

Análisis geológico multidisciplinar de la Unidad Arenas de Trigueros (Formación Arcillas de Gibraleón, S.O. de España)

Multidisciplinary geological analysis of the Trigueros Sand Unit (Gibraleon Clay Formation, SW Spain)

Verónica Romero¹, Antonio Toscano¹, Francisco Ruiz^{1,*}, María Luz González-Regalado¹, Manuel Abad², Tatiana Izquierdo², Joaquín Rodríguez Vidal¹, Luis Miguel Cáceres¹, Rosa Marques³, Maria Isabel Prudencio³, María Isabel Dias³, Dulce Russo³, Paula Gómez¹

¹Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Avenida Tres de Marzo, s/n. 21071 Huelva, España. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6879-0243>, <https://orcid.org/0000-0003-2144-5714>, <http://orcid.org/0000-0002-7110-3133>, <http://orcid.org/0000-0002-2626-9142>, <http://orcid.org/0000-0002-9475-3307>, <https://orcid.org/0000-0002-1381-2476>, <https://orcid.org/0000-0003-4216-5869>

²Departamento de Biología, Geología, Física y Química Inorgánica, Universidad Rey Juan Carlos. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1930-2650>, <http://orcid.org/0000-0002-3805-2020>

³Instituto Superior Técnico, Universidad de Lisboa, 2696-066-Bobadella LRS, Portugal. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6239-5456>, <https://orcid.org/0000-0003-2311-1806>, <http://orcid.org/0000-0002-7033-0502>, <http://orcid.org/0000-0003-4954-217X>

* Corresponding author: ruizmu@uhu.es

RESUMEN

Este trabajo define las principales características sedimentológicas, paleontológicas y geoquímicas de la Unidad Arenas de Trigueros, depositada durante el Messiniense en un contexto global de bajada de nivel del mar. Esta unidad se diferencia del resto de la Formación Arcillas de Gibraleón por su mayor tamaño de grano, la presencia de niveles tempestíticos formados por bivalvos típicos de medios circalitorales, una asociación de ostrácodos propia de medios infralitorales en su tramo superior arenoso y unos menores contenidos en elementos trazas y tierras raras. En su conjunto, estas características identificarían un depósito de turbiditas en un medio circalitoral de baja energía, cuyo fondo sufrió episodios erosivos y donde concurrieron también sedimentos transportados desde medios neríticos someros, dentro de una zona distal de aparatos deltaicos.

Palabras clave: Sedimentología; Registro Paleontológico; Geoquímica; Messiniense; S.O. España

ABSTRACT

This paper defines the main sedimentological, palaeontological and geochemical features of the Trigueros Sand Unit, deposited during the Messinian in a global context of falling sea level. This unit is notably different from the rest of the Gibraleón Clay Formation due to its larger grain size, the presence of stormy levels formed by bivalves typical of circalittoral environments, an infralittoral ostracod association in its upper sandy levels and a lower content

Recibido el 2 de febrero de 2023; Aceptado el 2 de junio de 2023; Publicado online el 5 de septiembre de 2023

Citation / Cómo citar este artículo: Romero, V., et al. (2023) Análisis geológico multidisciplinar de la Unidad Arenas de Trigueros (Formación Arcillas de Gibraleón, S.O. de España). *Estudios Geológicos* 79(2): e154. <https://doi.org/10.3989/egeol.44960.630>

Copyright: (c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

of both trace elements and rare earths. Together, these characteristics would identify the deposition of turbidites in a low-energy circalittoral environment, whose bottom suffered erosive episodes and where sediments transported from shallow neritic environments also concurred, within a distal area of ancient deltas.

Keywords: Sedimentology; Paleontological Record; Geochemistry; Messinian; SW Spain.

Introducción

Durante el Neógeno superior, la conexión entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo se efectuaba a través del estrecho Rifeño, al sur y ubicado en la parte septentrional de Marruecos y Argelia, y el estrecho Norbético, al norte, extendiéndose por gran parte de la actual depresión del río Guadalquivir (Fig. 1, A). Durante el Tortonense superior-Messiniense inferior, la conexión de este estrecho septentrional con el mar Mediterráneo quedó restringida progresivamente al corredor del Guadalhorce (Martín et al., 2001, 2009). El cierre de ambos estrechos conduciría a un aislamiento temporal del mar Mediterráneo du-

rante la Crisis de Salinidad Messiniense (5.97-5.33 Ma; Krijgsman et al., 1999). El suroeste de España quedó configurado posteriormente como una amplia bahía durante el Plioceno inferior, con una transición hacia medios continentales a finales de este periodo y un dominio posterior de la dinámica fluvial durante el Pleistoceno y el Holoceno inferior (González Delgado et al., 1995; Cáceres, 1995; González-Regalado et al., 2009).

Tres formaciones geológicas se depositaron en el sector occidental de la depresión del Guadalquivir entre el Tortonense superior y el Plioceno inferior (Fig. 1, B): i) Formación Niebla (Civis et al., 1987;

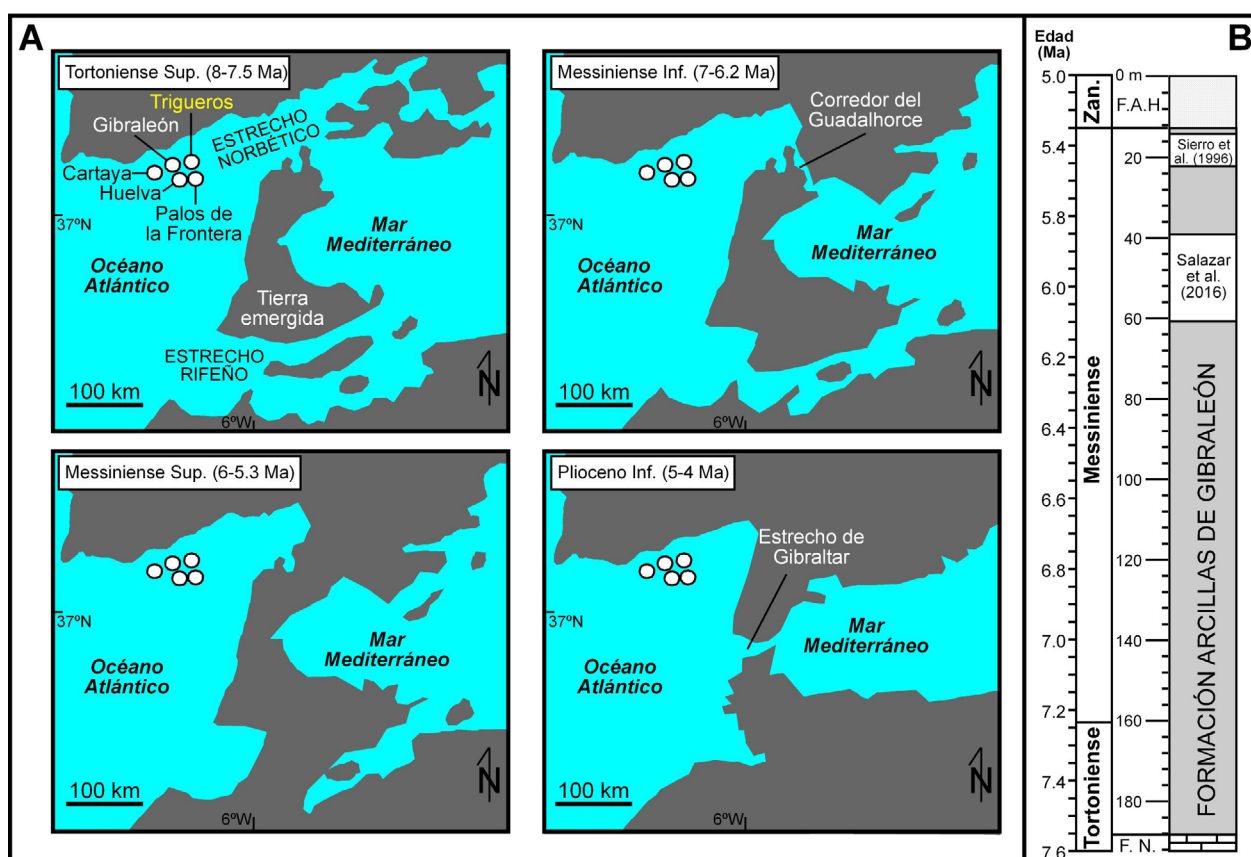


Figura 1.— A. Evolución del tránsito Atlántico-Mediterráneo durante el Neógeno Superior (modificado de Martín et al., 2001), con inclusión de la situación de la sección estudiada y de diversas localidades referidas en el texto; B. Principales formaciones geológicas en el sector Huelva-Trigueros, con la situación de la unidad Arenas de Trigueros según Sierro et al. (1996) y Salazar et al. (2016); F.N.: Formación Niebla; F.A.H.: Formación Arenas de Huelva;

Baceta & Pendón, 1999; Abad, 2007), constituida por conglomerados fluviales, arenas litorales y calcarenitas de edad Tortoniense superior, estas últimas con un abundante registro fósil (algas coralináceas, briozoos, bivalvos, equinodermos, nummulítidos); ii) Formación Arcillas de Gibraleón (FAG en adelante; Civis et al., 1987), de edad Tortoniense superior-Messiniense, compuesta por un nivel glauconítico basal sobre el que se depositaron margas y limos arcillosos gris-azulados ricos en microfauna, entre los que se intercalan los paquetes arenosos de la unidad Arenas de Trigueros (UAT en adelante; Sierro et al., 1996); y iii) Formación Arenas de Huelva (Civis et al., 1987), formada por un nuevo nivel glauconítico basal sobre el que se disponen arenas masivas muy bioturbadas y niveles lumaquéllicos de moluscos atribuidos a la acción de tormentas en la bahía que ocupaba este sector durante el Plioceno inferior (González Delgado et al., 1995; González-Regalado et al., 2009).

Sierro et al. (1996) definen por primera vez la UAT como facies turbidíticas y le asignan una edad Messiniense superior (~5,5-5,4 Ma). Posteriormente, Toscano et al. (2013) la han identificado como turbiditas depositadas en zonas distales de sistemas deltaicos. Finalmente, Salazar et al. (2016) confirman esta reconstrucción paleoambiental, si bien le atribuyen una edad algo más tardía (Fig. 1, B: ~6,2-5,9 Ma). No obstante, no existen estudios específicos centrados en sus características litoestratigráficas o geoquímicas y apenas se conocen datos sobre su registro fósil (p.e., Toscano, 2016).

En este trabajo, se efectúa un análisis geológico multidisciplinar de una sección de la UAT. Sus objetivos son: i) precisar sus características litoestratigráficas; ii) analizar su composición geoquímica; iii) efectuar un estudio detallado de su macrofauna y sus asociaciones de ostrácodos para poder definir su ambiente de depósito; y iv) comparar los resultados obtenidos con estudios realizados en otras secciones de la FAG.

Metodología

La sección estudiada se sitúa en el cruce de “Los Cuatro Caminos”, ubicado al oeste de la localidad de Trigueros (SO de España), en la intersección entre la

calle Pascuales y la carretera HU-3105 (Fig. 2, A). Sus coordenadas UTM son 29S 690850.92 m E y 4139690.79 m N WGS84. En una primera fase, se procedió al levantamiento de su perfil estratigráfico y al análisis “in situ” de su macrofauna y evidencias paleoicnológicas. Para la clasificación de los bivalvos observados, se han consultado los estudios de Andrés (1982), Lozano Francisco (1997) y Cárdenas et al. (2017), entre otros. Los vertebrados marinos (ictiofauna y cetáceos) se han clasificado de acuerdo con García (2008) y Toscano (2016).

En base a esta primera fase de estudio, se procedió a la toma de 10 muestras (Fig. 2, B: T-1 a T-10; 1 kg de sedi-

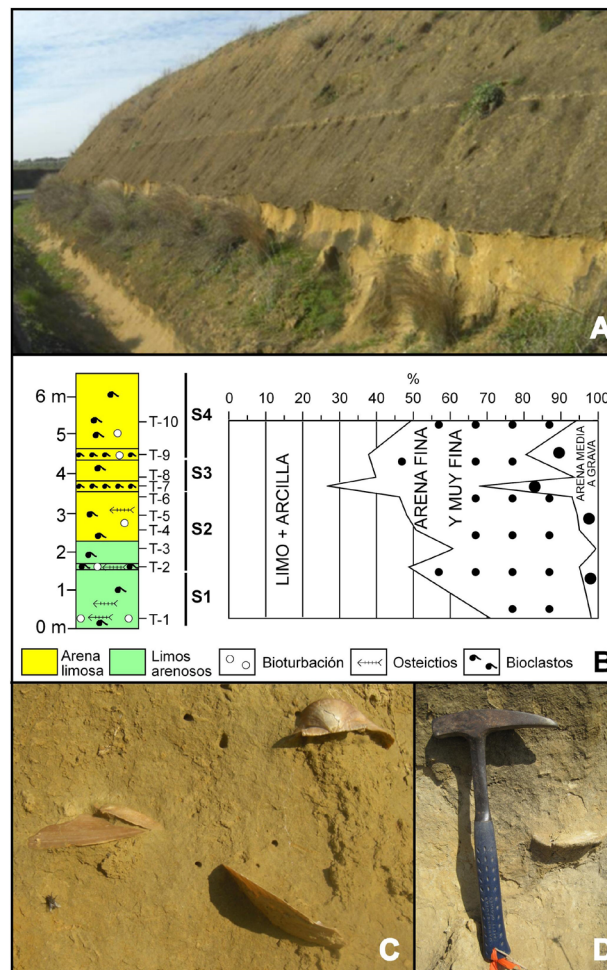


Figura 2.— A. Vista parcial de la sección de “Cuatro Caminos” (Trigueros, S.O. de España); B. Columna litoestratigráfica de la sección estudiada, con situación de las muestras extraídas y las secuencias diferenciadas (S1 a S4). C. Detalle de un nivel bioclástico, con valvas de *Oppenheimpecten revolutus* (parte superior derecha) y de *Cristatopecten cristatus* (parte inferior). D. Epífisis vertebral de cetáceo misticeto.

mento por muestra) para su análisis geológico pluridisciplinar. Para determinar su distribución granulométrica, de estas muestras iniciales se extrajeron diez submuestras de 25 g cada una, que fueron tamizadas en húmedo a través de una columna de tamices de 2 mm a 63 µm de luz de malla en el laboratorio general del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Huelva.

Otras seis submuestras de 20 g cada una fueron seleccionadas para su análisis geoquímico mediante ICP-Ms (modelo Agilent 7700) en el Centro de Investigación y Desarrollo de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias (CIDERTA) de la Universidad de Huelva. Estas muestras fueron molidas previamente en mortero de ágata para su posterior procesamiento. Se seleccionaron 10 elementos traza para verificar su evolución vertical en la sección “Cuatro Caminos”, así como las tierras raras cuyos valores superaron el límite mínimo de detección (0,5 ppm). Los valores de las tierras raras se han normalizado con el estándar PAAS (Post Archean Australian Shale; Nance & Taylor, 1976; McLennan, 1989), un método usual en investigaciones que las utilizan como marcadores (paleo-)ambientales (Rao & Chakraborty, 2016; Brito et al., 2016).

Diez submuestras de 200 g fueron levigadas a través de un tamiz de 63 µm para la extracción de todos los ostrácodos presentes. Inicialmente, estas submuestras fueron disgregadas con pirofosfato sódico y posteriormente se les agregó peróxido de hidrógeno para la eliminación de la materia orgánica. La determinación taxonómica de las especies fue realizada en base a la comparación de las valvas y caparazones extraídos con los ejemplares figurados por Aiello et al. (1996), Bonaduce et al. (1999) y la World Ostracoda Databa-

se, entre otros trabajos. Algunas de las especies más significativas fueron fotografiadas mediante Microscopio Electrónico de Barrido en los Servicios Centrales de la Universidad de Huelva.

Resultados

Análisis textural y macrofaunístico

La sección “Cuatro Caminos” está constituida por 6,5 m de arenas finas (2,1-16%), arenas muy finas (22,6-45%) y limos arcillosos (27,5-71,6%). De forma puntual, se encuentran importantes porcentajes de arenas muy gruesas y gravas (hasta el 33,9%) en varios niveles bioclásticos presentes en esta sección, constituidos en gran medida por fragmentos de bivalvos de estos intervalos granulométricos. En general, se observa un aumento gradual del tamaño medio de grano entre las muestras basales más limosas (T-1 a T-3) y las muestras superiores con predominio de las arenas finas y muy finas (T-4 a T-10) (Fig. 2, B).

De muro a techo, pueden diferenciarse cuatro secuencias con similares características texturales y macrofaunísticas (Fig. 2, B: S1 a S4). La base de cada secuencia es ligeramente erosiva y sobre ella se dispone un nivel fino (Fig. 2, C: 10-18 cm) de limos arenosos y arenas limosas bioclásticas con abundantes valvas de bivalvos y frecuentes restos de cetáceos, como vértebras y epífisis vertebrales de misticetos (Fig. 2, D), probablemente del género *Balaenoptera*. Entre los bivalvos, son abundantes *Cristatopecten cristatum* (Bronn, 1827) (Fig. 3, A) y *Oppenheimpecten revolutus* (Michelotti, 1847) (Fig. 3, B-C), así como, en

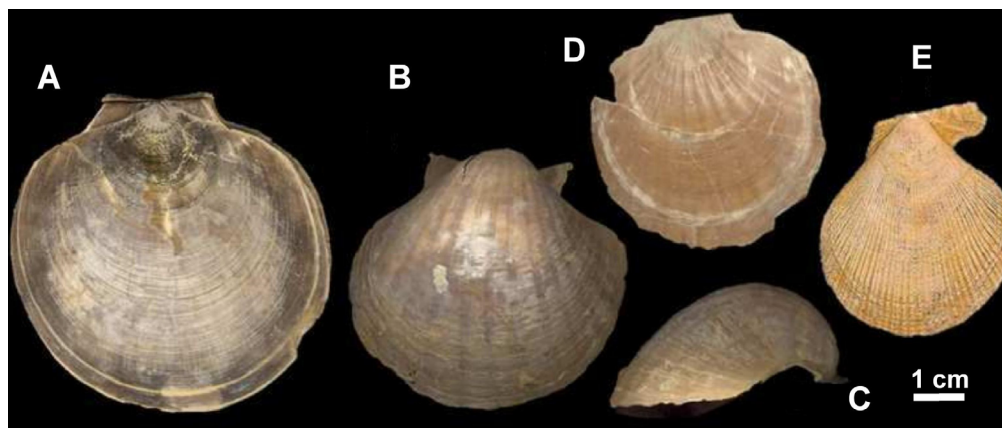


Figura 3.— Bivalvos. A. *Cristatopecten cristatum*. B-C. *Oppenheimpecten revolutus*. D. *Costellamussiopecten koheni*. E. *Chlamys multistriata*.

menor medida, *Costellamussiopecten koheni* (Füchs, 1876) (Fig. 3, D), *Costellamussiopecten spinulosus* (Münster in Goldfuss, 1833) y *Chlamys multistriata* (Poli, 1795) (Fig. 3, E).

Cada secuencia se completa con un paquete de limos arenosos y arenas limosas, con un espesor comprendido entre los 70 cm y 2 m, que presenta abundantes evidencias de bioturbación (*Ophiomorpha* sp.). En estos depósitos son frecuentes las valvas y conchas completas de los bivalvos ya reseñados, así como piezas dentarias aisladas de los condriictios *Carcharocles megalodon* (Agassiz, 1835) (Fig. 4, A), *Cosmopolitodus hastalis* (Agassiz, 1843) (Fig. 4, B-C-D-E), *Carcharhinus obscurus* (Lesueur, 1818), *Carcharhinus leucas* (Muller & Henle, 1839), *Carcharhinus brachyurus* (Günther, 1870), *Carcharias acutissima* (Agassiz, 1843) y *Lamna nasus* (Bonna- terre, 1788). También aparecen dientes de osteictios, pertenecientes a la familia Sparidae (*Sparus* sp.).

Los ostrácodos

Estos microcrustáceos son muy escasos en la sección “Cuatro Caminos”, con sólo 65 valvas y caparzones extraídos en los 2 kg analizados de sedimentos (Tabla 1). La mayor densidad (21-24 individuos/200 g) y diversidad (9-10 especies/200 g) se han encontrado en las muestras arenosas T-7 y T-10, en tanto que estos microorganismos están ausentes en la muestra T-2 y no superan los 5 individuos por muestra en las restantes. Se han diferenciado 21 especies pertenecientes a 17 géneros, de las cuáles dos se han determinado en nomenclatura abierta. Un total de 17 especies sólo se

circunscriben a una o dos muestras, como *Paracypris polita* Sars, 1866 (Fig. 5, A), *Acanthocythereis hystrix* (Reuss, 1850) (Fig. 5, B) o *Cytherella vulgata* Ruggieri, 1962 (Fig. 5, C) y sólo *Aurila semilunata* (Seguenza, 1880), *Pontocythere elongata* (Brady, 1868), *Ruggieria tetraptera tetraptera* (Seguenza, 1880) (Fig. 5, D) y *Nonurocythereis seminulum* (Seguenza, 1880) han sido extraídas en tres de ellas. Las dos primeras especies sólo se han hallado en las arenas limosas superiores, en tanto que las dos últimas también aparecen en los limos arenosos basales.

En relación a los aspectos tafonómicos, en general tanto las valvas como los caparzones están bien conservados, con costillas o espinas bien desarrolladas en *Acanthocythereis hystrix* (Reuss, 1850) o *Ruggieria tetraptera*, si bien se han observado recristalizaciones superficiales en ejemplares de *Cystacythereis caelatura* (Uliczny, 1969). Se han apreciado evidencias de depredación en cuatro valvas y caparzones de *Aurila semilunata*, *Cytherella vulgata* Ruggieri, 1962 (Fig. 5, C) y *Pontocythere elongata* (Brady, 1868), que corresponden a perforaciones cilíndricas atribuidas a la icnoespecie *Oichnus simplex* Bromley, 1981. Otro aspecto importante es la presencia de ejemplares adultos y mudas (A-1 a A-3) de *Cytheretta adriatica* Ruggieri, 1952 y *Neonesidea nigrescens* (Eichwald, 1860) en la muestra T-6 y de *Urocythereis pseudoseminulum* Carbonel, 1969 en la muestra T-10.

Geoquímica

Se han seleccionado 10 elementos traza en las seis submuestras analizadas, que incluyen tanto niveles

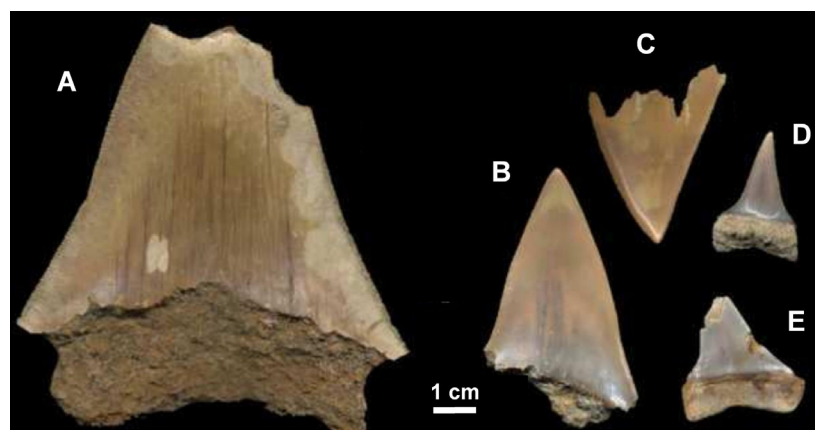
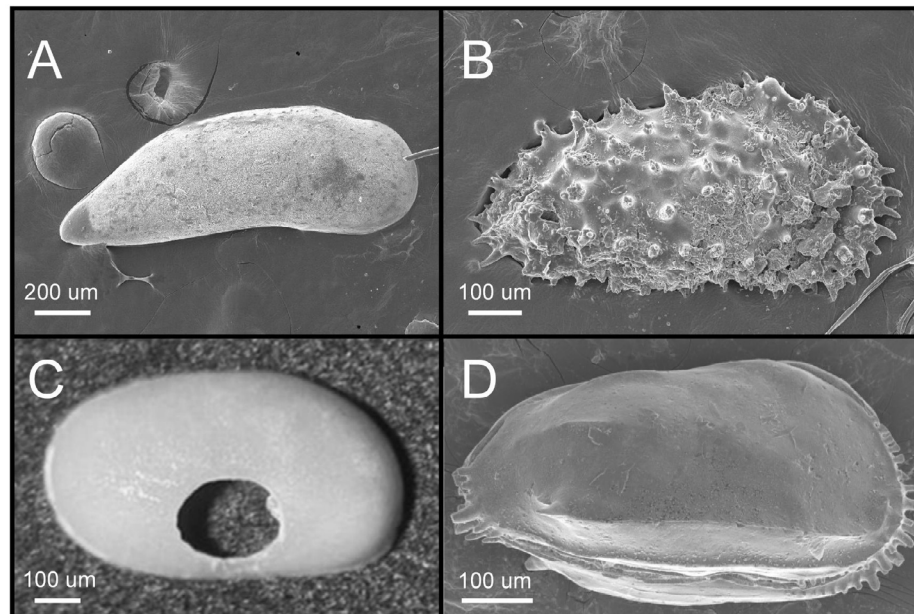


Figura 4.— Condriictios. A. *Carcharocles megalodon*. B-C-D-E. *Cosmopolitodus hastalis*.

Tabla 1. Distribución de los ostrácodos en la sección "Cuatro Caminos".

ESPECIES/MUESTRAS	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10
<i>Acanthocythereis hystrix</i>				2						
<i>Aurila convexa</i>							1			
<i>Aurila longa</i>			1				3			
<i>Aurila semilunata</i>							1	2		1
<i>Aurila uliczny</i>							1			
<i>Bairdoppilata</i> cf. <i>B. supradentatata</i>	1					1				
<i>Celtia quadridentata</i>										2
<i>Costa tricostata</i>							2			
<i>Cystacythereis caelatura</i>							1			2
<i>Cytherella vulgata</i>	1					1				
<i>Cytheretta adriatica</i>							6			1
<i>Krithe praetexta</i>			1							
<i>Loxoconcha linearis</i>							1			2
<i>Loxoconcha</i> gr. <i>ovulata</i>										1
<i>Neonesidea nigrescens</i>							5	1		
<i>Paracypris polita</i>	2									
<i>Paracytheridea depressa</i>									1	
<i>Pontocythere elongata</i>					1				1	2
<i>Ruggieria tetraptera</i> <i>tetraptera</i>	1		1							2
<i>Urocythereis pseudoseminulum</i>			1				3			8
<i>Xetoleberis prognata</i>			1							
Número de individuos	5		5	2	1	2	24	3	2	21
Número de especies	4		5	1	1	2	10	2	2	9
Secuencia sedimentaria	S1	S2	S2	S2	S2	S2	S3	S3	S4	S4
Nivel bioclástico (NB)-Internivel bioturbado (IN)	NB	NB	IN	IN	IN	IN	NB	IN	NB	IN

**Figura 5.**— Ostrácodos. A. Valva derecha de *Paracypris polita*. B. Valva derecha de *Acanthocythereis hystrix*. C. Valva izquierda de *Cytherella vulgata*, con una evidencia central de depredación (icnoespecie *Oichnus simplex* Bromley, 1981). D. Caparazón de *Ruggieria tetraptera*, con vista de la valva derecha.

bioclásticos (muestras T-1 y T-2) como interniveles bioturbados (muestras T-3, T-4, T-5 y T-8). La mayoría de estos elementos siguen un patrón relativamente paralelo (Fig. 6, A), con los máximos valores concentrados en las muestras limosas basales T-1 (Be: 2,91 ppm; Mn: 212 ppm; Cu: 8,12 ppm; Zn: 38,7 ppm; Sr: 132 ppm; Ba: 73,8 ppm) y T-2 (Cr: 48,4 ppm; Ni: 15,2 ppm; U: 1,31 ppm), una disminución acusada cerca del límite entre estos limos arenosos basales y las arenas limosas superiores (muestra T-3), una recuperación parcial en T-4 y una disminución notable en las dos muestras superiores, con los valores más bajos de la sección en T-8 (p.e., Cr: 20,7 ppm; Cu: 4,98 ppm; Zn: 29 ppm; Sr: 42,4 ppm). Solo el Pb sigue una distribución algo diferente, con los máximos valores en la muestra T-3 (14,7 ppm) seguidos de una tendencia decreciente en las arenas superiores (8,52-6,74 ppm).

La evolución geoquímica vertical de las tierras raras presenta también un paralelismo acusado (Fig. 6, B), si bien algo diferente al observado en los elementos traza mencionados. Siguen similar tendencia decreciente en los limos basales (T-1 a T-3), pero los máximos valores de la sección se concentran en la base de las arenas limosas (T-4; p.e., La: 20,6 ppm; Ce: 48,2 ppm; Nd: 19,6 ppm; Sm: 4,01 ppm; Er: 1,32 ppm). El sumatorio de las 10 tierras raras se-

leccionadas sólo supera las 100 ppm en la muestra T-4 (106,79 ppm), para disminuir hacia el techo de la sección, donde aparecen los mínimos valores totales en la muestra T-8 (85,5 ppm).

Las muestras de la UAT muestran valores menores que el estándar PAAS, con un enriquecimiento de las tierras raras medias (Sm, Eu, Gd) en relación tanto con las tierras raras ligeras como con las pesadas (Fig. 7). Los patrones son similares en la mayoría de las muestras analizadas, si bien se observa un empobrecimiento notable de tierras raras pesadas en la muestra T-8.

Discusión

Edad de la unidad Arenas de Trigueros

Los dos estudios reseñados anteriormente en la introducción, basados en el estudio de los foraminíferos planctónicos (Sierro et al., 1996) o en la conjunción de eventos de estos microorganismos con el análisis magnetoestratigráfico de diversas secciones del suroeste de España (Salazar et al., 2016), asignan una edad Messiniense a la UAT, con una edad variable entre los 6,2 Ma y 5,4 Ma. La mayoría de las especies determinadas en este trabajo presentan un amplio rango bioestratigráfico, si bien los diversos grupos presentes permiten efectuar una aproxima-

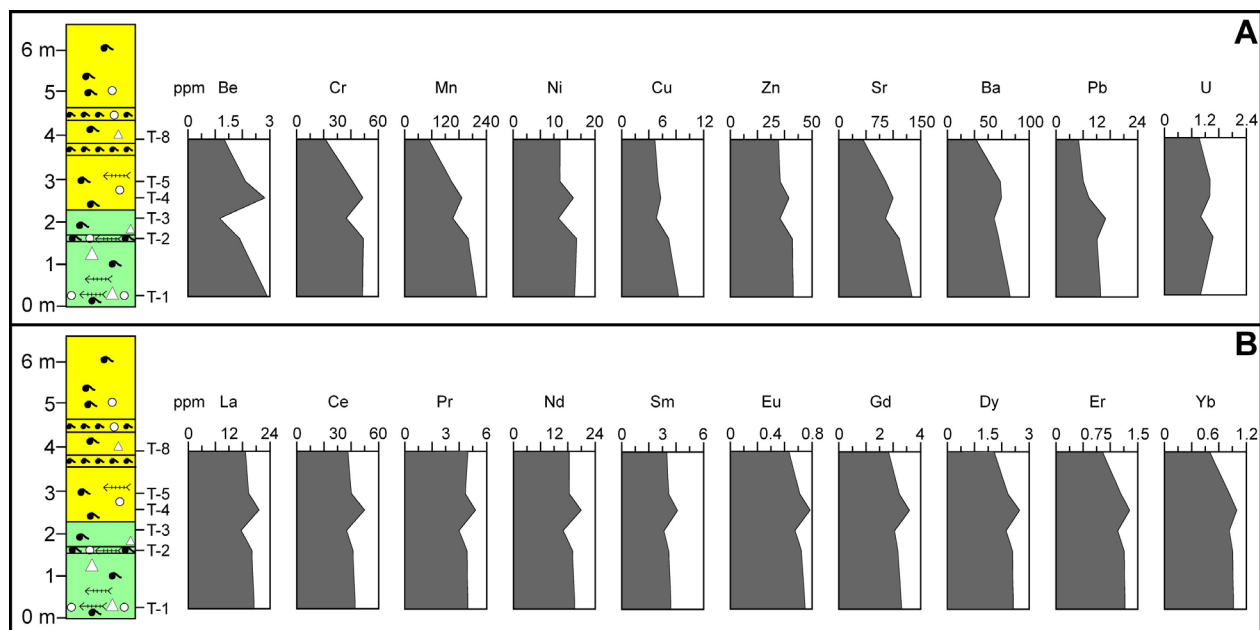


Figura 6.— Evolución geoquímica vertical de la sección “Cuatro Caminos”. A. Elementos traza. B. Tierras raras. Valores en ppm.

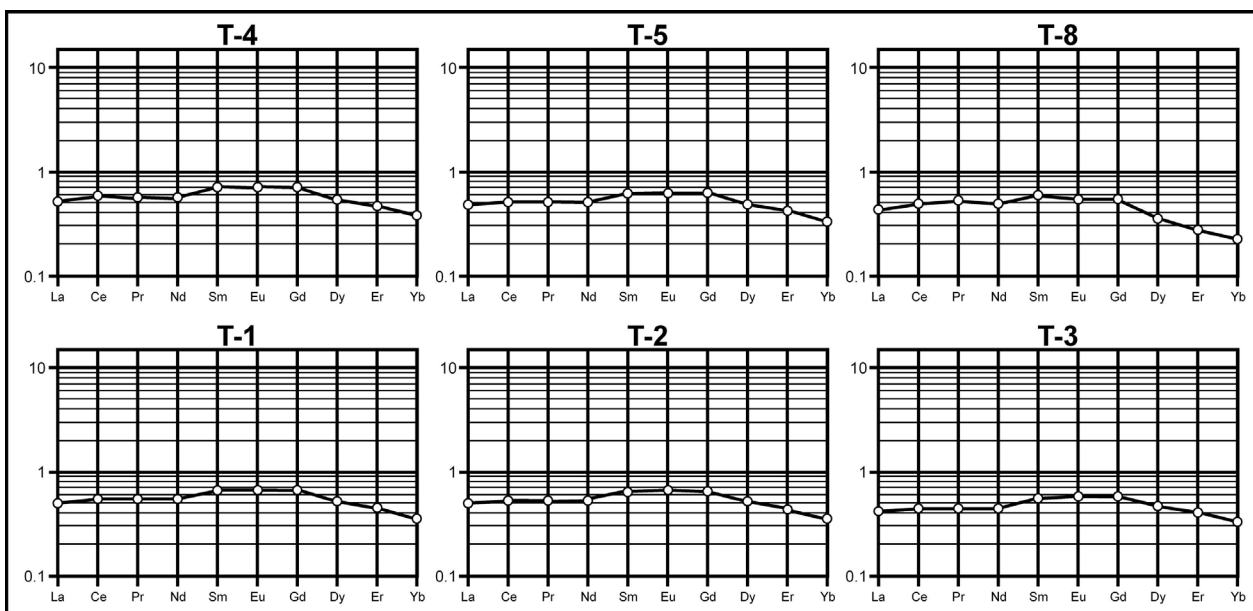


Figura 7.— Diagramas normalizados de tierras raras según el estándar PAAS.

ción general adicional a las mencionadas a la edad de esta unidad.

Los bivalvos *Oppenheimpecten revolutus* y *Cristatopecten cristatum* se han citado en yacimientos tortonienses a pliocenos de España y Portugal (Veiga Ferreira, 1961; Civis et al., 1987; Rico-García et al., 2006; Abad et al., 2011; Cárdenas et al., 2017). Entre los condictios, *Cosmopolitodus hastalis* es una especie fósil muy frecuente en sedimentos miocenos a escala global, si bien también se ha hallado hasta el Plioceno medio (García, 2008; Collareta et al., 2017). Una distribución aún más amplia (Mioceno medio-Pleistoceno; 17-2 Ma) ha sido indicada para *Carcharocles megalodon* (revisión en Reolid & Molina, 2015).

En relación a los ostrácodos, una asociación muy similar a la aquí reseñada [p.e. *Aurila* gr. *A. semilunata*, *Cytheretta* spp., *Paracypris polita* (Sars, 1866), *Ruggieria tetraptera tetraptera*] ha permitido reconocer depósitos messinienses en el sur de Portugal (Antunes et al., 1981). No obstante, la mayoría de las especies de ostrácodos también se encuentran en depósitos tortonienses de la Depresión del Guadalquivir (Abad et al., 2005). En consecuencia y de forma general, la distribución bioestratigráfica de las especies presentes permite inferir una edad Tortoniense-Messiniense para la sección “Cuatro Cami-

nos”, más amplia que las aportadas en otros estudios previos.

La Unidad Arenas de Trigueros: Caracteres distintivos

Esta unidad arenosa presenta caracteres texturales claramente distintivos de la potente sucesión de limos arcillosos gris-azulados, muy compactos y con una fractura concoidea típica, que componen la mayor parte de la FAG (Civis et al., 1987). El análisis textural de la sección tipo de esta formación (Fig. 1, A: Gibralfaró) o de testigos que abarcan su tramo medio y superior (Fig. 1, A: Huelva, Palos de la Frontera) revela un predominio muy acusado de limos arcillosos (limos: 50-75%; arcillas <15%) sobre las arenas, que no suelen alcanzar el 25% (Abad et al., 2007; Arroyo et al., 2021; Abad et al., 2022; Romero et al., en prensa). Esta distribución contrasta con los similares porcentajes de ambos o mayores porcentajes de arenas observados en la UAT (Fig. 2).

En sedimentos tortonienses de España e Italia, la presencia conjunta de *Oppenheimpecten revolutus* y *Cristatopecten cristatum* ha sido observada en medios circalitorales distales (80-100 m de profundidad) e incluso batiales superiores. Estos medios se

Tabla 2. Geoquímica de la FAG. Datos procedentes de Abad (2008), González de Canales (2017), Prudencio et al. (2022), Arroyo (com. pers.) y este trabajo.

ELEMENTO	Be	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Sr	Ba	Pb	U
Limos arcilloso-arenosos inferiores (¿Tortonense-Messiniense?)-Gibraleón-	Sin datos	58	Sin datos	< 20	Sin datos	< 50	< 0,05%	360	Sin datos	2,5
Unidad Arenas de Trigueros-Trigueros-	1,12-2,91	20,7-48,4	73-212	10,5-15,2	4,82-8,12	29-38,7	42,4-132	50,8-73,8	6,74-14,7	1,02-1,31
Limos arcilloso-arenosos superiores (Messiniense)-Palos de la Frontera-	1,13-1,83	53-55	201-272	16,2-32,6	8,5-21,4	35-58	187,3-293,3	232-259	10,9-17,9	2-3,2
Limos arcilloso-arenosos superiores (Messiniense)-Huelva-	Sin datos	72	Sin datos	< 20	Sin datos	< 50	< 0,05%	150	Sin datos	2,5
ELEMENTO	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb
Limos arcilloso-arenosos inferiores (¿Tortonense-Messiniense?)-Gibraleón-	30	61	Sin datos	24	4,9	1	Sin datos	Sin datos	Sin datos	2,9
Unidad Arenas de Trigueros-Trigueros-	15,9-20,6	36,3-48,2	4,03-5,16	15,2-19,6	3,06-4,01	0,634-0,783	2,74-3,4	2,23-2,62	1,16-1,32	0,659-1,05
Limos arcilloso-arenosos superiores (Messiniense)-Palos de la Frontera-	22,3-30,2	46,22-61,22	5,71-7,5	20,7-27,3	3,84-5,01	0,79-1,07	3,25-4,28	2,49-3,46	1,48-2,08	1,28-1,73
Limos arcilloso-arenosos superiores (Messiniense)-Huelva-	27,1	52	Sin datos	25	4,4	0,7	Sin datos	Sin datos	Sin datos	2,3

caracterizaron por un bajo gradiente energético (Rico-García et al., 2006; Bisconti et al., 2022).

Las especies de ostrácodos de la UAT son distintivas en relación con el resto de la FAG, y especialmente en su tramo superior más arenoso. Diversas investigaciones se han centrado en la distribución de estos microorganismos en secciones del tramo inferior de la FAG (Fig. 1, A: Cartaya, Gibraleón, Huelva; Tortonense superior-Messiniense inferior-medio), que han proporcionado una asociación típica de medios batiales o de plataforma externa próxima al talud continental, compuesta por diversas especies de los géneros *Krithe*, *Parakrithe*, *Henryhowella*, *Cytherella*, *Bairdia* y *Bairdoppilatta* (González-Regalado & Ruiz, 1990; Romero et al., 2021; Romero et al., en prensa).

El tránsito a los limos arenosos basales de la UAT supuso la desaparición temporal de la mayoría de estas especies, o incluso la ausencia de ostrácodos (Tabla 1: T-2). Las diferencias de la ostracofauna de la UAT con los tramos inferiores de la FAG son aún más evidentes en las arenas limosas superiores de esta unidad, donde se han extraído especies típicas de medios neríticos pliocenos a actuales relativamente someros (< 40 m de profundidad), como *Aurila longa*, *Aurila semilunata*, *Celtia quadridentata* (Baird, 1850), *Pontocythere elongata*, *Cytheretta adriatica* ó *Urocythereis pseudoseminulum* (Nascimento,

1988; Ruiz et al., 1997; Abad et al., 2005; Faranza et al., 2007, 2008). En la parte superior de la FAG, vuelven a aparecer las formas neríticas profundas a epibatiales (González-Regalado & Ruiz, 1991), para dar paso a medios infralitorales-circalitorales pliocenos donde se depositaría la Formación Arenas de Huelva (Civis et al., 1987).

Una comparativa entre el contenido en elementos traza y tierras raras de esta unidad y diversos estudios realizados en diferentes secciones superficiales y testigos que incluyen a sedimentos de la FAG permite establecer sus singularidades geoquímicas (Tabla 2). La UAT presenta menores concentraciones medias de la mayoría de los elementos traza que el resto de esta formación, con valores significativamente más bajos de Ba (UAT: 50,8-73,8 ppm; FAG: 150-360 ppm), Sr (UAT: 42,4-132 ppm; FAG: 187,3-293,3 ppm) y U (UAT: 1,02-1,31 ppm; FAG: 2-3,2 ppm) (González de Canales, 2017; Arroyo et al., 2021; Arroyo, com. pers.).

Algo similar puede apreciarse en las tierras raras (Tabla 2), cuyos valores suelen ser inferiores a la mayoría de las medidas indicadas en otras investigaciones de esta formación (Abad, 2007; González de Canales, 2017; Prudencio et al., 2022). El mayor tamaño de grano de la UAT explicaría esta disminución, ya que estos elementos tienden a concentrarse en los sedimentos más finos de los fondos ma-

rios actuales (Prego et al., 2012; Ge et al., 2020; Wu et al., 2020). Por otro lado, el enriquecimiento relativo de tierras raras medias es común en los sedimentos fluviales actuales y holocenos de esta región (López-González et al., 2005, Prudencio et al., 2022), lo que podría avalar la presencia de una componente fluvial importante en la dinámica sedimentaria que dio lugar al depósito de la UAT, ya indicada por otros autores (Toscano et al., 2013).

Reconstrucción paleoambiental de la UAT

Estudios previos relacionan la presencia de la UAT con turbiditas depositadas en un medio de plataforma externa en un contexto regresivo, con una bajada temporal del nivel del mar (Sierro et al., 1996; Salazar et al., 2016). Los caracteres más distintivos de la UAT (p.e. textura, malacofauna, niveles bioclásticos, ostracofauna) corroboran esta interpretación previa, con el transporte puntual de sedimentos más groseros y faunas procedentes de las zonas más someras del estrecho Norbético, desde el margen meridional del Macizo Ibérico hacia medios neríticos circalitorales más profundos, dentro de zonas distales de aparatos deltaicos (Fig. 8).

Las secuencias observadas definirían cambios importantes en la dinámica de esta zona nerítica externa. Los niveles bioclásticos corresponderían a aportes tempestíticos que erosionarían el fondo marino y darían lugar a las acumulaciones señaladas de bivalvos epibentónicos, en tanto que los interniveles bioturbados se depositarían durante periodos de mayor calma, con la colonización del sedimento por organismos endobentónicos profundos. Esta disposición e interpretación coinciden con las propuestas para alternancias similares en sedimentos miocenos

y pliocenos de España (p.e., González-Delgado et al., 1985).

A nivel regional, la UAT se depositó durante el Messiniense medio-superior en el margen pasivo septentrional de la cuenca del Guadalquivir, sometido sólo a flexión durante el Neógeno. Durante este periodo, esta zona estaba ocupada por una amplia bahía que se extendía principalmente por las actuales provincias de Huelva, Sevilla, Córdoba, Cádiz y Málaga, de acuerdo con las edades propuestas para el cierre del estrecho Norbético (Valenzuela, 1982; Martín et al., 2001). La UAT se enmarcaría dentro de la secuencia de depósito C de Sierro et al. (1996), depositada entre 6.3 Ma y 5.5 Ma durante el ciclo global eustático 3.3 de Haq et al. (1987, 1988). Estos autores estiman una bajada del nivel del mar próxima a 50 m durante este periodo.

Conclusiones

El análisis geológico multidisciplinar de una sección de la Unidad Arenas de Trigueros ha permitido precisar sus características distintivas en comparación con el resto de la Formación Arcillas de Gibrleón a la que pertenece. Esta unidad se distingue por sus altos porcentajes en arenas finas y muy finas, acompañadas frecuentemente por numerosos bioclastos de bivalvos, así como por la presencia de niveles tempestíticos que atestiguan la acción erosiva puntual de tormentas sobre un medio circalitoral de baja energía. El registro de ostrácodos evidencia el carácter turbidítico de esta unidad, con el transporte de especies neríticas someras hacia las zonas distales de aparatos deltaicos messinienses. Otro carácter distintivo es el menor contenido en elementos traza y tierras raras en relación con el resto de la Formación

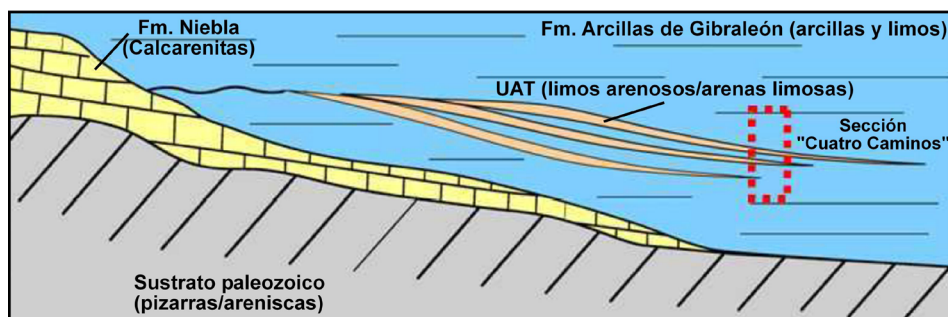


Figura 8.— Esquema geológico sintético con la posición de la Unidad Arenas de Trigueros (UAT) dentro de la Formación Arcillas de Gibrleón.

Arcillas de Gibrleón, debido al aumento de tamaño de grano propiciado por este transporte de sedimentos desde zonas más someras de la amplia bahía que conformaba esta zona durante el Messiniense medio-superior.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER y la Junta de Andalucía, mediante los siguientes proyectos: i) Proyecto UHU-202052; y ii) Grupo P.A.I.D.I. RNM-238 (Paleontología y Ecología Aplicadas. Es una contribución al Centro de Investigación en Patrimonio Histórico, Cultural y Natural (CIPHCHN) de la Universidad de Huelva.

Referencias

- Abad, M., Ruiz, F., Pendón, J. G., González-Regalado, M. L. & Tosquella, J. (2005). Tortonian ostracodes of Southwestern Europe. *Geobios*, 38, 563-573. <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2003.12.006>
- Abad, M. (2007). La transgresión tortoniense en el margen pasivo de la cuenca del Guadalquivir: respuesta estratigráfica e implicaciones paleontológicas [Unpublished Doctoral thesis]. Universidad de Huelva.
- Abad, M., Toscano, A., García, E. X., González-Regalado, M. L., Ruiz, F., Civis, J., González-Delgado, J. A., Jiménez, E., Tosquella, J., Álvarez, G., Velo, D. & Molín, M. (2011). The palaeontological record of a condensed section (Sands of Huelva, Lower Pliocene, SW Spain). In F. J. Sierro & J. A. González-Delgado (Eds.), *Joint RCMNS-RCANS Interim Colloquium "Climate change, bioevents and geochronology in the Atlantic and Mediterranean over the last 23 Myr, Abstracts Book* (pp. 52-53). Universidad de Salamanca.
- Abad, M., Arroyo, M., Ruiz, F., González-Regalado, M. L., Rodríguez Vidal, J., Cáceres, L. M., Izquierdo, T., Toscano, A., Gómez, P., Gómez, G. & Romero, V. (2022). Miocene-Holocene paleoenvironmental changes in the Tinto River estuary (SWSpain) evidenced by sedimentology, geochemistry and fauna. *Carnets de Geologie*, 22, 825-845. <https://doi.org/10.2110/carnets.2022.2219>
- Aiello, G., Barra, D. & Bonaduce, G. (1996). The genus *Cytherella* Jones, 1849 (Ostracoda) in the Italian Tortonian-Recent. *Revue de Micropaléontologie*, 39, 171-190. [https://doi.org/10.1016/S0035-1598\(96\)90051-3](https://doi.org/10.1016/S0035-1598(96)90051-3)
- Andrés, I. (1982). Estudio Malacológico (Clase Bivalvia) del Plioceno Marino de Bonares (Huelva) [Unpublished Doctoral thesis]. Universidad de Salamanca.
- Antunes, M. T., Bizon, G., Nascimento, A. & Pais, J. (1981). Nouvelles données sur la datation des dépôts miocènes de l'Algarve (Portugal), et l'évolution géologique regionale. *Ciências da Terra*, 6, 153-168.
- Arroyo, M., Ruiz, F., Campos, J. M., Bermejo, J., González-Regalado, M. L., Rodríguez Vidal, J., Cáceres, L. M., Olías, M., Abad, M., Izquierdo, T., Gómez, P., Toscano, A., Romero, V. & Gómez, G. (2021). Where did Christopher Columbus start?: The estuarine scenario of a historical date. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 250, 107162. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107162>
- Baceta, J. I. & Pendón, J. G. (1999). Estratigrafía y arquitectura de facies de la Formación "Niebla", Neógeno Superior, sector occidental de la Cuenca del Guadalquivir. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 12, 419-438.
- Bisconti, M., Raineri, G., Tartarelli, G., Monegatti, P. & Carnevale, G. (2022). The periotic of a basal balaenopterid from the Tortonian of the Stirone River, northern Italy (Cetacea, Mysticeti, Balaeopteridae). *Palaeodiversity and Palaeoenvironments*. <https://doi.org/10.1007/s12549-022-00550-2>
- Bonaduce, G., Barra, D. & Aiello, G. (1996). The genus *Henryhowella* Puri, 1957 (Crustacea, Ostracoda) in the Atlantic and Mediterranean from Miocene to Recent. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 38, 59-72.
- Brito, P., Cacador, I., Prego, R., Mil-Homens, M. & Caetano, M. (2016). Distribution of rare earth elements in estuarine sediments from the Tagus Estuary (Portugal): Evidence of anthropogenic contamination. In C. Valle & 32 autores (Eds), *XVIII Seminario Ibérico de Química Marina* (pp. 28-29). Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/59212>
- Cáceres, L. M. (1995). Geomorfología del sector occidental de la depresión del Guadalquivir [Doctoral thesis]. Universidad de Huelva. <http://hdl.handle.net/10261/93584>
- Cárdenas, J., Bajo, I. & Maestre, M. V. (2017). Estudio paleontológico de los bivalvos (Mollusca) del Tortoniano superior de Arroyo Trujillo, Cantillana (Sevilla). *Spanish Journal of Palaeontology*, 32, 367-386. <https://doi.org/10.7203/sjp.32.2.17049>
- Civis, J., Sierro, F. J., González-Delgado, J. A., Flores, J. A., Andrés, I., Porta, J. & Valle, M. F. (1987). El Neógeno marino de la Provincia de Huelva: Antecedentes y definición de sus unidades litoestratigráficas In J. Civis (Ed.), *Paleontología del Neógeno de Huelva* (W Cuenca del Guadalquivir) (pp. 5-16). Universidad de Salamanca.
- Collareta, A., Landini, W., Chacaltana, C., Valdivia, W., Altamirano-Sierra, A., Urbina-Schmitt, M. &

- Bianucci, G. (2017). A well preserved skeleton of the fossil shark *Cosmopolitodus hastalis* from the late Miocene of Peru, featuring fish remains as fossilized stomach contents. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 123, 11-22. <https://doi.org/10.13130/2039-4942/8005>
- Faranza, C., Gliozzi, E. & Mazzini, I. (2007). Palaeoenvironmental evolution of the Plio-Pleistocene Monte Mario succession (Rome, Italy) inferred from ostracod assemblages. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 113, 473-485.
- Faranza, C., Cipollari, P., Cosentino, D., Gliozzi, E. & Pipponzi, G. (2008). Late Miocene ostracod assemblages from eastern Mediterranean coral reef complexes (central Creta, Greece). *Revue de Micropaléontologie*, 51, 287-308. <https://doi.org/10.1016/j.revmic.2007.06.002>
- García, E. X. M. (2008). *Condictios y Osteictios del Neógeno de Huelva (Formación "Arenas de Huelva")* [Unpublished Doctoral thesis]. Universidad de Salamanca.
- Ge, Q., Xue, Z. G. & Chu, F. (2020). Rare Earth Element Distributions in Continental Shelf Sediment, Northern South China Sea. *Water*, 12, 3540. <https://doi.org/10.3390/w12123540>
- González-Delgado, J. A., Andrés, I. & Sierro, F. J. (1995). Late Neogene molluscan faunas from the Northeast Atlantic (Portugal, Spain, Morocco). *Geobios*, 28, 459-471. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(95\)80021-2](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(95)80021-2)
- González-Regalado, M. L. & Ruiz, F. (1990). Los ostrácodos del tramo inferior de la Formación "Arcillas de Gibraleón" (Gibraleón, provincia de Huelva, S.W. España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3, 23-31.
- González-Regalado, M. L., Ruiz, F., Abad, M., Civis, J., González Delgado, J. A., Muñoz, J. M., Pendón, J. G. & Toscano, A. (2009). Impact of storms on Pliocene benthic foraminiferal assemblages of southwestern Spain. *Ameghiniana*, 46, 345-360. <https://www.ameghiniana.org.ar/index.php/ameghiniana/article/view/110>
- González de Canales, F. (2017). Producción de cerámicas griegas arcaicas en Huelva. *Archivo Español de Arqueología*, 90, 125-145. <https://doi.org/10.3989/aespa.090.017.006>
- Haq, B. U., Harderbol, J. & Vail, P. R. (1987). Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235, 1156-1167. <https://doi.org/10.1126/science.235.4793.1156>
- Krijgsman, W., Hilgen, F. J., Raffi, I., Sierro, F. J. & Wilson, D. S. (1999). Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 400, 652-655. <https://doi.org/10.1038/23231>
- Haq, B. U., Harderbol, J. & Vail, P. R. (1988). Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Eustatic Cycles. In C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. S. Kendall, H. Posamentier, C. A. Ross & J. C. Wagoner, Eds.), *Sea-level changes. An integrated approach*. SEPM Special Publication, 42, 71-108. <https://doi.org/10.2110/pec.88.01.0071>
- López-Martínez, N., Borrego, J., Carro, B. & Lozano-Soria, O. (2005). Estudio de las concentraciones de REE y patrones de fraccionamiento en sedimentos superficiales del estuario de los ríos Tinto y Odiel (SO de España). *Geogaceta*, 37, 231-234.
- Lozano Francisco, M. C. (1997). *Los Bivalvos del Plioceno de la Provincia de Málaga* [Doctoral thesis]. Universidad de Málaga. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/2558>
- Martín, J. M., Braga, J. C. & Betzler, C. (2001). The Messinian Guadalhorce corridor: the last northern, Atlantic-Mediterranean Gateway. *Terra Nova*, 13, 418-424. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00376.x>
- Martín, J. M., Braga, J. C., Aguirre, J. & Puga-Bernabéu, A. (2009). History and evolution of the North-Betic Strait (Prebetic Zone, Betic Cordillera): A narrow, early Tortonian, tidal-dominated, Atlantic-Mediterranean marine passage. *Sedimentary Geology*, 216, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.01.005>
- McLennan, S. M. (1989). Rare earth elements in sedimentary rock: influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21, 169-200. <https://doi.org/10.1515/9781501509032-010>
- Nance, W. B. & Taylor, S. R. (1976). Rare earth element patterns and crustal evolution-I. Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 40, 1539-1551. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(76\)90093-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90093-4)
- Nascimento, A. (1988). *Ostracodos do Miocénico da Bacia do Tejo. Sistemática, biostratigrafia, paleoecologia, paleogeografia e relações Mediterrâneo Atlântico* [Unpublished Doctoral thesis]. Universidad Nueva de Lisboa.
- Prudencio, M. I., Ruiz, F., Marques, R., Dias, M. I., Rodríguez Vidal, J., Rodrigues, A. L., Cáceres, L. M., González-Regalado, M. L., Muñoz, J. M., Pozo, M., Gómez, P., Toscano, A., Abad, M., Izquierdo, T., Arroyo, M., Romero, V. & Gómez, G. (2022). REE Geochemistry of Neogene-Holocene Sediments of La Fontanilla Cove (Tinto Estuary, SW Spain). *Minerals*, 12, 417. <https://doi.org/10.3390/min12040417>
- Rao, V. P. & Chakraborty, P. (2016). *Estuarine and Marine Geology (2011-2015)*. Proceedings of the Indian

- Natural Science Academy, 82, 625-637. <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2016/48472>
- Reolid, M. & Molina, J. M. (2015). Record of Carcharocles megalodon in the Eastern Guadalquivir Basin (Upper Miocene, South Spain). *Estudios Geológicos*, 71, e032. <https://doi.org/10.3989/egeol.41828.342>
- Rico-García, A., Cárdenas-Carretero, J., González-Delgado, J. A. & Civis, J. (2006). Estudio paleontológico preliminar del Tortonense superior de "Las Pajanosas" (Sevilla, Cuenca del Guadalquivir). *Geogaceta*, 39, 143-146.
- Romero, V., Ruiz, F., González-Regalado, M. L., Tosquella, J., Abad, M., Izquierdo, T., Toscano, A. & Gómez, P. (2021). Messinian ostracodes from the western Betic Strait (SW Spain). *Carnets de Geologie*, 21, 181-192. <https://doi.org/10.2110/carnets.2021.2108>
- Romero, V., González-Regalado, M. L. & Ruiz, F. (en prensa). Ostrácodos messinienses del sector occidental del estrecho norbético. *Geogaceta*.
- Ruiz, F., González-Regalado, M. L. & Muñoz, J. M. (1997). Multivariate analysis applied to total and living fauna: seasonal ecology of recent benthic Ostracoda off the North Cádiz Gulf coast (southwestern Spain). *Marine Micropaleontology*, 31, 183-203. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(96\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(96)00060-6)
- Salazar, A., Larrasoña, J. C., Abad, M., Mayoral, E., Pérez-Asensio, J. N., González-Regalado, M. L., Martín-Banda, R., Civis, J. & Matas, M. P. (2016). Neogene lithological units at the west end of the Guadalquivir Basin and their correlations with the Huelva-1 borehole (Huelva - Spain). *Geotemas*, 16, 173-176.
- Sierro, F. J., González-Delgado, J. A., Dabrio, C. J., Flores, J. A. & Civis, J. (1996). Late Neogene depositional sequences in the foreland basin of Guadalquivir (SW Spain). In P. F. Priend & C. J. Dabrio (Eds.), *Tertiary Basins of Spain* (pp. 339-345). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524851.048>
- Toscano, A. (2016). Vertebrados marinos del Neógeno del suroeste de la Península Ibérica [Doctoral thesis]. Universidad de Huelva. <http://hdl.handle.net/10272/12521>
- Toscano, A., Abad, M., Clemente-Pérez, M. J., Ruiz, F., González-Delgado, J. A., Civis, J., Tosquella, J. & González-Regalado, M. L. (2013). Nuevos datos sobre la unidad Arenas de Trigueros (Messiniense, SO de España). In M. Abad, T. Izquierdo & F. Ruiz, (Eds.), *Atlantic Neogene - Two Decades of Study* (pp. 23). IGME-Universidad de Huelva.
- Valenzuela, J. M. (1982). Paleogeografía de la depresión del Guadalquivir durante el Neógeno. *Boletín Geológico y Minero*, 93, 26-32.
- Veiga Ferreira, O. da (1961). Pectinídeos do Miocénico da Bacia do Tejo. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 45, 419-465.
- Wu, K., Liu, S., Shi, X., Lou, Z., Kandasamy, S., Wu, B., Wang, K., Cao, P., Zhang, H. & Mohamed, C. A. R. (2020). Distribution of rare earth elements in surface sediments of the western Sunda Shelf: Constraints from sedimentology and mineralogy. *Continental Shelf Research*, 206, 104198. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104198>