 jornadas con el principal objetivo de realizar una columna estratigráfica de detalle y tomar datos para el análisis sedimentológico y cicloestratigráfico. 3 jornadas en otoño de 2023 y una en primavera de 202, la primera y última con A. Luzón, y otras 2 con mi padre, F. Nieves. En la tercera y cuarta jornadas se tomaron muestras y datos de susceptibilidad magnética (SM) utilizando un susceptómetro KT-10 v2 Terraplus de WG, y se repasaron los afloramientos de la zona. Para elaborar la columna se utilizó metro, martillo de geólogo Estwing, bolsas para toma de muestras, GPS para mantener la cota cuando fuese necesario, hojas adaptadas, lápiz y goma. Por la inaccesibilidad de las ripas, la columna se levantó en un barranco localizado al sur.

Gabinete: Se ha elaborado una columna estratigráfica de detalle a escala 1:20 (Anexo 1) y otra sintética a escala 1:200 para identificar secuencias de forma más sencilla; se han dibujado con los programas Paint 3D y Adobe Illustrator. Uno de los objetivos de este trabajo es reconocer ciclos

periódicos en la serie estudiada, que puedan corresponderse con los ciclos de Milankovitch. Para ello se han construido 3 series de tiempo, que se corresponden con la susceptibilidad magnética (en unidades del SI), cuyos valores se han medido cada 20 cm, y la litología y el color, cada 10 cm. Los primeros son de medición absoluta. Para la litología y el color, se han realizado sendas series de tiempo asignando un valor numérico a las distintas litologías y colores, como se explica en la sección de resultados. Los datos, presentes en el anexo 2, se han analizado con el programa PAST, versión 4.03, utilizando distintas herramientas estadísticas: el periodograma simple, el análisis wavelet y el análisis Redfit. Cabe destacar en este último dos parámetros. El primero llamado “oversample” o sobremuestreo, que realiza una división del intervalo de tiempo entre datos para generar una mayor resolución en el espectro de frecuencias. Cuanto más grande es su valor, mayor resolución tiene la gráfica, pero en consecuencia aumenta la posibilidad de que aparezca ruido. El segundo parámetro, llamado “segments” o segmentos, representa la cantidad de subdivisiones que se hacen a la serie temporal para calcular espectros individuales, y después realizar un promedio para cada segmento. Se ha correlacionado el perfil realizado con el perfil de Ontiñena (Luzón, 2001) y su datación se ha realizado utilizando la serie magnetoestratigráfica de Pérez-Rivarés et al. (2018) en las proximidades de esa localidad, lo que sitúa el techo de la serie en el cron C6Cn (Ageniense), en el Mioceno inferior.

Laboratorio: Se han hecho dos levigados. El material resultante se ha analizado con una lupa binocular de marca Olympus.

Finalmente, se ha procedido a la redacción del informe.

5. Marco geográfico y geológico

El área de estudio se ubica en el sector central de la Cuenca del Ebro, en la zona sureste de la provincia de Huesca (Fig. 1.), en la margen izquierda del río Alcanadre y en la derecha del río Cinca, cerca de la convergencia de ambos ríos. Se ubica en la hoja 357 del mapa geológico nacional a escala 1:50000 (Sariñena). Está en el término municipal de Alcolea de Cinca, en la comarca del Cinca Medio, a unos 80 km al este de Zaragoza, 65 km al sureste de Huesca y 30 km al oeste de Fraga. La altitud en la zona oscila desde los 185 a 245 metros de altura. El acceso desde Zaragoza se realiza por la AP-2, tomando el desvío de la A-131 a la altura de Fraga y avanzando unos 30 km al noroeste. Tras ello se toma la A-130 a la altura de Ontiñena. El clima es mediterráneo continentalizado semidesértico y con caracteres esteparios. La cuya vegetación es predominantemente espartos, tomillos, ontinas y aliagas, además de algunos árboles como almendros y olivos¹.

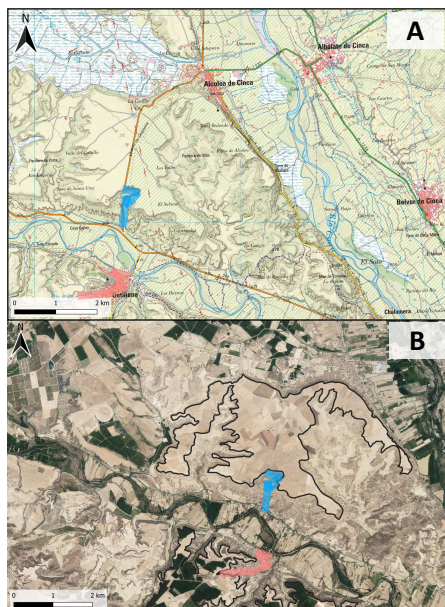
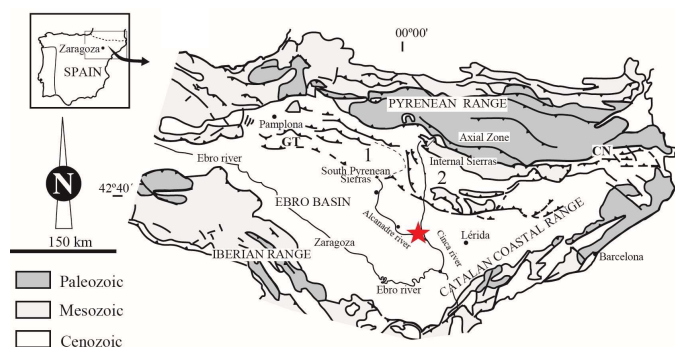


Figura 1: A: Mapa de la localización de la zona de estudio, (IGN Iberpix e IGN descargas).² El perfil de Ontiñena Luzón (2001) está representado en rojo, el perfil del trabajo, en azul. B: La imagen satélite indica el nivel fotogeográfico 90 en negro.

Figura 2. Localización geológica de la zona de estudio, que se indica con una estrella, modificado de Luzón (2005).



La Cuenca del Ebro es la cuenca cenozoica más grande del noreste de la Península Ibérica (Pardo et al., 2004). Está limitada por los Pirineos al norte, la Cordillera Ibérica al sur, y la Cordillera Costero-catalana al este (Fig. 2). Su evolución geodinámica está relacionada con la orogenia Alpina, más directamente con la formación de los Pirineos, cuya actividad se extiende desde el Cretácico final hasta el Mioceno, y es resultado de la convergencia entre la placa euroasiática y la placa africana. La estructura de la cuenca terminó de establecerse en el Mioceno cuando se emplazan los últimos cabalgamientos surpirenaicos. Es, por tanto, la última cuenca de antepaís de los Pirineos.

Del Paleoceno superior al Eoceno medio (Luteciense) la cuenca tuvo conexión con el mar, pero desde Priabonense la cuenca cambia de exorreica, con influencia marina, a endorreica en el Oligoceno inferior (Fig. 4). El relleno de la cuenca se divide en 8 unidades tectosedimentarias (Fig. 3) limitadas en los márgenes por discordancias angulares y progresivas. (Muñoz et al., 2002; Pardo et al., 2004) que demuestran que la sedimentación estuvo controlada por la actividad tectónica y la generación de relieve en los márgenes de la cuenca.

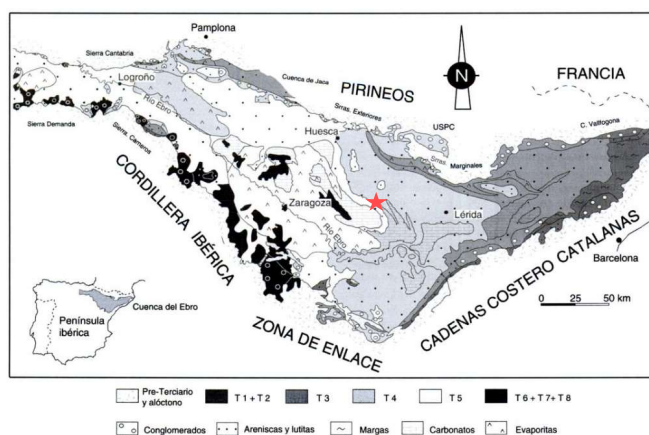


Figura 3. UTS en la C del Ebro; la zona de estudio se indica con una estrella, modificado de Pardo et al. (2004).

En el estadio endorreico se desarrollan abanicos aluviales en los márgenes activos, con depósito de materiales terrígenos, y un sistema lacustre hacia el centro de la cuenca donde se depositaron calizas y evaporitas. Durante el depósito de la UTS T4 (Oligoceno superior a Mioceno Inferior), a la que pertenecen los materiales objeto de estudio (Luzón, 2005), existió en la parte central de la cuenca (Figs. 4 y 5) un sistema aluvial de grandes dimensiones (sistema fluvial de Huesca). Hacia el centro de la cuenca se depositan carbonatos lacustres y evaporitas. Durante el depósito de la parte superior de T4 (esencialmente Mioceno inferior) los márgenes se reactivan y los abanicos aluviales progradan.

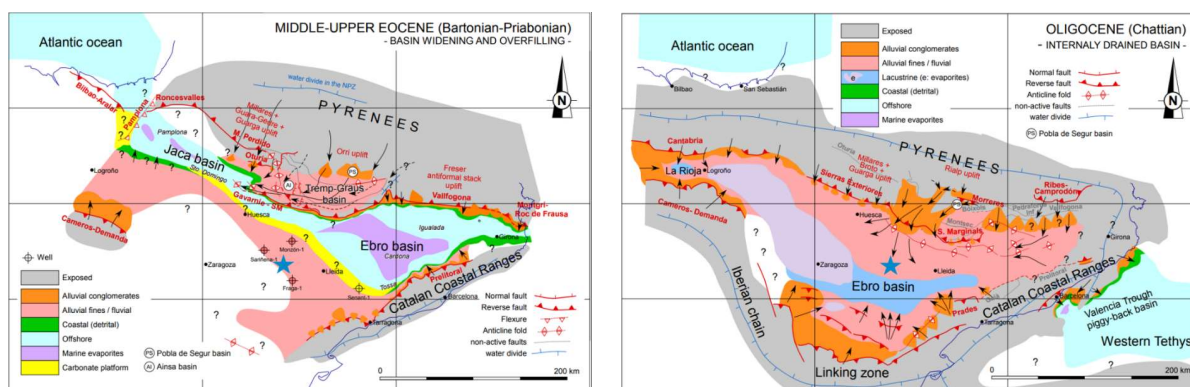


Figura 4. Esquema paleogeográfico de la Cuenca del Ebro durante el Eoceno medio-superior y el Oligoceno, con la zona de estudio resaltada con una estrella, modificado de Garcés et al. 2020.



Figura 5. Paleogeografía del sector central norte de la cuenca del Ebro en el Mioceno Inferior. Modificada de Luzón y González (2003).

Desde el punto de vista litoestratigráfico, los materiales de la zona de estudio pertenecen a la Fm. Sariñena en tránsito a la Fm. Mequinenza (Quirantes, 1979), siendo la 1ª aluvial y la 2ª lacustre carbonatada. En las memorias asociadas al mapa 1:50000 de la serie Magna (hoja 357), estos materiales se incluyen en las

unidades Torrente de Cinca-Alcolea de Cinca, y la Galocha-Ontiñena (Hernández Samaniego y del Olmo, 1998).

En relación con la edad de los materiales de la zona de estudio yacimientos paleontológicos cercanos, como el de Fraga, Ballobar, Clara y Ontiñena, del Mioceno inferior (Cuenca et al., 1992) y datos paleomagnéticos en zonas circundantes (Ontiñena), indican que son rocas esencialmente del Aquitaniense (Pérez Rivarés et al., 2018).

6. Presentación de los principales resultados

6.1. Descripción de columna sintética de Alcolea Sur

En este apartado se realiza una descripción de la columna de Alcolea Sur (Fig. 6). Se indican los tramos que se corresponden con el perfil de Ontiñena de Luzón (2001) utilizado para la correlación con la serie magnetoestratigráfica y se asigna cada tramo a una litofacies de las definidas por esta autora. La base del perfil se encuentra inmediatamente al norte de la acequia de Chalamera, en el lado oeste de la carretera A-130, accediendo desde Fraga (Fig. 1).

- Coordenadas UTM de la base: 31 T 257749 E 4619382 N.
- Coordenadas UTM del techo: 31 T 257908 E 4620323 N.

Tramo 1: 5,61 m. Alternancia de lutitas rojas, negras y versicolores y calizas grises con intercalaciones de margas grises.

Las lutitas, que se encuentran laminadas, se disponen en estratos tabulares de 8 a 96 cm de espesor. En los niveles oscuros se han encontrado fragmentos de osteodermos de cocodrilos, fragmentos de gasterópodos, fragmentos de bivalvos y oogonios de carofitas.

Las calizas son de textura mudstone y se disponen en estratos tabulares que varían de 1 a 15 cm de espesor. La mayoría de los niveles son masivos, algunos presentando bioturbación y restos fósiles de gasterópodos. Se pueden observar algunos *mud mounds*.

Las margas son laminadas y se disponen en estratos tabulares de 2 a 12 cm de espesor.

Este tramo corresponde al nivel 80 fotogeológico de Luzón (2001).

Tramo 2: 2,36 m. Areniscas grises con intercalaciones de lutitas marrones.

Las areniscas, de grano medio a fino, se disponen en estratos cuyo espesor varía de 1 a 65 cm. Los estratos más potentes presentan morfología canaliforme, con cicatrices internas también canalizadas.

Contienen estratificación cruzada, en surco y laminación convolucionada. Los estratos de menor potencia son tabulares y masivos.

Las lutitas están laminadas y se presentan en estratos tabulares de una potencia de 1 a 12 cm, y ciertos niveles presentan bioturbación.

Tramo 3: 0,53 m. Alternancia de calizas y margas grises.

Las calizas son de textura mudstone, se disponen en estratos tabulares de 3 a 12 cm, siendo generalmente masivas y en algún caso laminadas, y en ocasiones presentan bioturbación.

Las margas son laminadas y se presentan en estratos tabulares de 0,5 a 5 cm.

Tramo 4: 4,6 metros de lutitas rojas, marrones, grises, negras y versicolores y un nivel de arenisca marrón intercalado.

Las lutitas presentan laminación paralela y se disponen en estratos tabulares de 2 a 100 cm de espesor. Presentan bioturbación en el caso de las lutitas versicolores.

El nivel de arenisca, de grano medio a fino, se corresponde con un estrato tabular de 15 cm de espesor, con estratificación cruzada planar.

Tramo 5: 8,46 m. Alternancia de lutitas marrones, grises, rojas y versicolores, y areniscas marrones y grises con algunos niveles intercalados de margas grises.

Las lutitas están laminadas, se disponen en estratos tabulares de 3 a 100 cm de espesor, las versicolores están bioturbadas.

Las areniscas son de grano medio a fino, se presentan en estratos canaliformes o tabulares de 2 a 40 cm de espesor. Presentan laminación cruzada planar, laminación cruzada en surco y estratificación cruzada en bajo ángulo.

Las margas se encuentran en estratos tabulares de 1 a 45 cm, siendo masivas o con laminación paralela y/o bioturbación.

En este tramo se pueden reconocer numerosas secuencias granodecrecientes, de 1 a 2 metros de potencia. Se componen de areniscas en cuerpos canaliformes en base, seguidas de lutitas y en el caso de la más completa, margocalizas a techo.

Tramo 6: 1,74 m. Alternancia de margas grises y calizas grises.

Las margas son laminadas y se encuentran en estratos tabulares de 4 a 70 cm de espesor.

Las calizas son de textura mudstone y se disponen en estratos tabulares de 10 a 20 cm de espesor. Son masivas, o con laminación paralela.

Este tramo corresponde al nivel 81 fotogeológico de Luzón (2001).

Tramo 7: 1,6 m. Cubierto.

Tramo 8: 2,45 m. Alternancia de areniscas grises y lutitas versicolores.

Las areniscas son de tamaño de grano fino a grueso, y se disponen en estratos tabulares de 5 a 35 cm de espesor. Presentan laminación horizontal, estratificación cruzada planar y estratificación cruzada en surco. Los niveles más potentes tienen cicatrices internas y bases canaliformes.

Las lutitas están laminadas, se disponen en estratos tabulares de 5 a 30 cm de espesor y en ocasiones se encuentran bioturbadas.

Tramo 9: 12,87 m. Lutitas versicolores, marrones, grises y rojas con areniscas marrones y grises intercaladas y niveles poco frecuentes de margas grises.

Las lutitas están laminadas, se sitúan en estratos tabulares de 20 a 150 cm de espesor y las versicolores están bioturbadas.

Las areniscas son de tamaño de grano fino a grueso, y se disponen en estratos canaliformes o tabulares de 7 a 60 cm de espesor. Los estratos de menor potencia son tabulares. Presentan estratificación cruzada en surco.

En este tramo también se reconocen secuencias granodecrecientes, de 2 a 3,6 metros de potencia. Se componen de areniscas en cuerpos canaliformes en base, seguidas de lutitas y margas a techo en algunos casos.

Tramo 10: 1,9 m. Alternancia de areniscas versicolores y grises y lutitas versicolores.

Las areniscas son de tamaño de grano fino a grueso, y se presentan en estratos canaliformes y tabulares de 10 a 70 cm de espesor, siendo los canaliformes los más potentes. El estrato más potente presenta el mayor tamaño de grano, mientras que los de 30 cm tienen un tamaño medio, y el de 10 cm un tamaño fino. Presentan estratificación cruzada en surco.

Las lutitas se encuentran laminadas y se presentan en estratos tabulares o ligeramente erosionadas por los canales de arenisca. Tienen unos 10 a 20 cm de espesor. Las versicolores están bioturbadas.

Tramo 11: 6,03 m. Lutitas versicolores con intercalaciones de areniscas versicolores.

Las lutitas, generalmente laminadas, se sitúan en estratos tabulares de 1 a 200 cm de espesor. Están en ocasiones bioturbadas.

Las areniscas son de grano muy fino a medio, se disponen en estratos tabulares de 5 a 30 cm de espesor, muestran bioturbación.

Tramo 12: 1,1 m. Areniscas versicolores.

Las areniscas son de grano muy grueso en la base, con algunos cantos dispersos de 0,5 a 1 cm de diámetro en la base, hacia techo se reduce el tamaño de grano a medio. Se disponen en un estrato canaliforme de 110 cm de espesor y tienen estratificación cruzada en surco.

Tramo 13: 6,45 m. Alternancia de lutitas versicolores y areniscas versicolores.

Las lutitas son laminadas, y se disponen en estratos tabulares de 10 a 200 cm. Se encuentran bioturbadas en todo el tramo.

Las areniscas son de grano fino, y se disponen en estratos canaliformes, con transición lateral a tabular de espesor de 10 a 120 cm. Muestran estratificación cruzada en surco.

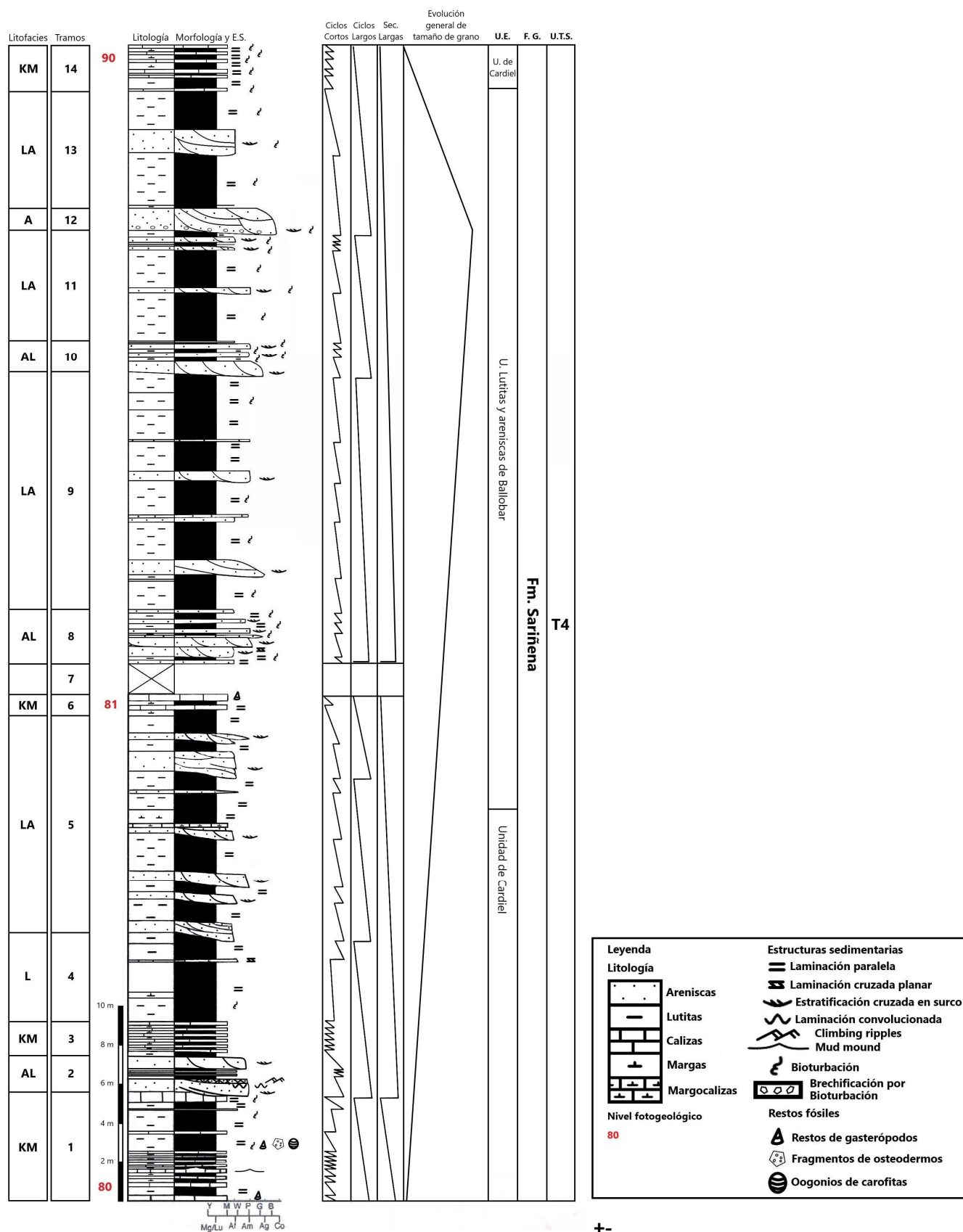
Tramo 14: 2,5 metros de calizas grises, con intercalaciones de margas grises y lutitas versicolores y rojas.

Las calizas son de textura mudstone y se sitúan en estratos tabulares y más raros ondulados, de 3 a 20 cm de espesor, son laminadas, masivas y bioturbadas.

Las margas son laminadas, y se disponen en estratos tabulares de 1 a 50 cm de espesor.

Las lutitas aparecen en estratos tabulares de 3 a 60 cm de espesor, con laminación paralela y bioturbación en los estratos versicolores.

Este tramo corresponde al nivel 90 fotogeológico de Luzón (2001).



Figuras 6. Leyenda y columna estratigráfica sintética del perfil de Alcolea Sur, se muestran las litofacies, los tramos, la columna con su litología, textura, estructuras sedimentarias y niveles fotogeológicos. Luego los ciclos sedimentarios cortos, los ciclos de excentricidad corta, los ciclos largos, las secuencias largas y la evolución general del tamaño de grano. Finalmente, se indica la unidad estratigráfica, la formación geológica, y la UTS asociada.

6.2. Descripción e interpretación de facies y secuencias.

Una vez realizada la columna estratigráfica, se ha realizado la caracterización de las facies sedimentarias. La nomenclatura empleada en las facies detríticas es la utilizada por Miall (1978; 2006), y en las facies carbonatadas es una propuesta que se realiza siguiendo los mismos criterios del autor, es decir, utilizando una letra mayúscula para establecer la litología y una minúscula que representa las estructuras sedimentarias. El modelo sedimentario del ambiente para este sector se muestra en la figura 7. Las imágenes de las facies se muestran en la figura 8 y en el Anexo 3.

6.2.1. Litofacies sedimentarias

Facies de areniscas. Se han identificado cinco tipos de facies arenosas en función de las estructuras sedimentarias presentes: Sm, Sh, Sp, St y Sr.

Sm: Areniscas masivas grises. Se disponen en estratos tabulares que varían entre 4 y 35 cm de espesor. No presentan estructuras sedimentarias o no se distinguen en el campo. Se interpretan como resultado del depósito rápido de material arenoso transportado por un flujo con alta concentración de sedimento, o en relación con la bioturbación del sedimento tras su depósito.

Sh: Areniscas grises y marrones con laminación horizontal. Se disponen en estratos tabulares de entre 2 y 10 cm de espesor con bioturbación ocasional. La laminación horizontal puede asociarse a cambios en la energía del medio o a la sedimentación en un ambiente de flujo crítico.

Sp: Areniscas versicolores, marrones y grises con estratificación cruzada planar. Se disponen en estratos tabulares y canalizados entre 5 y 40 cm de espesor. La estratificación cruzada planar, en ocasiones de bajo ángulo, se puede interpretar como la migración de dunas subacuosas bidimensionales en flujos canalizados tractivos.

St: Areniscas versicolores, marrones y grises con estratificación cruzada en surco. Dispuestas en estratos canaliformes de potencia variable, pero elevada, y estratos tabulares de menor potencia, pueden alcanzar entre 10 y 120 cm de espesor, como se observa en la figura 6. En ocasiones también presentan laminación convolucionada, como se ve en la figura 8K. Representan la migración de dunas tridimensionales de crestas sinuosas y el relleno de canales.

Sr: Areniscas marrones con ripples (a veces climbing) o laminación cruzada (Fig. 8J). Aparecen en estratos canaliformes o tabulares. Como se muestra en la figura 8F, se pueden asociar a laminación convolucionada. Representan migración de ripples acuáticos en condiciones de bajo régimen de flujo.

Facies de lutitas. Se han identificado 2 tipos de facies lutíticas: Fl, y Fr.

Fl: Lutitas rojas, marrones, grises y negras laminadas. Se disponen en estratos de 1 a 150 cm de espesor (Fig. 8E). Mediante un levigado de un nivel de lutitas negras, se observan fragmentos de concha de bivalvos, fragmentos de osteodermo de cocodrilo y oogonios de algas caráceas (Fig. 8C, D y G).

Representan la decantación de material fino en zonas encharcadas situadas entre canales o aguas abajo de los mismos. Los cambios en el color están relacionados con cambios en la oxidación, que a su vez son indicativos de la exposición subaérea o emersión del sedimento, siendo los grises los que

representan menor tiempo sometidos a condiciones subaéreas y los rojos los que han estado más tiempo expuestos. Es en los niveles grises o negros donde se han encontrado restos fósiles.

Fr: Lutitas versicolores bioturbadas (Fig. 8L), se disponen en estratos de 5 a 200 cm de espesor. Representan depósitos de decantación sobre los que se instaló vegetación, conformando suelos hidromorfos, afectados por la bioturbación y con largos periodos de saturación en agua.

Facies de calizas. Se han identificado tres tipos de facies calcáreas: Kl, Km y Kb.

Kl: Calizas laminadas grises (Fig. 8I). De textura mudstone, forman estratos tabulares de 3 a 20 cm de potencia. Representan la precipitación de carbonato bajo lámina de agua somera, posiblemente por bioinducción. La laminación indica variación en las condiciones fisicoquímicas del agua de la zona y su preservación que no sufrieron remoción por bioturbación u otros factores.

Km: Calizas masivas y grises. Presentan textura mudstone y aparecen en estratos tabulares de 1 a 10 cm, la laminación original no se ha conservado o no se formó. Se generaron por la precipitación de carbonato bajo lámina de agua somera. No se observa bioturbación aparente. En ocasiones presentan restos fósiles, como gasterópodos (Figura 8B) o bivalvos.

Kb: Calizas masivas, grises y bioturbadas. De textura mudstone, se disponen en estratos tabulares de 2 a 15 cm de espesor. La bioturbación se relaciona con la excavación por raíces, y ocasionalmente da lugar a estratos con aspecto brechificado (Fig. 8A). Representa una modificación importante del sedimento carbonatado original por el enraizamiento de las plantas, indicando condiciones someras o expuestas. En ocasiones, pueden formarse *mud mounds* por acumulación de material carbonatado en torno a las raíces de plantas, como se observa en la figura 8H.

Facies de margas. Se ha identificado una facies: Ml.

Ml: Margas grises laminadas. Se disponen en estratos tabulares de 1 a 50 cm de espesor. Representan la decantación de material terrígeno junto con la precipitación de carbonato en condiciones subacuáticas, su laminación indica las condiciones fisicoquímicas variables y la ausencia de bioturbación. En la figura 8M se muestra un nivel de margas en la zona.

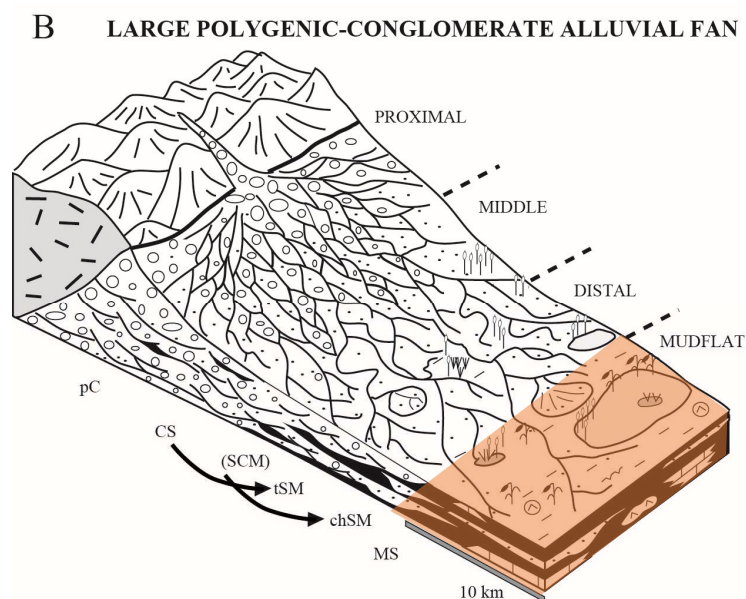


Figura 7. Modelo sedimentario de un abanico aluvial y la zona de este en el que se ubica el área de estudio, siendo esta la transición entre el ambiente distal y el ambiente de "mudflat". En algunos momentos la zona fue ocupada por un área lacustre somera ubicado en el sur. (Luzón, 2005).

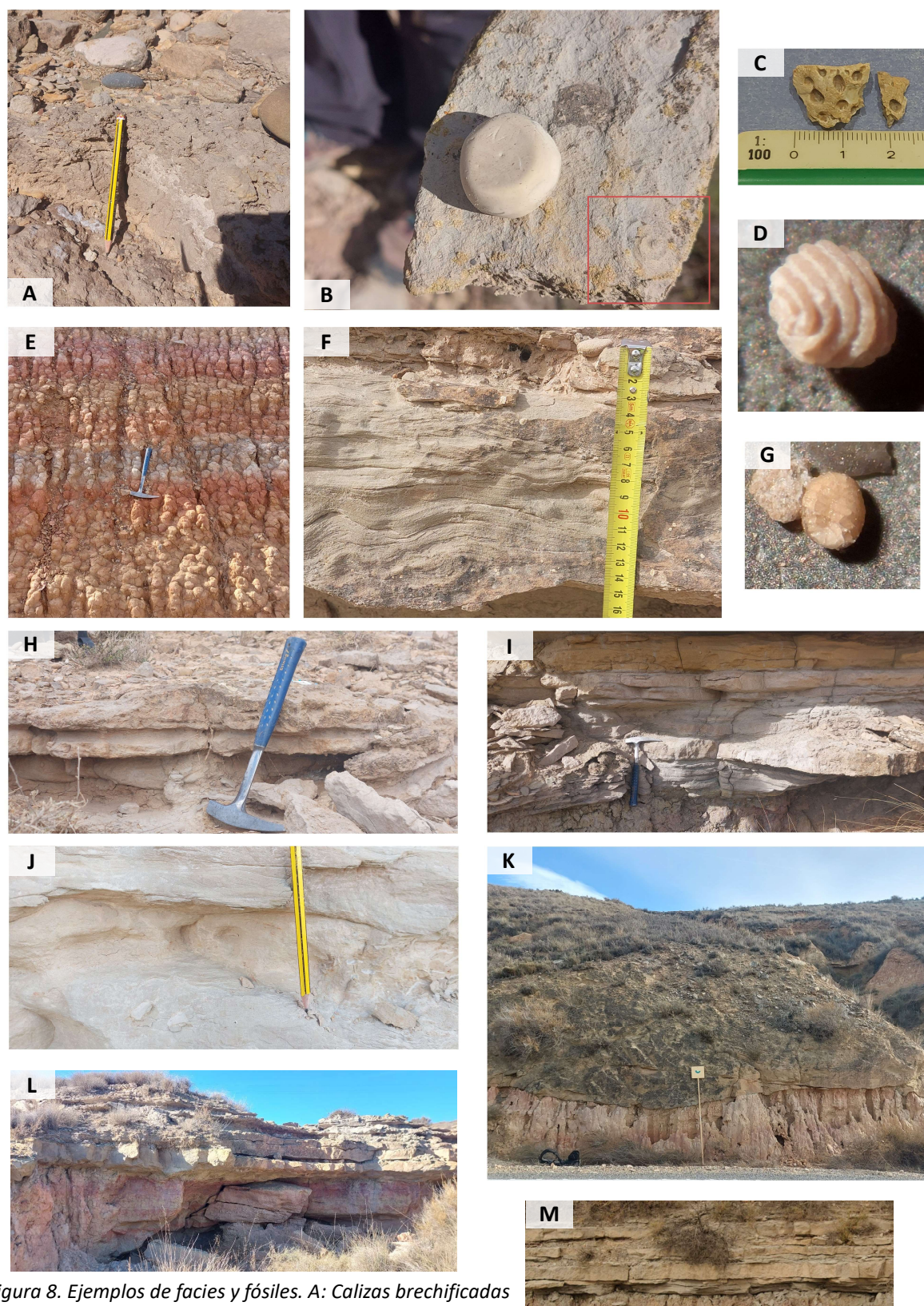


Figura 8. Ejemplos de facies y fósiles. A: Calizas brechificadas por bioturbación. B: Restos de gasterópodos. C: Fragmento de osteodermo de cocodrilo. D: Oogonio de carofita (8x aumentos). E: Sucesión de lutitas. F: Laminación convolucionada y "climbing ripples". G: Oogonio de carofita (4x aumentos). H: "Mud mound" en calizas. I: Secuencia de somerización. J: Areniscas con laminación cruzada. K: Areniscas canaliformes y sigmoidales. L: Sucesión de lutitas versicolores seguidas de margas y calizas. M: Secuencia de margas y calizas.

6.2.2. Secuencias de facies sedimentarias

A partir de la sucesión vertical de facies se identifican 3 tipos de secuencias principales en el perfil del estudio (Fig. 9), denominadas A1, A2 y L, siendo las dos primeras aluviales y L lacustre.

L está integrada por margas laminadas (ml), progresando a calizas laminadas (kl), después calizas masivas (km), y finalmente calizas bioturbadas (kb). Representa una secuencia de somerización lacustre con una llegada inicial de materiales terrígenos y precipitación de carbonatos posterior. La sucesión de Km a Kb, particularmente la bioturbación, demuestra que es una zona lacustre somera.

Las secuencias A1 y A2 involucran materiales detríticos. A1 una sucesión de facies de areniscas en cuerpos canaliformes con estratificación cruzada en surco (St), seguida de areniscas con laminación convolucionada y *climbing ripples* hacia techo (Sr); sobre ellas se depositan lutitas laminadas y bioturbadas. Representan la migración y abandono de canales, rectos o sinuosos y sus rellenos. La secuencia A2 incluye las facies de areniscas, y lutitas masivas y bioturbadas (Fl y Fr) de llanura de inundación. En ocasiones se da el caso ideal y se puede observar la secuencia completa y más compleja. Las facies representan, primero, un canal que erosiona materiales infrayacentes, pudiendo conformar en ocasiones depósitos de point bar (Fig. 8K), con presencia puntual de laminación convolucionada y climbing ripples con la transición de lutitas de llanura de inundación a margas laminadas y finalmente a calizas de zonas lacustre somera. En cómputo general, esta zona representa el sector distal de un abanico aluvial de gran tamaño, sobre el que ocasionalmente se desarrolló una zona lacustre somera. Las secuencias A1, A2 Y L son de mayor orden identificadas según Einsele et al. (1992).

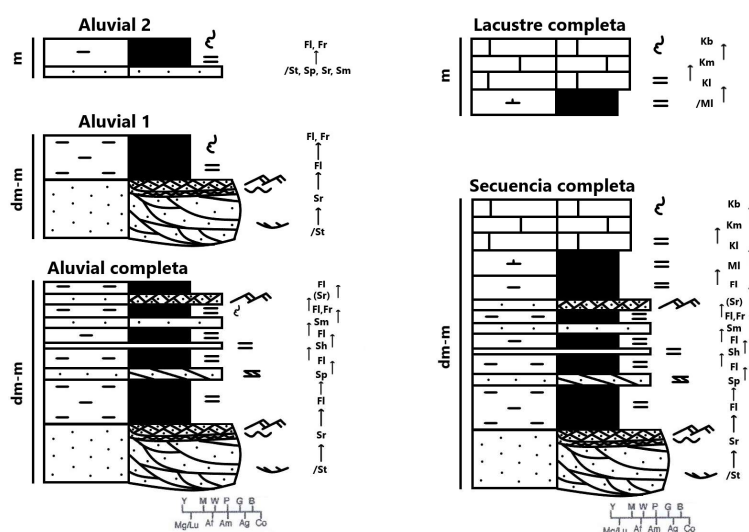


Figura 9. Secuencias de facies en el perfil de Alcolea Sur, la leyenda es la misma que la figura 6.

En la columna de la figura 6 se han marcado las secuencias de diferente orden identificables, así como dos de menor orden de escala decamétrica, que representan el paso del medio aluvial al lacustre. La evolución general es progradante-retrogradante.

Las secuencias de mayor escala, particularmente las secuencias completas aluvial-lacustre y las secuencias aluviales completas de mayor potencia podrían estar controladas por los ciclos de Milankovitch de mayor rango temporal, sean estos la excentricidad larga o corta. En el caso de las secuencias de menor espesor podrían estar relacionadas con los ciclos más cortos, de precesión y/u oblicuidad. En el siguiente apartado se incluye una breve introducción a la cicloestratigrafía como método y se desarrollan estas posibilidades.

6.3. Análisis cicloestratigráfico

Antes de mostrar y discutir los resultados, se realiza una breve introducción a la cicloestratigrafía y a los ciclos de Milankovitch, que son los que se registran con más facilidad en las series más antiguas. La cicloestratigrafía se centra en el reconocimiento, a partir del estudio de series estratigráficas, de procesos periódicos externos al sistema sedimentario. Los ciclos que buscamos se corresponden con una determinada frecuencia (con un periodo) y están registrados en la serie sedimentaria debido a la influencia de los parámetros orbitales en los procesos que controlan la sedimentación (Batenburg et al., 2012; Martín-Chivelet et al., 2015). Por ejemplo, se reconocen cambios cíclicos en las facies, en la litología, o bien en parámetros como la susceptibilidad magnética. Destacan los ciclos de Milankovitch, descritos por el autor del mismo nombre. Los elementos fundamentales considerados son la oblicuidad del eje de la Tierra, precesión y la excentricidad de la órbita terrestre (Fig. 10).

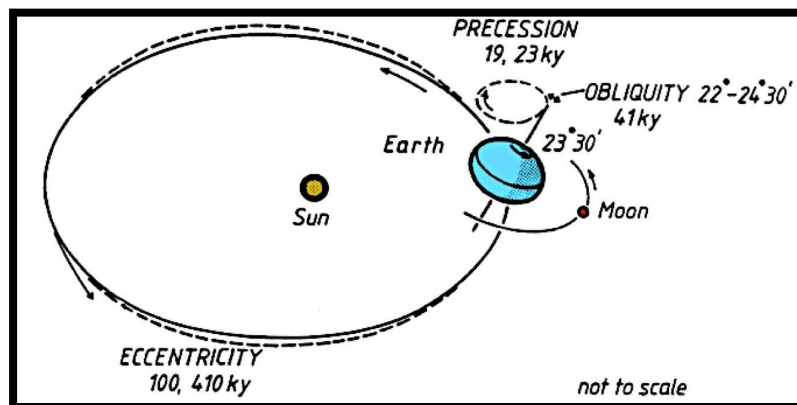


Figura 10. Visualización de los ciclos de Milankovitch, señalando la periodicidad de cada uno (Einsele y Ricken, 1991).

El ciclo de **excentricidad** se relaciona con el cambio en el radio de la elipse de la traslación de la Tierra alrededor del Sol. La excentricidad de la elipse varía entre 0,0005 y de 0,0607 (correspondiendo el valor 0 una circunferencia perfecta y el 1 una línea recta). La variación es muy compleja, con 6 ciclos diferentes, pero normalmente se asumen dos dominantes, con un periodo de 405.000 a 415.000 años (excentricidad larga), y otro de 100.000 años (excentricidad corta), que abarcaría los de 95, 124, 99 y 131 ka que resulta de la superposición de varias frecuencias (Martín-Chivelet et al., 2015).

La **oblicuidad** es el ángulo que existe entre el plano ecuatorial y la eclíptica, o entre el eje de giro y el perpendicular a la eclíptica (Batenburg et al., 2012; Martín-Chivelet et al., 2015). Varía entre 22,1 y 24,5°, con un periodo de recurrencia promedio de unos 41.000 años, pero existen otros menores superpuestos de 39.000, 54.000 y 29.000 años.

Por otro lado, el eje de rotación terrestre sufre un movimiento giratorio similar al “bamboleo” de una peonza, este se denomina **precesión axial** y el ciclo tiene un periodo de recurrencia de unos 26.000 años. También se da una precesión apsidal, que se refiere al lento movimiento de rotación de la órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol, con un ciclo de unos 112.000 años. Al combinar estos elementos obtenemos la precesión de los equinoccios, de un ciclo promedio de 21.000 años, con dos máximos principales en 24.000 y 19.000 años respectivamente.

Se ha demostrado mediante el estudio e interpretación de series sedimentarias que estos ciclos tienen efectos climáticos. En el caso de la excentricidad, su variación supone un cambio en la insolación entre el afelio y el perihelio, siendo menor la diferencia a menor excentricidad (Martín-Chivelet et al., 2015). El ciclo de oblicuidad provoca cambios en la insolación en latitudes elevadas, incrementando o reduciendo la estacionalidad, cuando aumenta o disminuye el ángulo de inclinación

del eje de giro terrestre respectivamente. Por ejemplo, cuando la oblicuidad es menor, la mayor insolación en verano en los polos favorece la deglaciación. El ciclo de precesión determina cambios en la insolación, por ejemplo, en la situación actual, el solsticio de verano en el hemisferio norte coincide con la situación de afelio, es decir, cuando el sol está más lejos de la Tierra, mientras que es al revés en el hemisferio sur. Esto significa que llega una radiación inferior a la del hemisferio sur; esta situación se repite cada 21.000 años, llegando a la opuesta en 10.500 años.

6.3.1. Identificación de los ciclos de Milankovitch mediante análisis espectral.

Para identificar los ciclos de Milankovitch en las series podemos realizar dos aproximaciones. La primera es de manera absoluta, cuando se conoce la edad de la serie, que permite hacer una aproximación a la edad de un metro de serie y de este modo calcular la duración de los ciclos correspondientes obtenidos del análisis. La segunda implica que no se conoce la edad absoluta y la identificación se basa en la comparación entre las periodicidades que se encuentran con las relaciones obtenidas del análisis estadístico. En la figura 11 se observa las relaciones temporales promedio entre los ciclos de Milankovitch.

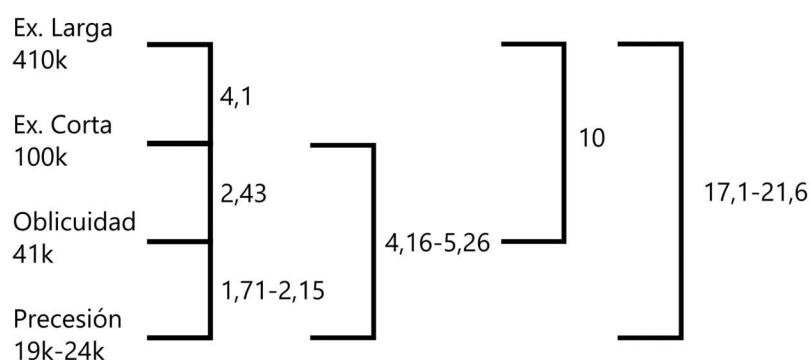


Figura 11. Relaciones numéricas entre los periodos de los ciclos de Milankovitch.

6.3.2. Identificación de los ciclos de Milankovitch a partir de la edad de la serie.

En relación con la primera aproximación se ha podido estimar la duración temporal de la serie estratigráfica analizada mediante la correlación con series estratigráficas cercanas, levantadas por otros autores.

Para ello se han utilizado los niveles fotogeológicos 80, 81 y 90 establecidos por Luzón (2001), correspondientes a niveles de calizas, para correlacionar el perfil Alcolea Sur, que aquí se estudia, con su perfil de Ontiñena y este con una serie magnetoestratigráfica realizada en las proximidades (Pérez Rivarés et al., 2018). Utilizando esta datación, podemos aproximar una edad para el perfil realizado en este trabajo, de unos 900.000 años. Como la columna presenta unos 62 metros, cada metro equivale aproximadamente a 14.500 años (Fig. 12). Así, el ciclo de excentricidad larga correspondería a unos 28 metros de media, el de excentricidad corta a unos 6,9 metros, el de oblicuidad a unos 2,8 metros, y el de precesión corta y larga a 1,3 y 1,6 metros respectivamente.

A lo largo del apartado, se resaltan en verde los ciclos más destacados. Se considera la edad obtenida para la serie para determinar la duración de cada ciclo.

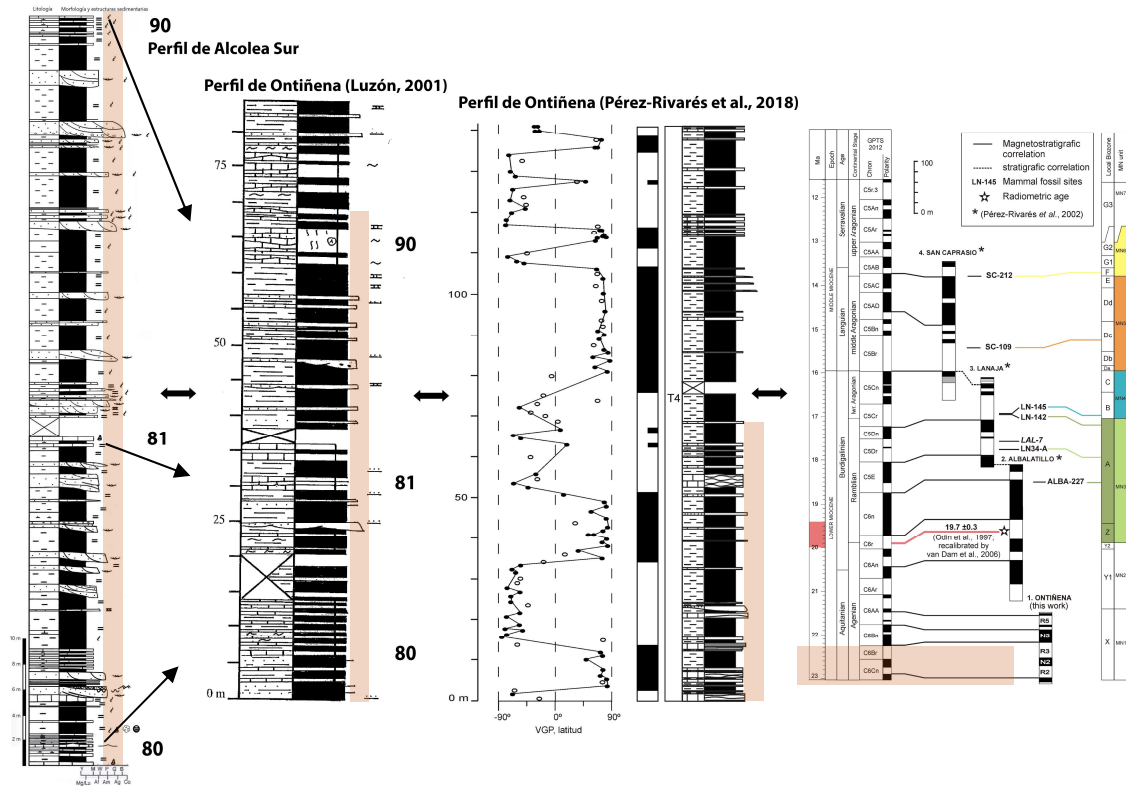
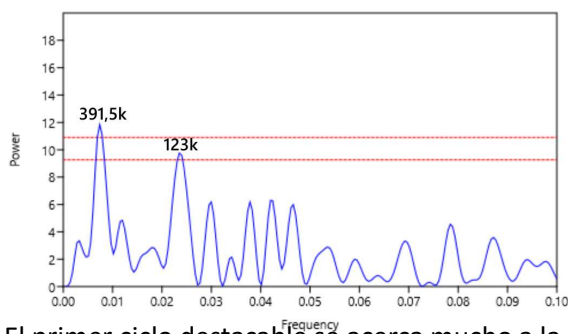


Figura 12: Correlación entre perfiles de Alcolea Sur, Ontiñena (Luzón, 2001) y Ontiñena (Pérez-Rivarés et al., 2018). Figuras no a la misma escala. Las bandas beige representan la parte correlacionable.

6.3.2.1. Análisis estadístico de la serie temporal creada con los valores de susceptibilidad magnética:

En el periodograma simple (Fig. 13), la línea roja inferior representa la banda de confianza de 95%, y la superior la de 99%. Destacan dos picos, la información obtenida queda desglosada en la tabla 1. Para obtener el espesor de los ciclos, se ha multiplicado el periodo por el espaciado de muestreo (en este caso 0,2 metros).



Frecuencia	Power	Periodo	Metros	Años
0,00738	11,841	135,5	27	391,5ka
0,023524	9,7659	42,509	8,5	123ka

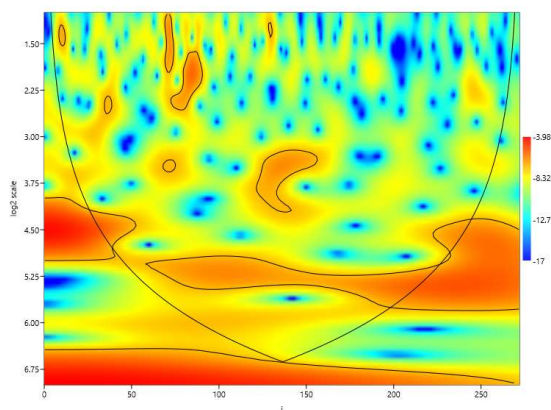
Tabla 1: Tabla del periodograma de la susceptibilidad magnética.

Figura 13: Periodograma de la susceptibilidad magnética.

El primer ciclo destacable se acerca mucho a la excentricidad larga y su rango de 405k a 415k.

El ciclo de 27 metros se asocia a los ciclos largos presentes en la figura 6, que pueden ser los de excentricidad larga y el segundo ciclo se asemeja a la excentricidad corta.

A partir de la función Wavelet, se origina la figura 14 y los valores asociados en la tabla 2.



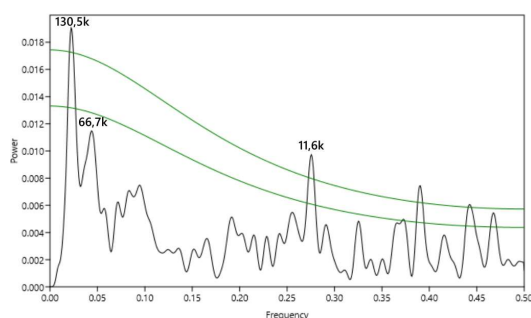
Log 2	Periodo	Metros	Años
6,75	107,63	21	304,5ka
5,3	39,4	7,88	114ka
4,5	22,627417	4,5254834	65,6k

Tabla 2: Tabla del modelo Wavelet de la susceptibilidad magnética

Figura 14: Gráfico del modelo Wavelet de la susceptibilidad magnética.

En este caso, el ciclo de 304,5ka años se acerca un poco al ciclo de excentricidad larga, aunque este pierde “fuerza” a medida que se asciende en la columna, además, no está en el cono de confianza. El ciclo de 114ka puede representar el ciclo de excentricidad corta, aunque estaría más marcado a partir del dato 50. El ciclo de 65,6ka no entra apenas en el cono de influencia, así que es poco fiable.

Finalmente, a partir del análisis Redfit, de resultados más precisos, se obtienen la figura 15 y los datos de la tabla 3. La línea superior representa el nivel de confianza del 99% y la inferior la del 95%.



Frecuencia	Power	Periodo	Metros	Años
0,022222	0,0191	45	9	130,5ka
0,04375	0,0115	23	4,6	66,7ka
0,27569	0,0097	4	0,8	11,6ka

Tabla 3: Tabla del modelo Redfit susceptibilidad magnética (“oversample” de 15 y “segments” de 5).

Figura 15: Gráfico del modelo Redfit de la susceptibilidad magnética.

En este caso, el primer pico también se puede comparar con la excentricidad corta, mientras que el segundo se asemeja al último ciclo del análisis Wavelet (con menos fiabilidad). El último ciclo, de 11600 años, aunque fiable, no se aproxima a ciclos de Milankovitch. El resto proporcionan edades demasiado pequeñas para vincularlo a dichos ciclos.

6.3.2.2. Análisis estadístico de la serie de tiempo construida a partir de la litología:

Para construir la serie de tiempo se ha asignado un valor numérico a cada litología basado en un modelo sedimentológico en el que se sitúan las litologías en zonas más aluviales o lacustres, como se observa en la figura 16, siendo el valor 1 la arenisca, el 2 las lutitas, el 3 las calizas y el 4 las margas.

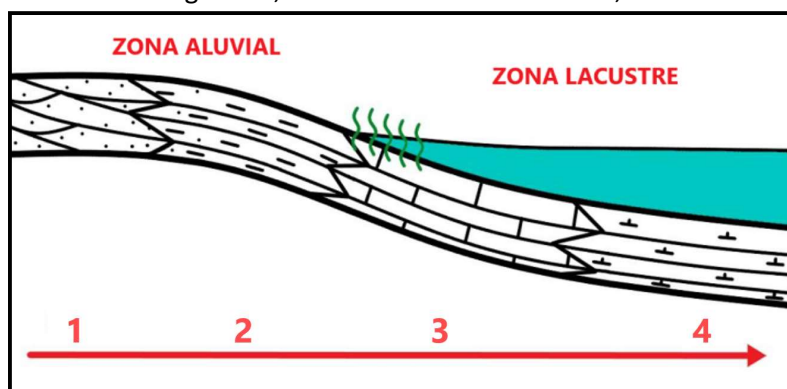


Figura 16: Modelo sedimentológico sencillo planteado para las litologías presentes en la columna de Alcolea Sur.

En la figura 17 se muestra el periodograma simple, con los resultados asociados en la tabla 4. En este caso la toma de datos es cada 10 centímetros.

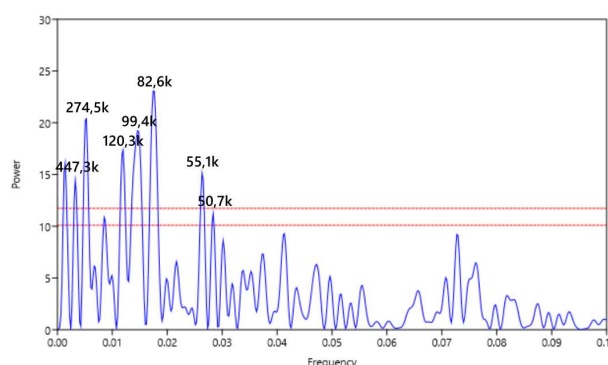


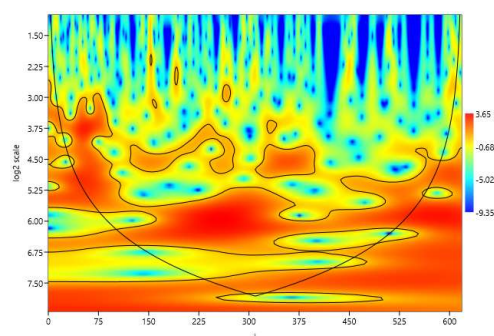
Figura 17: Periodograma simple asociado a la serie de tiempo basada en la litología.

Frecuencia	Power	Periodo	Metros	Años
0,0032415	14,448	308,49	30,8	447,3ka
0,0052674	20,378	189,8	18,9	274,5ka
0,011953	17,35	83,66	8,3	120,3ka
0,014587	19,242	68,55	6,86	99,4ka
0,017423	23,06	57,4	5,7	82,6ka
0,026337	15,12	37,97	3,8	55,1ka
0,028363	11,206	35,25	3,5	50,7ka

Tabla 4: Tabla del periodograma simple asociado a la serie de tiempo basada en la litología.

En este caso los ciclos más marcados se podrían asociar a la excentricidad corta y larga, con datos similares en el segundo caso, que reflejan un espectro poco limpio, lo mismo que sucede para los ciclos de en torno a 50.000 años. La oblicuidad podría asociarse a este último ciclo, pero quizá alterado por frecuentes cambios en la tasa de sedimentación.

Los resultados del análisis con el modelo wavelet se muestran en la figura 18 y en la tabla 5.



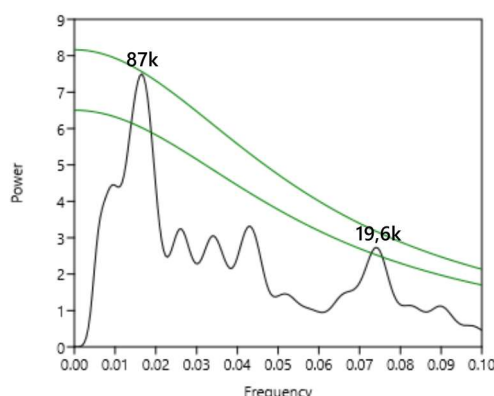
Log 2	Periodo	Metros	Años
7,5	81	18,1	265,5ka
6	64	6,4	92,8ka
4	16	1,6	23,2ka

Tabla 5: Tabla del modelo Wavelet asociada a la serie de tiempo de la litología.

Figura 18: Figura de la función Wavelet asociada a la serie de tiempo de la litología.

El primer ciclo, aunque se mantiene más o menos constante a lo largo de la columna, no se acerca a ningún ciclo de Milankovitch, aunque se identifica también en el caso anterior. El segundo, aunque no es constante a lo largo de la columna, sí que está dentro del cono de influencia y se aproxima al de excentricidad corta. Finalmente, el ciclo de 23.200 años podría representar la precesión.

Finalmente, el modelo Redfit, dando resultado la figura 19 y la tabla 6.



Frecuencia	Power	Periodo	Metros	Años
0,016545	7,4983	60,44	6	87ka
0,073966	2,7352	13,52	1,35	19,6ka

Tabla 6: Tabla del modelo Redfit asociada a la serie de tiempo basada en la litología ("oversample" de 15 y "segments" de 8).

Figura 19: Gráfico del modelo Redfit asociada a la serie de tiempo basada en la litología ("oversample" de 15 y "segments" de 8).

En este caso el primer ciclo se aproxima a la excentricidad corta y el otro a la precesión.

6.3.2.3. Análisis estadístico de la serie de tiempo construida a partir de colores de las facies

En este caso se han elegido colores y números en función de su grado de oxidación, de más a menos oxidado. 1 es el rojo, 2 el marrón, 3 el versicolor, 4 el gris y 5 el negro, que puede ser un reflejo de la proximidad a zonas lacustres. La toma de datos es cada 10 centímetros.

Comenzamos con el periodograma simple (Fig. 20) y sus resultados en la tabla 7.

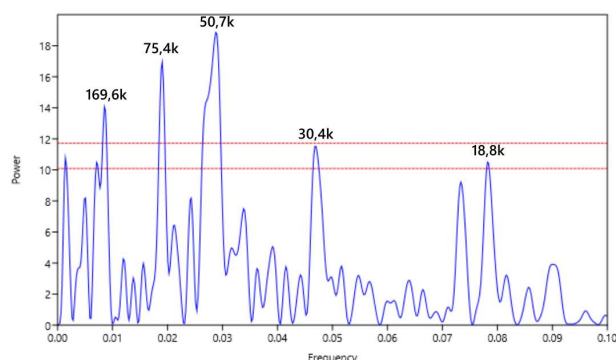


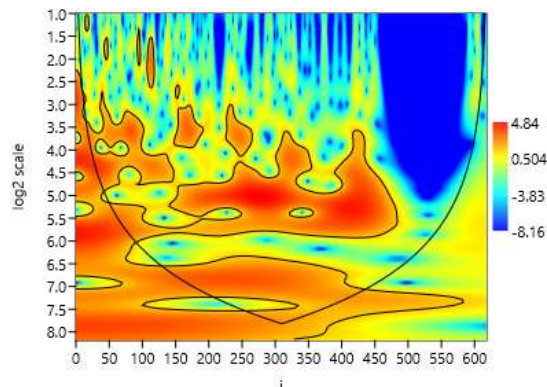
Figura 20: Periodograma simple correspondiente a la serie de tiempo basada en los colores.

Frecuencia	Power	Periodo	Metros	Años
0,0085089	14,066	117,52	11,7	169,6ka
0,019044	16,944	52,51	5,2	75,4ka
0,028768	18,858	34,76	3,5	50,7ka
0,046799	11,521	21,37	2,1	30,4ka
0,078201	10,5	12,79	1,3	18,8ka

Tabla 7: Tabla del periodograma correspondiente a la serie de tiempo basada en los colores.

En este caso, el segundo ciclo puede ser un ciclo muy distorsionado asociado al ciclo de excentricidad corta, el segundo y el tercero a la oblicuidad y el quinto a la precesión. El primer pico, que supera la banda de confianza, se descarta ya que supera el millón de años.

Utilizando el modelo wavelet, obtenemos la figura 21 y la tabla 8.



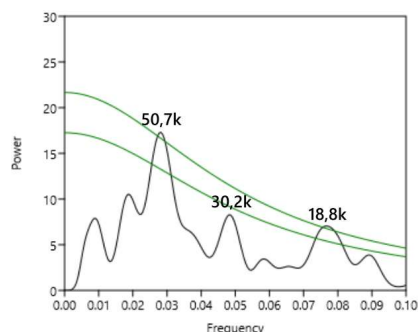
Log 2	Periodo	Metros	Años
8	256	25,6	371,2ka
7	128	12,8	185,6ka
5	32	3,2	46,4ka
4	16	1,6	23,2ka

Tabla 8: Tabla del modelo Wavelet asociada a la serie de tiempo basada en los colores.

Figura 21: Gráfico del modelo Wavelet asociada a la serie de tiempo basada en los colores.

En este caso, el primer ciclo se aproxima a la excentricidad larga, el segundo difiere mucho, pero podría ser el reflejo de la excentricidad corta, el tercero se asocia a la oblicuidad, y el cuarto, aunque inconsistente, podría representar la precesión.

Finalmente, el modelo Redfit, resultando en la figura 22 y la tabla de datos asociados (tabla 9).



Frecuencia	Power	Periodo	Metros	Años
0,028224	17,295	35,4	3,5	50,7ka
0,048175	8,2758	20,75	2,08	30,2ka
0,076886	7,0471	13	1,3	18,8ka

Tabla 9: Tabla del modelo Redfit asociada a la serie de tiempo basada en los colores.

Figura 22: Gráfico del modelo Redfit asociada a la serie de tiempo basada en los colores ("oversample de 15 y "segments" de 8).

En este último caso, los dos primeros ciclos podrían asociarse a la oblicuidad, aunque distorsionada, y el tercer ciclo a la precesión.

7. Discusión de resultados

Para facilitar la comparación de los resultados obtenidos, poder escoger los ciclos que se repitan con mayor frecuencia y extraer conclusiones, se ha elaborado una tabla resumen.

	Años	SM	P.S	Wavelet	Redfit	Litología	P.S	Wavelet	Redfit	Color	P.S	Wavelet	Redfit
Ex. Larga	405-415k		391,5ka	304,5ka	-		447,3ka	-	-		-	371,2ka	-
Ex. Corta	100k		123ka	114ka	130,5ka		99,4ka	92,8ka	87ka		75,4ka	-	-
Oblicuidad	41k		-	-	-		50,7ka	-	34ka		50,7ka	46,4ka	50,7ka
Precesión	19-24k		-	-	-		-	23,2ka	19,6ka		18,8ka	23,2ka	18,8ka
	Metros	SM	P.S	Wavelet	Redfit	Litología	P.S	Wavelet	Redfit	Color	P.S	Wavelet	Redfit
Ex. Larga	27,9-28,6		27	21	-		30,8	-	-		-	25,6	-
Ex. Corta	6,9		8,5	7,86	9		6,86	6,4	6		5,2	-	-
Oblicuidad	2,83		-	-	-		3,5	-	2,35		3,5	3,2	3,5
Precesión	1,31-1,66		-	-	-		-	1,6	1,35		1,3	1,6	1,3

Tabla 10: Tabla resumen del análisis con Past, comparada con los ciclos de Milankovitch. El color verde indica cercanía de menos del 5% en años y el color naranja cercanía entre 5 y 25%

Observando los datos, se puede destacar que el ciclo más comúnmente detectado es el de la excentricidad corta, seguido por un ciclo próximo a la oblicuidad, y después el ciclo de precesión, que se detecta mejor con la serie de tiempo de colores y la de litología. Finalmente, se detecta un ciclo cercano a la excentricidad larga.

El hecho de que los ciclos en general no se aproximan perfectamente a los ciclos de Milankovitch puede deberse a varias causas. Los ciclos de Milankovitch (excentricidad, oblicuidad y precesión) interactúan entre sí y con otros factores climáticos, causando que los ciclos individuales no se detecten de forma pura, pero con una combinación de influencias que varían su periodicidad aparente. Los métodos estadísticos y de análisis de series temporales utilizados para detectar ciclos pueden introducir sesgos o transformaciones. Por ejemplo, los análisis estadísticos pueden identificar períodos dominantes que son combinaciones de varios ciclos, lo que resulta en una periodicidad aparente diferente a la original. Además, la actividad tectónica es muy importante en la zona durante el depósito de los materiales de objeto de estudio (Luzón, 2001), por tanto, puede interferir en los registros sedimentarios, provocando una distorsión en los ciclos y que estos sean detectados con una periodicidad ligeramente alterada, añadiendo ruido a los espectros. Este efecto se observa principalmente en ciclos de corta duración. En contraste, los ciclos de excentricidad, debido a su largo período, tienden a manifestarse mejor. Su duración los hace menos susceptibles a ser completamente enmascarados por variaciones a corto plazo en la sedimentación o por eventos tectónicos. Además, estos ciclos tienen un impacto climático más global y duradero, lo que puede resultar en señales más robustas y más fácilmente detectables en registros sedimentarios, incluso en presencia de deformación tectónica.

Finalmente, algunos de los ciclos detectados se alejan bastante de los esperables, por ejemplo, un ciclo de 260ka o 272ka años, se puede pensar que la interacción entre los ciclos de excentricidad (alrededor de 100.000 y 400.000 años), oblicuidad (41.000 años) y precesión (alrededor de 19.000 a 24.000 años) pueden producir señales combinadas que pueden ser interpretadas como ciclos de unos 250.000 años en los registros sedimentarios (Martín-Chivelet et al., 2015). Además, los procesos tectónicos a largo plazo influyen en los patrones sedimentarios y en consecuencia pueden dar señales de ciclos de 250.000 años con señales más o menos periódicas. Otro ciclo afectado es la oblicuidad,

que varía en rangos de 30.000 a 50.000. Alguna razón para su distorsión puede ser la actividad tectónica, con su capacidad para deformar e interrumpir los depósitos, puede introducir eventos sedimentarios abruptos que fácilmente enmascaran o distorsionan estos ciclos más breves. En estas áreas, las tasas de sedimentación pueden variar significativamente, lo que puede diluir o amplificar ciertos períodos sedimentarios. Un caso similar es la detección de ciclos de unos 11.000 años en el registro sedimentario, el cual se explica por la interacción y combinación de varios procesos (climáticos, astronómicos y geológicos) pudiendo la superposición de diferentes ciclos y eventos crear señales que se detecten en escalas de tiempo específicas como 11.000 años.

Aproximación a partir de las relaciones entre ciclos

Se han calculado las relaciones obtenidas entre los ciclos obtenidos mediante una segunda aproximación (Fig. 23), es decir, realizando un promedio de los datos que más se aproximan, que podemos comparar con la figura 11, en la que se muestran las relaciones verdaderas.

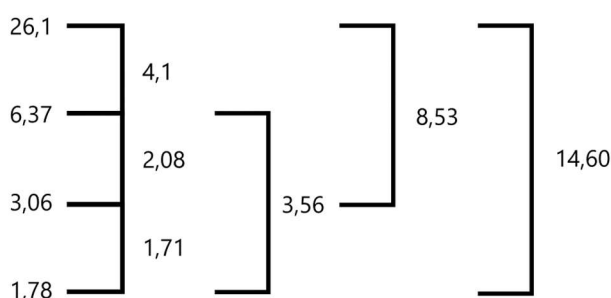


Figura 23: Diagrama comparativo de los ciclos obtenidos, los valores están en metros.

Con cierto margen de error, se puede observar que las relaciones entre los ciclos se aproximan mucho a las verdaderas. Ello refuerza la propuesta del apartado anterior, con una clara influencia de los ciclos astronómicos en la evolución de los sistemas sedimentarios en los que se depositaron los materiales de la zona de Alcolea de Cinca. Las variaciones con respecto a los valores originales se pueden asociar a los cambios en la tasa de sedimentación algo muy habitual en una zona con importante actividad tectónica, siendo el valor más alejado, el que implica la oblicuidad.

Reflejo sedimentario de los ciclos de Milankovitch

En función del espesor estimado que le damos a los ciclos sedimentarios en las figuras 6 y 9, podemos relacionar estos con los ciclos de Milankovitch que hemos calculado con el programa.

En este caso, los ciclos de excentricidad larga (405-415ka años) con una media de espesor de entorno a 28m (Tabla 10), se corresponderían con las secuencias de mayor potencia en la Fig. 6, secuencias complejas aluvial-lacustre que representan el avance del sistema aluvial y posterior retroceso y expansión lacustre, abarcando aproximadamente 30 metros.

Los ciclos de excentricidad corta (100ka) se asocian con los ciclos completos aluviales, con una media de unos 7 m, que se corresponde con la columna de "Ciclos largos" de la Fig. 6, y representan el abandono de un canal e instalación de la llanura de inundación en una zona.

Los ciclos de oblicuidad y precesión (de entre 1,3 y 2,8 m) podrían ser las secuencias menos potentes, correspondiéndose con los ciclos elementales aluviales (A1 y A2) y lacustres (L) de la figura 9.

8. Conclusiones

Realizando la caracterización exhaustiva de los materiales de edad miocena en la zona de estudio de Alcolea de Cinca, se han identificado 7 litofacies terrígenas (Sm, Sh, Sp, St, Sr, Fl y Fr) y 4 litofacies carbonatadas (Kl, Km, Kb y Ml). Las litofacies se agrupan en 3 tipos de secuencias elementales (A1, A2 y L). Se reconocen secuencias más complejas y de mayor espesor (aluvial compleja) que se relacionan con la implantación y abandono posterior de canales en una zona, las más completas representan el ambiente aluvial distal y su transición a un medio lacustre somero. Estos resultados muestran el depósito de una zona aluvial distal periódicamente invadida por las zonas externas de un sistema lacustre carbonatado localizado más al sur.

Se ha correlacionado el perfil levantado con el de Luzón (2001) y el de Pérez-Rivarés et al. (2018), que implican unos 900.000 años de extensión de la serie, por tanto, cada metro sería unos 14.500 años, siendo clave este dato para el objetivo del trabajo. Los materiales son esencialmente miocenos, si bien la base puede ser del oligoceno superior. Empleando el programa Past, se han podido establecer los ciclos periódicos más representativos mediante cálculos estadísticos tomando de referencia tres series de tiempo (susceptibilidad magnética, facies y color) y obtenido gráficos interpretables, que proporcionan datos clave de frecuencia, para así obtener el periodo y los metros de potencia, permitiendo detectar con mayor frecuencia los ciclos de excentricidad corta, seguidos de los ciclos de precesión, los de oblicuidad y los de excentricidad larga.

Se ha comparado la edad de los ciclos sedimentarios con los resultados obtenidos con Past. Se deduce una correlación entre los ciclos de Milankovitch y las secuencias sedimentarias depositadas en los materiales aluviales y lacustres, ya que presentan cambios cíclicos aparentes. Las secuencias inferidas que se aproximan más a las potencias teóricas son las de precesión, seguidas de la excentricidad corta, la oblicuidad y finalmente, la excentricidad larga. Los ciclos que no se corresponden con las periodicidades reales se atribuyen a interferencias entre ciclos, la influencia de la actividad tectónica o el cambio en la tasa sedimentaria.

9. Bibliografía

Batenburg, S.J.; Sprovieri, M.; Gale, A.S.; Hilgen, F.J.; Husing, S.; Laskar, J.; Liebrand, D.; Lirer, F.; Orue-Etxebarria, X.; Pelosi, N. y Smit, J., 2012. Cyclostratigraphy and astronomical tuning of the Late Maastrichtian at Zumaia (Basque country, Northern Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 359-360: 264–278.

Cuenca, G.; Canudo, J.I.; Laplana, C. y Andrés, J.A., 1992. Bio y cronoestratigrafía con mamíferos de la Cuenca Terciaria del Ebro: ensayo de síntesis. *Acta Geológica Hispánica*, 27: 127-143.

Einsele, G. y Ricken, W., 1991. Introductory remarks. En: *Cycles and events in Stratigraphy*, (G. Einsele, W. Ricken y Seilacher, A. Eds.) United States, 23-47.

Garcés, M.; López Blanco, M.; Valero, L.; Beamud, E.; Muñoz, J. A.; Oliva-Urcía, B.; Vinyoles, A.; Arbués, P.; Cabello, P. y Cabrera, L., 2020. Paleogeographic and sedimentary evolution of the South-Pyrenean foreland basin. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104105.

Hernández Samaniego, A. y del Olmo, A., 1998. Capítulo: Estratigrafía, pp 8-27, En: Memoria explicativa de la Hoja nº 357 (Sariñena). Mapa Geológico de España E. 1:50.000, Segunda Serie (MAGNA), 1ª edición. ITGE, 57 pp. ISBN: 84-7840-316-7.

Hernández Samaniego, A., 1990. *Mapa Geológico de la Hoja nº 357 (Sariñena)*. Mapa Geológico de España E. 1:50.000 (MAGNA), Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME, Madrid.

Luzón, A., 2001. Análisis tectosedimentario de los materiales terciarios continentales del sector central de la Cuenca del Ebro (provincias de Huesca y Zaragoza). Tesis doctoral, Univ. Zaragoza, 465 p.

Luzón, A., 2005. Oligocene–Miocene alluvial sedimentation in the northern Ebro Basin, NE Spain: Tectonic control and palaeogeographical evolution. *Sedimentary Geology*, 177: 19-39.

Luzón, A. y González, A., 2003. Los sistemas aluviales oligo-miocenos del margen norte de la cuenca del Ebro: Caracterización sedimentaria y síntesis paleogeográfica. *Revista Sociedad Geológica España*, 16 (3-4): 239-256.

Martín-Chivelet, J., Palma, R. M., Domingo, L. y López-Gómez, J., 2015. Cicloestratigrafía, Cambio Climático y la Escala de Tiempo Astronómico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.2: 136-147.

Miall, A.D., 1978. Fluvial sedimentology: an historical review, En: *Fluvial Sedimentology*, (A. D. Miall, ed.). Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5, 1-47.

Miall, A.D., 2006. The geology of fluvial deposits. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 99-130. 441 p.

Muñoz, A.; Arenas, C.; González, A.; Luzón, A.; Pardo, G. y Villena, J., 2002. Ebro Basin (Northeastern Spain). En: *Geology of Spain*, (W. Gibbons., T. Moreno, Ed.). Geological Society, London, 301–309.

Pardo, G., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Pérez-Rivarés, F.J., Vázquez-Urbez, M., Villena, J., 2004. La cuenca del Ebro. En: *Geología de España*, (J.A. Vera, Ed.). IGME y Sociedad Geológica de España, Madrid, 533–543.

Pérez-Rivarés, F.J.; Arenas, C.; Pardo, G. y Garcés, M., 2018. Temporal aspects of genetic stratigraphic units in continental sedimentary basins: Examples from the Ebro basin, Spain. *Earth-Science Reviews*, 178: 136-153.

Quirantes Puertas, J., 1978. Estudio sedimentológico y estratigráfico del terciario continental de los Monegros. IFC, 208 p.

Páginas web consultadas:

<http://proyectomonegros.com/vegetacionmonegros/#:~:text=La%20vegetación%20que%20se%20puede,bajas%20temperaturas%20que%20los%20sabinares>

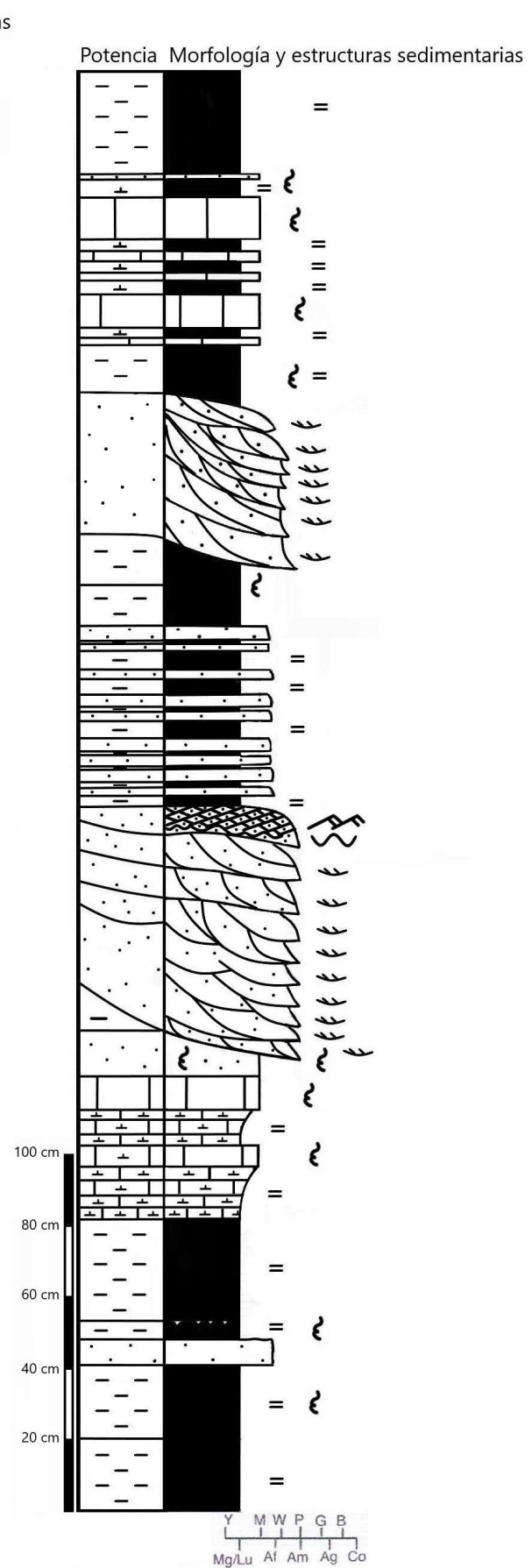
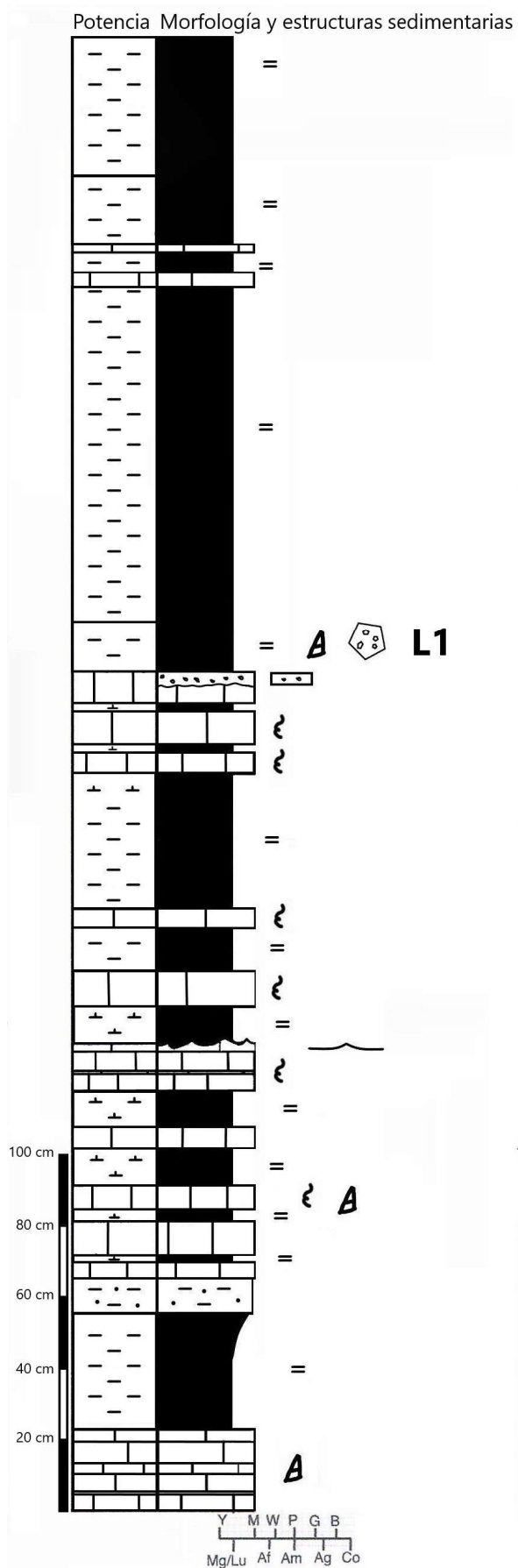
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-21490>

<https://turismoalcolea.com/birdwatching/aves-esteparias-2/#:~:text=La%20vegetación%20es%20la%20propia,aliagas%20y%20otras%20praderas%20invernales>

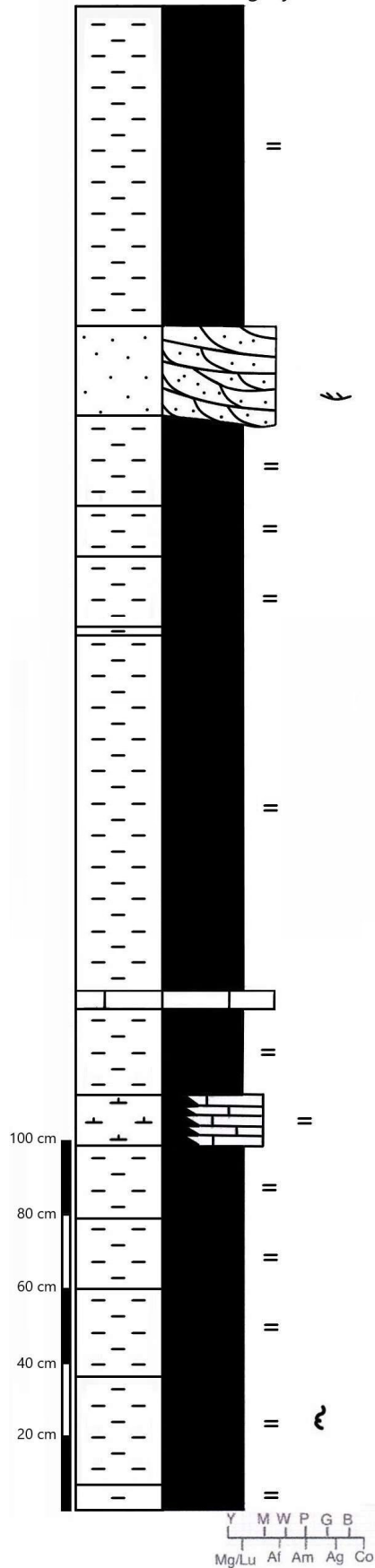
<https://www.ign.es/iberpix/visor/>

<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

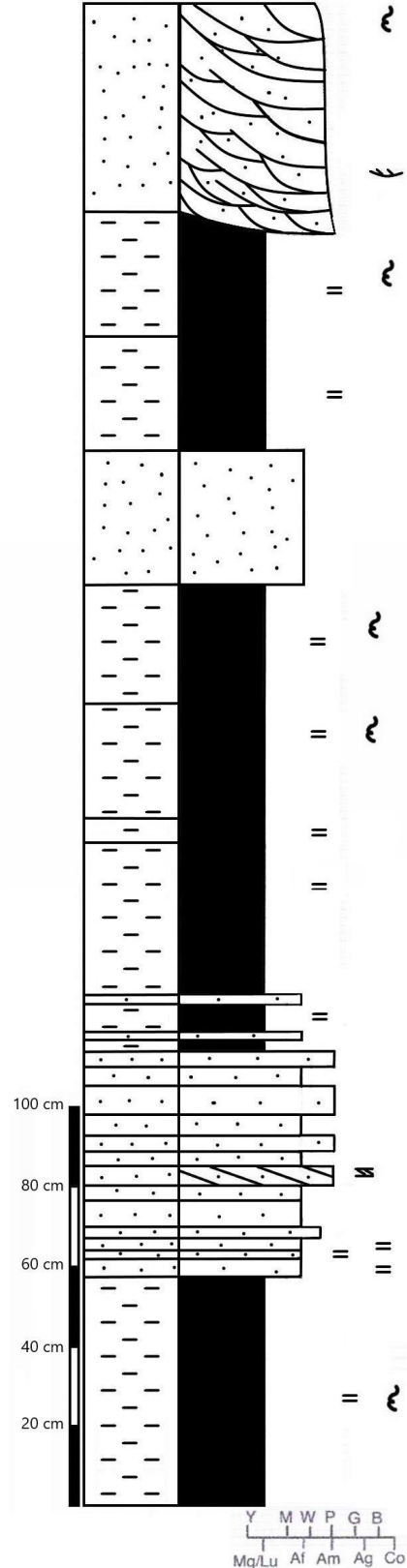
Anexo 1: Perfil de Alcolea Sur en detalle.



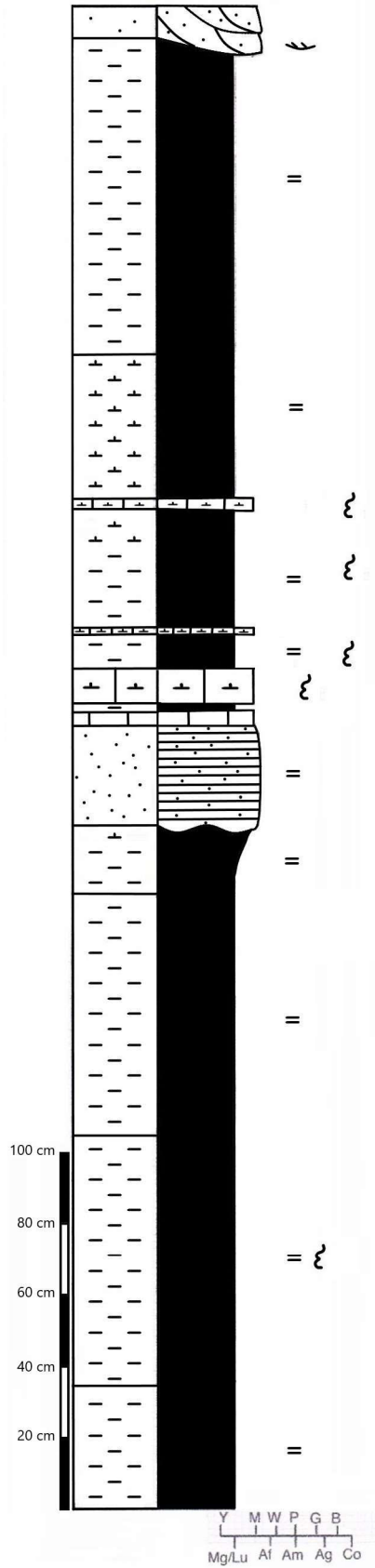
Potencia Morfología y estructuras sedimentarias



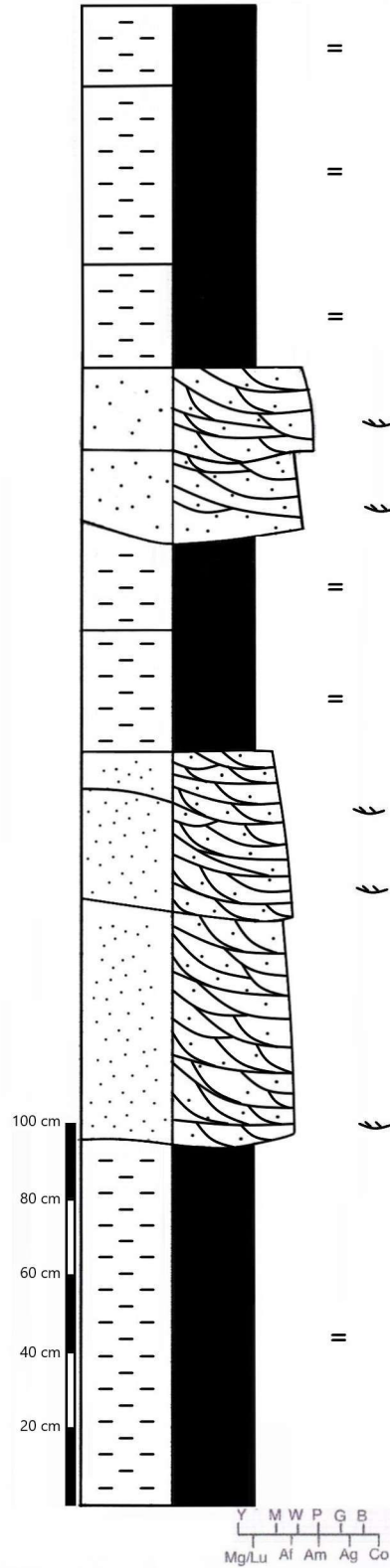
Potencia Morfología y estructuras sedimentarias

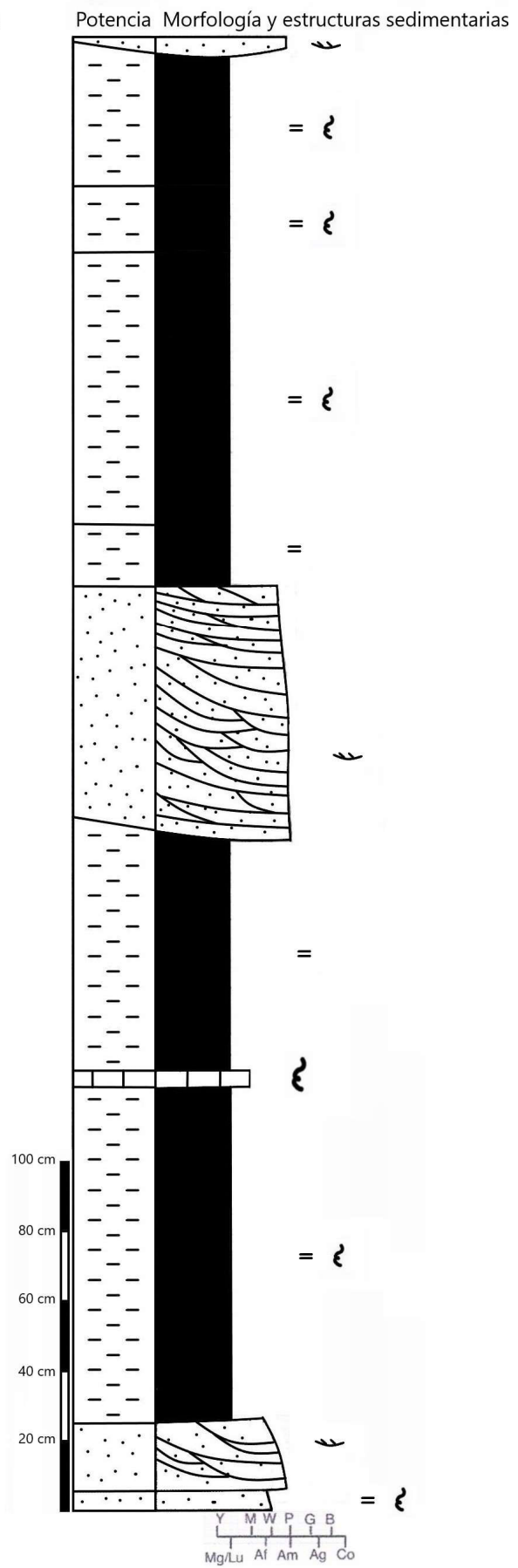
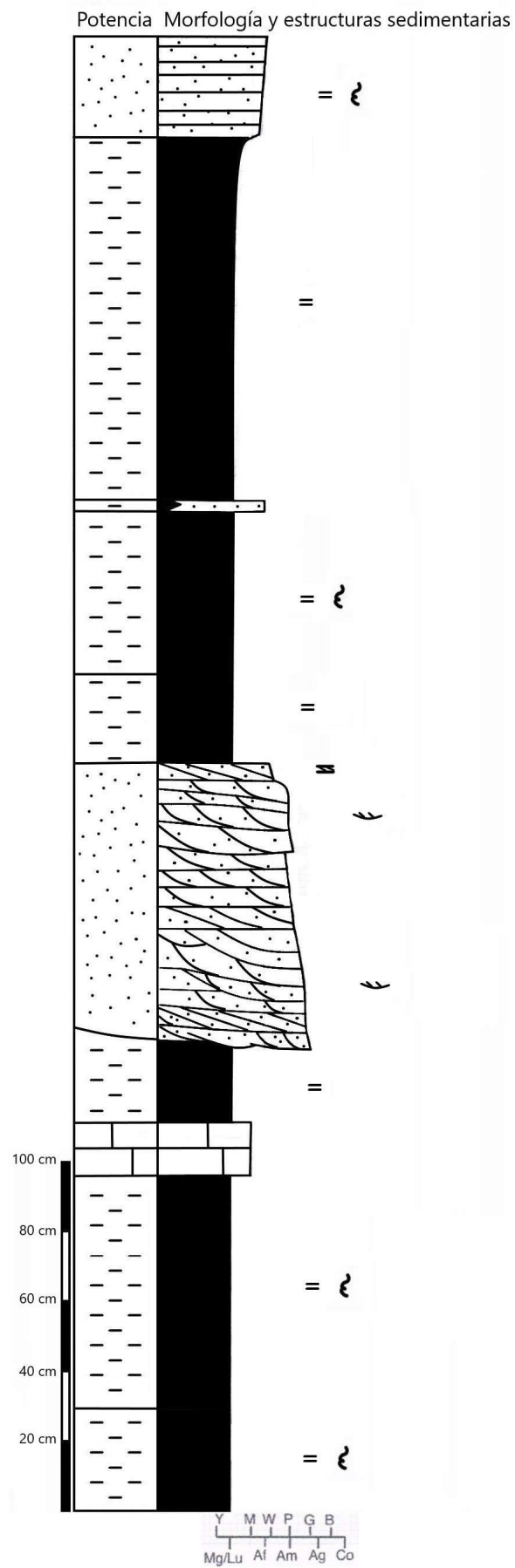


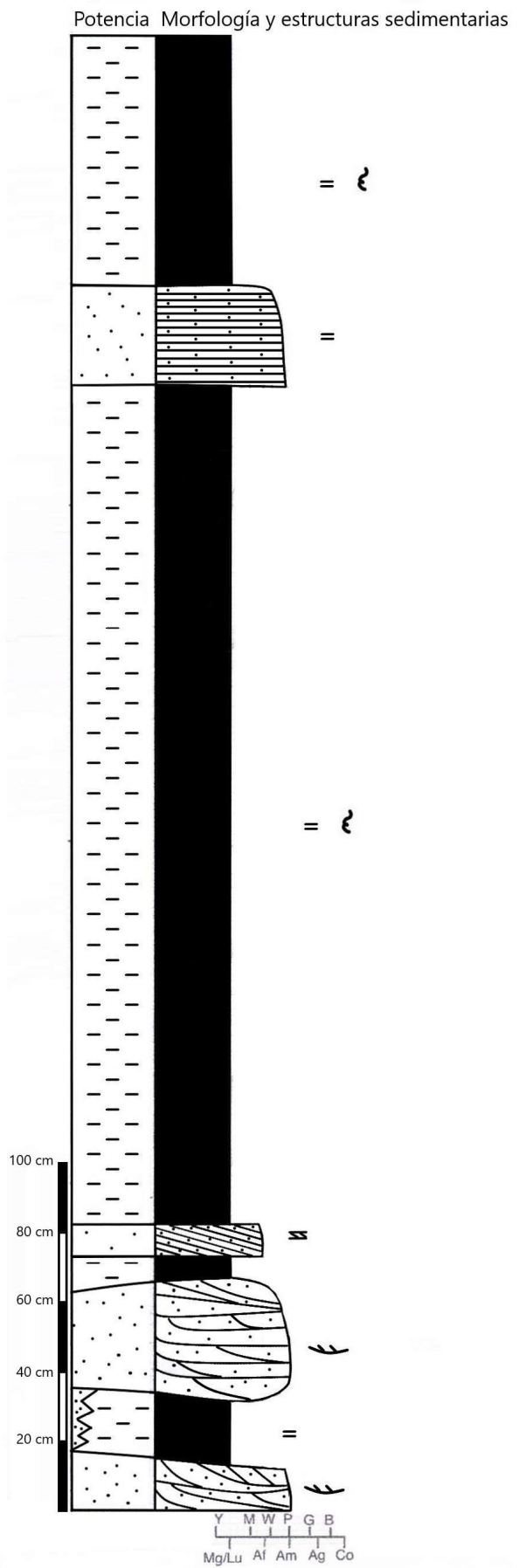
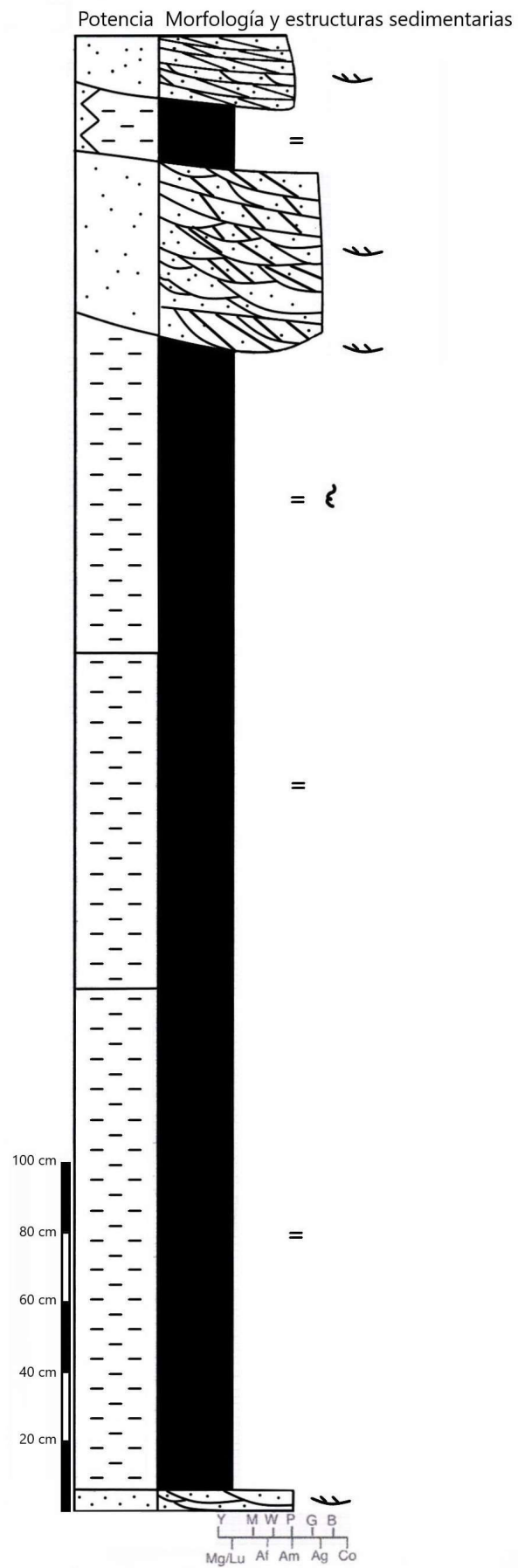
Potencia Morfología y estructuras sedimentarias



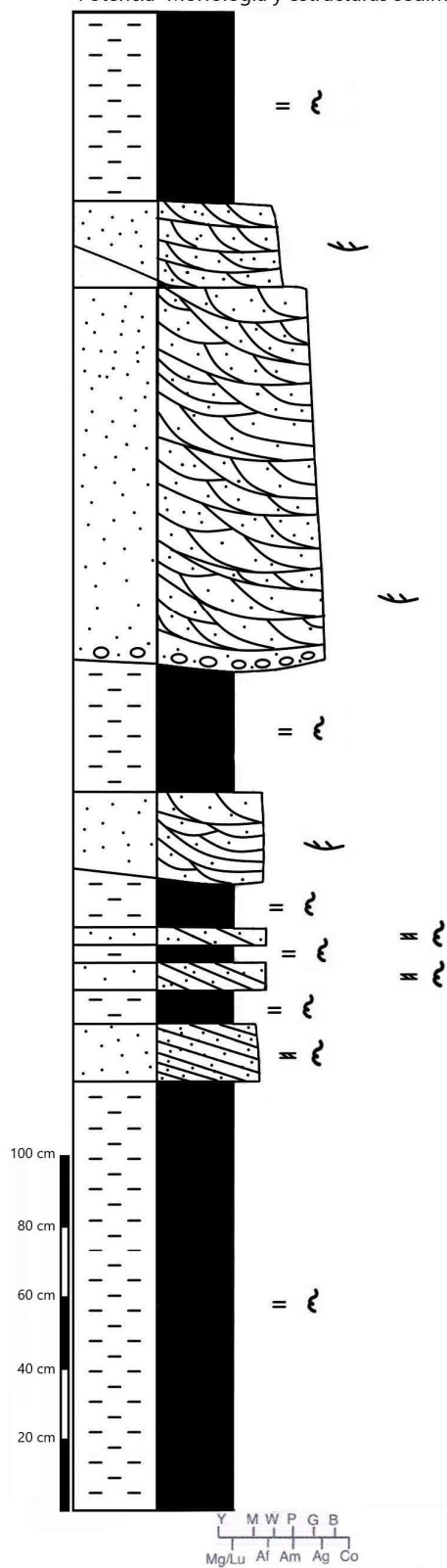
Potencia Morfología y estructuras sedimentarias



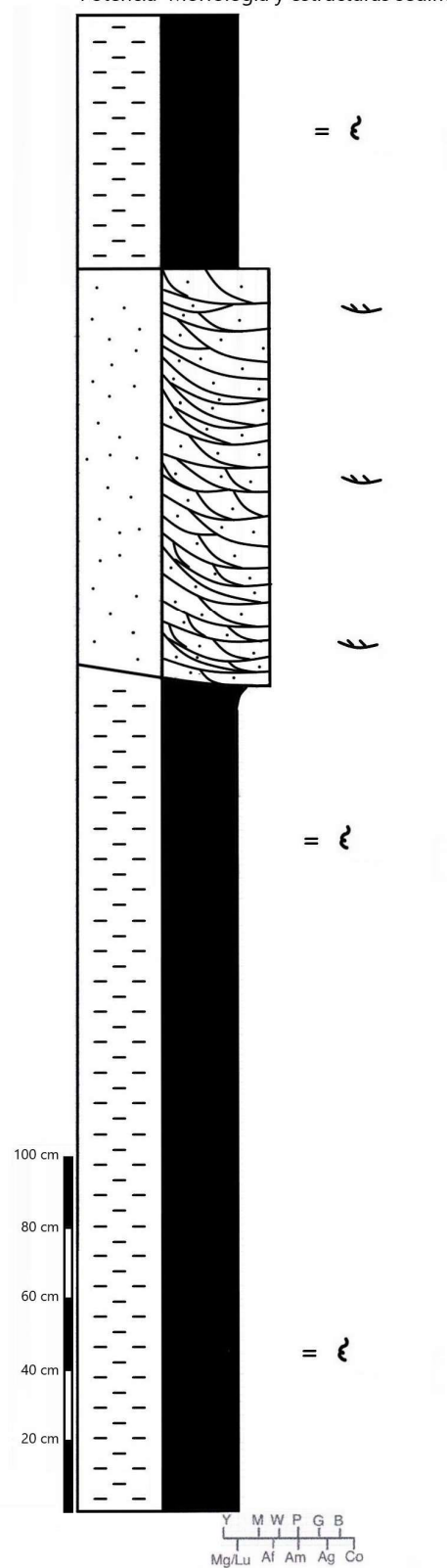




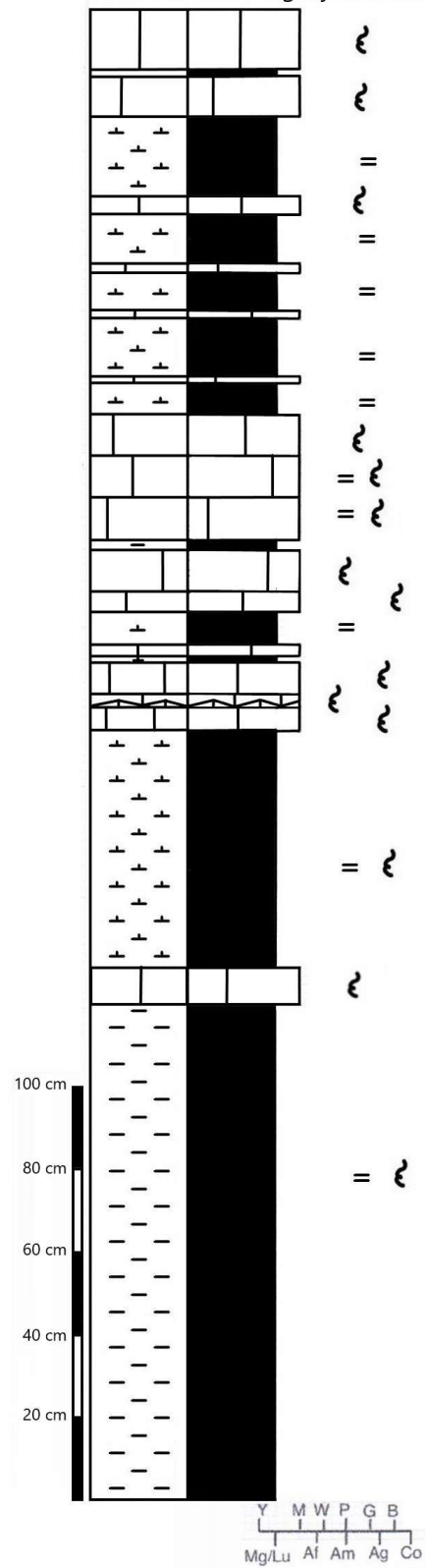
Potencia Morfología y estructuras sedimentarias



Potencia Morfología y estructuras sedimentarias



Potencia Morfología y estructuras sedimentarias



Anexo 2: Tablas de datos:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1N3iuMeUhmGQOJnNg9bN3Ju-V18hxtCbZ/edit?usp=sharing&ouid=103885583158593323162&rtpof=true&sd=true>

Anexo 3: Fotos extra de litofacies, afloramientos y otros.



Alternancia de lutitas laminadas y areniscas con laminación horizontal y bioturbación.



Detalle de la margen de un canal, que erosiona facies de Sh y Fl, la corriente sería perpendicular a la concavidad.



Osteodermo de cocodrilo "in situ"



Areniscas sigmoidales erosionando limos y areniscas infrayacentes.



Tomando datos de susceptibilidad magnética.