

# REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Volumen 33 Número 2, Diciembre 2020

ISSN 0214-2708

**Editores Principales**

Nieves López González, Instituto Español de Oceanografía - Málaga

Beatriz Bárdenas Lago, Universidad de Zaragoza



# Revista de la SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Revista semestral editada por la Sociedad Geológica de España

<http://www.sociedadgeologica.org>

ISSN: 0214-2708 (versión impresa)

ISSN: 2255-1379 (Internet)

Depósito legal: S.421-2012

Es una revista que recoge los artículos originales e inéditos enviados para su publicación a la Sociedad Geológica de España y seleccionados por los Editores, con el asesoramiento del Comité Científico y especialistas anónimos. También se recogen las réplicas realizadas después de la publicación de un artículo. La Sociedad Geológica de España no se hace responsable de las opiniones vertidas por los autores de los artículos firmados. La propiedad intelectual atribuye al autor la plena disposición y explotación de la obra creada, de acuerdo con las leyes vigentes. La Revista no puede ser reproducida, almacenada o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio sin la autorización previa y escrita de la Sociedad Geológica de España. Su reproducción para fines docentes, de investigación o uso personal no requiere autorización previa.

## EDITORA PRINCIPAL / EDITOR-IN-CHIEF

**Nieves López González**

Instituto Español de Oceanografía

Centro Oceanográfico de Málaga

Puerto pesquero s/n, 29640 Fuengirola, Málaga (España)

Tel: +34 952 197 124; e-mail: [nieves.lopez@ieo.es](mailto:nieves.lopez@ieo.es)

## EDITORES ADJUNTOS / ASSOCIATE EDITORS

**Alberto Pérez López**

Departamento de Estratigrafía y Paleontología

Facultad de Ciencias, Universidad de Granada

Campus Fuentenueva, 18002 Granada (España)

Tel: +34 958 243 334; e-mail: [aperezl@ugr.es](mailto:aperezl@ugr.es)

**Aitor Cambeses Torres**

Departamento de Mineralogía y Petrología

Facultad de Ciencias, Universidad de Granada

Campus Fuentenueva, 18002 Granada (España)

Tel: +34 958 246 611; e-mail: [aitorc@ugr.es](mailto:aitorc@ugr.es)

**Sonia García de Madinabeitia**

Departamento de Mineralogía y Petrología

Facultad de Ciencia y Tecnología, Campus de Bizkaia

Barrio de Sarriena s/n, 48940 Leioa, Bizkaia (España)

Tel: +34 946 015 455; e-mail: [sonia.gdm@ehu.es](mailto:sonia.gdm@ehu.es)

## SEDE EDITORIAL / EDITORIAL OFFICE

**Sociedad Geológica de España:**

Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca,

Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca, España.

<http://www.sociedadgeologica.org>

## COMITÉ CIENTÍFICO / SCIENTIFIC COMMITTEE

Pedro Alfaro García, Universidad de Alicante (España)

Luca Basilone, Università degli studi di Palermo (Italia)

José Brilha, Universidade do Minho (Portugal)

María Luisa Calvache Quesada, Universidad de Granada (España)

Julia Cuevas Urionabarrenechea, Universidad del País Vasco (España)

Graciela Delvene Ibarrola, Instituto Geológico y Minero de España (España)

Laura Domingo Martínez, Instituto de Geociencias (CSIC) y Universidad

Complutense de Madrid (España)

Luis Vitor Duarte, Universidade de Coimbra (Portugal)

Mercedes Ferrer Gijón, Instituto Geológico y Minero de España (España)

Andrés Folguera, Universidad de Buenos Aires (Argentina)

David Gómez Gras, Universidad Autónoma de Barcelona (España)

Fco. Javier Hernández Molina, Royal Holloway, University of London (UK)

María José Huertas Coronel, Universidad Complutense de Madrid (España)

Stephen Johnston, University of Alberta (Canadá)

José Miguel Molina Cámara, Universidad de Jaén (España)

Brendan Murphy, St. Francis Xavier University (Canadá)

Belén Oliva Urcia, Universidad Autónoma de Madrid (España)

José Antonio Ortega Becerril, Universidad Autónoma de Madrid (España)

M. Francisco Pereira, Universidade de Évora (Portugal)

Alberto Pérez-López, Universidad de Granada (España)

Sila Pla Pueyo, Universidad de Granada (España)

Jorge Rabassa, Centro Austral de Investigaciones Científicas (Argentina)

Teresa Román Berdiel, Universidad de Zaragoza (España)

Teresa Sánchez García, Instituto Geológico y Minero de España (España)

Francisco Serrano Lozano, Universidad de Málaga (España)

Pablo G. Silva Barroso, Universidad de Salamanca (España)

Juana Vegas Salamanca, Instituto Geológico y Minero de España (España)

César Viseras Alarcón, Universidad de Granada (España)

Eduardo Zappettini, Servicio Geológico Minero de Argentina (Argentina)

V. Paul Wright, National Museum of Wales (UK)

### Imagen de portada:

Buntsandstein desde ventana azul (Tizi'n'Test, Alto Atlas, Marruecos)

Foto cedida por: Antonio Casas Sainz

# REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA



Vol. 33 (2) (2020)





# PALEOHISTOLOGÍA Y PERMINERALIZACIÓN DE DOS SAURÓPODOS DEL CICLO JURÁSICO EN LA SUBCUENCA DE GALVE (TERUEL, ESPAÑA)

*Paleohistology and permineralization of two sauropods of the Jurassic cycle in the Galve subbasin (Teruel, Spain)*

Celia Jurado<sup>1</sup>, Blanca Bauluz<sup>1</sup>, Diego Castanera<sup>2</sup> y José Ignacio Canudo<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Aragosaurus: Recursos geológicos y paleoambientes, IUCA, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España. celia.jbello@gmail.com*

<sup>2</sup> *Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont, Universitat Autònoma de Barcelona, c/ Escola Industrial 23, 08201 Sabadell, Barcelona, España*

<sup>3</sup> *Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de Zaragoza, Plaza Basilio Paraiso, 50004 Zaragoza, España*

**Abstract:** *In this work a paleohistological approach to two sauropod dinosaurs, Galvesaurus herreroi Barco et al., 2005 and an undescribed specimen have been performed. The former comes from the Cuesta Lonsal site in Galve (Teruel) and it is late Kimmeridgian in age whereas the latter have been found in La Peñuela site in Camarillas (Teruel) and it is Berriasian in age. The histological observations of the skeletal remains that were made from the thin sections in an optical microscope have allowed to determine the ontogenetic stage of the sauropods at the time of their death: Galvesaurus and the sauropod of La Peñuela were adult and senile specimens, respectively. A mineralogical study of the paleohistological samples has also been carried out, combining optical and field emission scanning microscopy (FESEM). In the study it is observed that the diagenetic processes are similar in the bone remains of the two specimens. The apatite of the bones has not been modified during diagenesis. The fillings in vascular channels and cavities are mainly calcite cements, detrital grains and oxides. The fact that the observed processes are similar in the two individuals is probably due to the lithological similarity and the geological history of the formations in which the specimens were collected.*

**Keywords:** *paleohistology, permineralization, Sauropoda, ontogeny, Teruel, Galve subbasin.*

**Resumen:** *En este trabajo se realiza una aproximación a la paleohistología de dos dinosaurios saurópodos, Galvesaurus herreroi Barco et al., 2005 y un saurópodo indeterminado. El primero procede del yacimiento Cuesta Lonsal de Galve (Teruel) de edad Kimmeridgiense superior mientras que el segundo se ha encontrado en el yacimiento La Peñuela en Camarillas (Teruel) cuya de edad es Berriasiense. Las observaciones histológicas realizadas a partir de láminas delgadas de los restos óseos en microscopio óptico, han permitido determinar el estadio ontogenético de los saurópodos en el momento de su muerte, tratándose en Galvesaurus y el saurópodo de La Peñuela de ejemplares adulto y senil, respectivamente. Así mismo, se ha realizado un estudio mineralógico de las muestras paleohistológicas combinando la microscopía óptica y electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). En el estudio se observa que los procesos diagenéticos son similares en los restos óseos de los dos ejemplares. El apatito que compone los huesos no ha sido modificado durante la diagénesis. Los rellenos en los canales y cavidades vasculares*

son mayoritariamente cementos calcíticos, granos detríticos y óxidos. El hecho de que los procesos observados sean similares en los distintos individuos se debe probablemente a la similitud litológica y de historia geológica de las formaciones en las que los ejemplares fueron encontrados.

**Palabras clave:** paleohistología, fosildiagénesis, Sauropoda, ontogenia, Teruel, subcuena de Galve.

Jurado, C., Bauluz, B., Castanera, D., Canudo, J.I., 2020. Paleohistología y permineralización de dos saurópodos del ciclo Jurásico en la subcuena de Galve (Teruel, España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33 (2): 3-16.

## Introducción

La paleohistología se ha revelado como una potente herramienta para estudiar diferentes aspectos paleobiológicos de los vertebrados extintos, en general, y de los dinosaurios en particular (Padian y Lamm, 2013, Bailleul *et al.*, 2019). Los estudios paleoecológicos resultan complejos en el caso de los organismos extintos debido a que la información proviene casi exclusivamente de restos óseos y, en muchos casos son fragmentarios. Por esta razón, la paleohistología es una metodología que aporta interesante y diferenciadora información paleobiológica al permitir realizar inferencias imposibles con solo la morfología de los huesos (Chinsamy-Turan, 2005). Información paleobiológica como el grado de desarrollo ontogenético, la velocidad de crecimiento, el sexo y la edad de los dinosaurios, así como los procesos fosildiagenéticos pueden reconstruirse a través del estudio de secciones delgadas de hueso (Bailleul *et al.*, 2019). Además, la paleohistología ha pasado a ser una técnica habitual en la descripción de nuevos taxones de dinosaurios, donde además de la morfología externa se describe la microanatomía obtenida en cortes histológicos (Chinsamy-Turan, 2005; Padian y Lamm, 2013). Un aspecto especialmente interesante son los significativos avances en la evaluación de la madurez de los dinosaurios (Griebeler *et al.*, 2013; Mitchell *et al.*, 2017; Perales-Gogenola *et al.*, 2019; Woodward, 2019). Estas publicaciones tratan de recuperar información de la vida del organismo conservada en microestructuras en su hueso, así como una propuesta de la edad de muerte del dinosaurio. En los últimos años se han desarrollado numerosos trabajos paleohistológicos que permiten inferir aspectos paleobiológicos en dinosaurios saurópodos (*e.g.*, Klein y Sander, 2008; Stein *et al.*, 2010; Mitchell y Sander, 2014; Mitchell *et al.*, 2017).

La biodiversidad de dinosaurios saurópodos es significativa en el intervalo del final del Jurásico y el comienzo del Cretácico (Kimmeridgiense-Berriasiense) en España. En particular en la Cordillera Ibérica, hasta el momento se han descrito varios saurópodos entre los que destacan *Aragosaurus* (Sanz *et al.*, 1987), *Losillasaurus* (Casanovas *et al.*, 2001), *Galvesaurus* (Barco *et al.*, 2005), y *Turiasaurus* (Royo-Torres *et al.*, 2006), además de los restos de otros taxones sin describir (Royo-Torres *et al.*, 2007; Aurell *et al.*, 2016). En España hay pocos trabajos paleohistológicos sobre dinosaurios, y generalmente realizados en niveles estratigráficos más modernos. Se puede citar la caracteri-

zación de la madurez de los ornitópodos del Barremiense de La Cantalera - 1 (Perales-Gogenola *et al.*, 2019), la descripción paleohistológica de los saurópodos titanosaurios del Campaniense superior-Maastrichtiense inferior de Valencia (Company, 2011) o la descripción de los hadrosaurios enanos del Maastrichtiense superior del Pirineo de Huesca (Company *et al.*, 2015).

El principal objetivo de este trabajo es realizar por primera vez una aproximación paleohistológica y a los procesos de permineralización de dos saurópodos de los yacimientos de Cuesta Lonsal y La Peñuela del final de la secuencia Jurásica de la Cordillera Ibérica. El saurópodo *Galvesaurus* del yacimiento de Cuesta Lonsal es uno de los saurópodos ibéricos del final del Jurásico con más interés debido a su incierta posición filogenética. Los restos de *Galvesaurus* son fragmentarios, pero tienen un gran interés al estar *Galvesaurus* posicionado en una zona del árbol filogenético de los saurópodos con pocos taxones, lo que provoca diferencias en cuanto a su posición filogenética. Royo-Torres *et al.* (2006) lo han considerado como miembro de Turiasauria, junto a *Losillasaurus* y *Turiasaurus*; sin embargo otros autores lo sitúan en la base de la radiación Macronaria a partir de sus vértebras cervicales (Barco *et al.*, 2006; Barco y Canudo, 2012). En los últimos años se han publicado propuestas filogenéticas con resultados similares (Carballido *et al.*, 2015), incluso recientemente Pérez-Pueyo *et al.* (2019) han podido precisar más esta posición a partir de material recuperado recientemente y aun sin describir, situando a *Galvesaurus* como braquiosáurido primitivo cercano a *Lusotitan*, un taxón descrito en el Kimmeridgiense-Titoniense de Portugal (Mannion *et al.*, 2013). Los fósiles de un saurópodo hallado en el yacimiento de La Peñuela (Aurell *et al.*, 2016) son los restos de un gran ejemplar sin identificar y pendiente de excavar, del que se han recuperado algunos fragmentos en la superficie del yacimiento.

El análisis paleohistológico permitirá evaluar la calidad de la fosilización de los huesos de los yacimientos de Cuesta Lonsal y La Peñuela para futuros estudios paleohistológicos, bien sobre otros restos de los yacimientos o bien estudios más detallados sobre los mismos taxones. Además, se plantea por primera vez, conocer la edad de muerte de estos saurópodos, así como la mineralogía y el proceso de permineralización sufrido por los huesos (*e.g.* recristalizaciones y cementaciones) durante la fosilización y diagénesis.

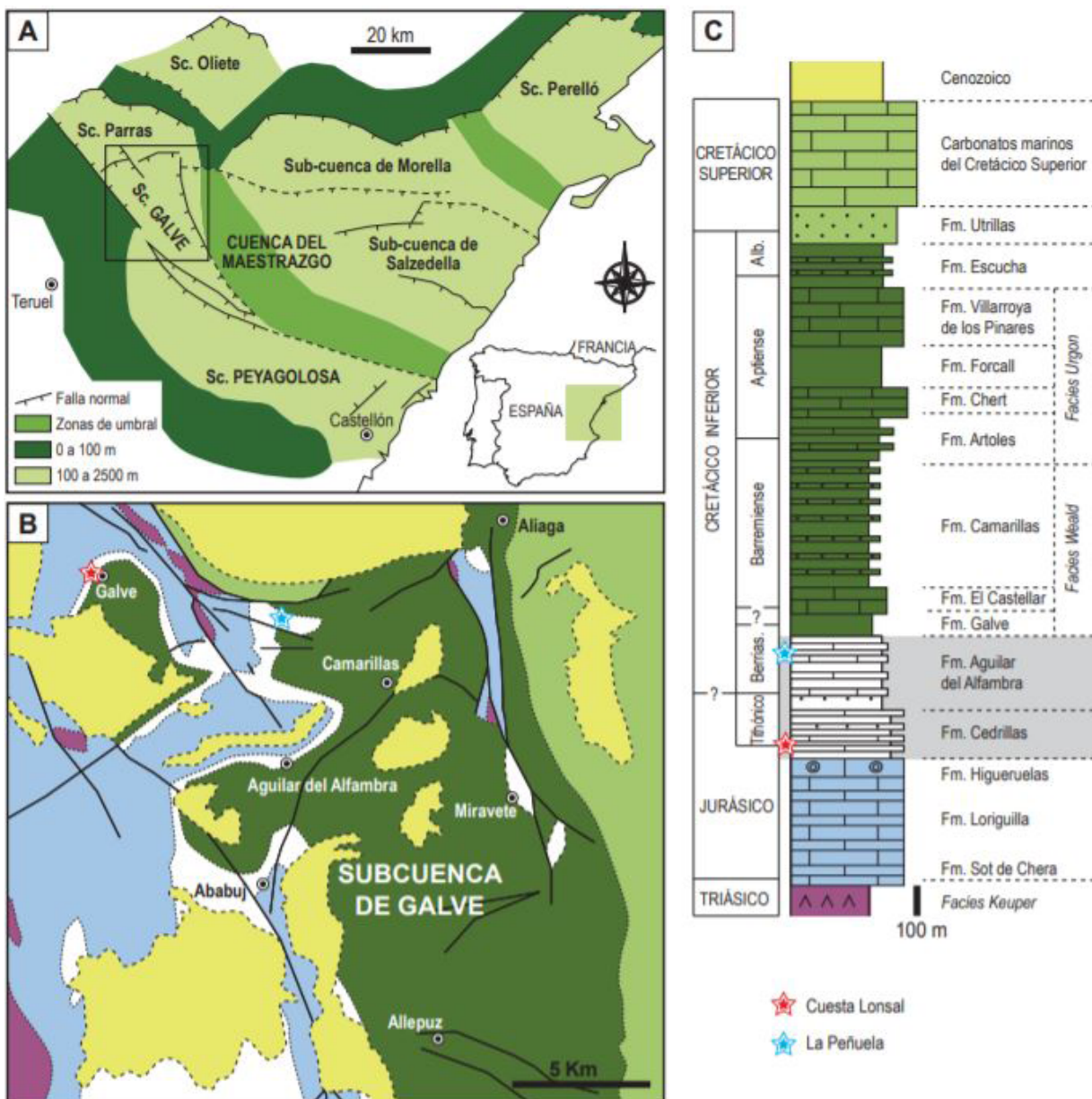
## Situación geográfica y geológica

El yacimiento de Cuesta Lonsal es la localidad tipo del holotipo de *Galvesaurus* (Barco *et al.*, 2005). Cuesta Lonsal se encuentra en el término municipal de Galve (provincia de Teruel, España), a unos 500 m al oeste del núcleo urbano (Fig. 1). Galve se encuentra, a unos 55 km al norte de la capital de la provincia. El yacimiento de La Peñuela se sitúa en el término municipal de Camarillas, a solo 10 km al este de Galve. Ambas localidades se localizan en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Geológicamente, los dos yacimientos se sitúan en la Cuenca del Maestrazgo conformada durante el Mesozoico. La zona oriental de Iberia estuvo sometida al final del Jurásico y al comienzo del Cretácico a una etapa extensional que dio lugar a la formación de varias cuencas y subcuencas cuyo desarrollo

estuvo controlado por la actividad de fallas normales de dirección variable formándose diferentes dominios sedimentarios (Salas *et al.*, 2001; Aurell *et al.*, 2016). La denominación de Cuenca del Maestrazgo se propuso para agrupar a todos los materiales del final del Jurásico y comienzo del Cretácico identificados en las diferentes subcuencas que aparecen en la zona de enlace entre la Cordillera Ibérica y la Cordillera Costero Catalana (Salas y Guimerá, 1996). Los yacimientos de Cuesta Lonsal y La Peñuela quedan dentro de la subcuenca de Galve, al oeste de la Cuenca del Maestrazgo (Fig. 1).

### Yacimiento de Cuesta Lonsal

El yacimiento se encuentra en una estructura tectónica de orientación N-S conocida en la literatura como el sin-



**Fig. 1.-** Situación geográfica y geológica de los yacimientos. A. Cuencas y subcuencas sedimentarias en el este de Iberia durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior. La subcuenca Galve está ubicada en el extremo occidental de la cuenca del Maestrazgo. B. Mapa geológico de la subcuenca de Galve en el que se indica la situación de los dos yacimientos estudiados en este trabajo. C. Serie estratigráfica sintética de la subcuenca de Galve. Modificadas de Aurell *et al.* (2016, 2019).

clinal de Galve que pliega materiales del Jurásico Superior y Cretácico Inferior. Estas unidades representan ambientes de sedimentación marina, transicional y continental de edad del Kimmeridgiense hasta el Aptiense inferior (Soria *et al.*, 1995; Aurell *et al.*, 2016). El yacimiento Cuesta Lonsal aparece en el flanco oeste del mencionado sinclinal, en concreto en la parte inferior de la Formación Cedrillas (Fig. 1). Tradicionalmente estos materiales se habían incluido como parte de la Formación Villar del Arzobispo (Mas *et al.*, 1984), con su localidad tipo en la Cuenca Suribérica (Valencia). La Cuenca Suribérica y la Cuenca del Maestrazgo tuvieron una evolución tectosedimentaria independiente y diferente durante la etapa de *rift* del Jurásico terminal e inicio del Cretácico (Salas *et al.*, 2001). Como resultado de esta distinta evolución aparecen diferencias estratigráficas, litológicas y estructurales significativas entre ambas cuencas, lo que han llevado a Aurell *et al.* (2019) a definir recientemente la Formación Cedrillas para este intervalo temporal en la Cuenca del Maestrazgo. La formación Cedrillas se sitúa estratigráficamente entre la Formación Higuieruelas de edad Kimmeridgiense superior y la Formación Aguilar del Alfambra de edad Titoniense inferior-Berriasiense inferior (Aurell *et al.*, 2019).

Litológicamente la Formación Cedrillas presenta una gran variedad de facies que varían de carbonatadas, mixtas y siliciclásticas y que se depositaron en una zona costera a marina somera en la que alternaron episodios de llanura costera fangosa asociada a un lagoon carbonatado, y otros con desarrollo de un delta dominado por el oleaje (Val *et al.*, 2019). Los restos de *Galvesaurus* se recuperaron asociados a los sedimentos terrígenos de la parte inferior de la formación, concretamente en la parte superior de la primera secuencia definida por Val *et al.* (2019) (ver también Pérez-Pueyo *et al.*, 2019). Los fósiles del yacimiento de Cuesta Lonsal se encuentran a techo de un nivel de areniscas y en la base del nivel lutítico situado inmediatamente encima que encajarían con las facies de *channelized sandstones* y de *reddish to ochre lutites* respectivamente, definidas por Val *et al.* (2019). Estas facies representan la migración lateral de canales fluviales en la llanura costera lutítica (Val *et al.*, 2019). La edad de la Formación Cedrillas en Galve se han situado tradicionalmente en el Titoniense-Berriasiense sin precisar (Pérez-Lorente *et al.*, 1997), pero una reciente datación basada en datos de isótopos de estroncio y la presencia del foraminífero bentónico *Alveosepta jaccardi* en niveles carbonatados de la primera secuencia (pero ausente en el resto de secuencias) situarían a Cuesta Lonsal en el final del Kimmeridgiense terminal, siendo la edad de la formación Kimmeridgiense terminal-Titoniense inferior (Val *et al.*, 2019) y envejeciendo sustancialmente la edad del holotipo de *Galvesaurus*.

#### Yacimiento de La Peñuela

El yacimiento de La Peñuela está incluido en la parte superior de la Formación Aguilar del Alfambra de la subcuenca de Galve considerada tradicionalmente como parte de la secuencia Titoniense-Berriasiense (junto con la Formación Cedrillas) o “Purbeck” (Aurell *et al.*, 2016, 2019).

Los límites de la unidad son en su mayoría discordantes con las unidades infra- y suprayacentes. Litológicamente, la formación se compone de una amplia variedad de facies clásticas, mixtas y carbonatadas que se depositaron en zonas de llanura costera y zonas submareales someras en una llanura de mareas abierta dominada por tormentas (Bádenas *et al.*, 2018). Los fósiles del yacimiento de La Peñuela se encuentran a techo de un nivel de areniscas y en la base del nivel lutítico situado inmediatamente encima, en una disposición similar a Cuesta Lonsal. Corresponden con facies de la zona supramareal-intermareal en el modelo definido por Bádenas *et al.* (2018), si bien la sedimentología particular de estos depósitos están actualmente en estudio. Los datos biostratigráficos con carófitas y los datos de isótopos de estroncio sugieren que la Formación Aguilar del Alfambra tiene una edad Titoniense inferior a Berriasiense inferior. En concreto, la Formación Aguilar del Alfambra contiene una asociación de carófitas (*Clavator grovesii* var. *grovesii* y *Clavator grovesii* var. *discordis*) que se atribuyen al Berriasiense, con mayor probabilidad Berriasiense temprano (Martín-Closas, 2000; Aurell *et al.*, 2019). Recientemente han sugerido incluir el Berriasiense como el piso más moderno Jurásico (ver discusión en Aurell *et al.*, 2019 y referencias), por consiguiente el piso Cretácico más antiguo sería el Valanginiense. Si finalmente la Comisión Internacional de Estratigrafía aprueba esta propuesta, el saurópodo de La Peñuela (Fig. 1) tendría una edad de Jurásico Superior.

#### Material y métodos

El material estudiado se ha seleccionado de los huesos depositados en la colección del Museo de Ciencias Naturales de la Universidad de Zaragoza (MPZ). Las preparaciones paleohistológicas han sido depositadas en la tipoteca del museo (Canudo, 2018). Dado que los análisis requeridos para la caracterización paleohistológica son destructivos, se seleccionaron fragmentos de huesos de menor interés para otro tipo de estudios y que mantuvieran la parte externa del hueso. Teniendo en cuenta el material disponible se seleccionaron dos fragmentos de hueso largo (La Peñuela) y siete fragmentos más diversos en Cuesta Lonsal.

El material estudiado de *Galvesaurus herreroi* son siete fragmentos correspondientes al esqueleto axial, en algunos casos indeterminados: MPZ 2019/376 (fragmento de vértebra), MPZ 2019/377, MPZ 2019/378, MPZ 2019/379 (fragmentos indeterminados), MPZ 2019/380 (fragmento de vértebra cervical), MPZ 2019/381 (fragmento distal de arco hemal) y MPZ 2019/382 (esquirla de hueso largo). Las cinco primeras siglas se corresponden con fragmentos de hueso recuperados en la campaña de excavación de 1994 dirigida por la Dra. Gloria Cuenca, los dos restantes fueron recogidos en superficie durante una visita al yacimiento en el año 2017 (Tabla 1; Anexo I).

Los restos del saurópodo de La Peñuela corresponden con fragmentos medios de huesos largos indeterminados, posiblemente del zeugópodo: MPZ 2019/383 y MPZ 2019/384. Los huesos fueron recogidos en superficie durante labores de prospección en el año 2007 (Tabla 1; Anexo II).



Taxón	Sigla	Elemento
<i>Galvesaurus herreroi</i>	MPZ 2019/376	Fragmento de vértebra
	MPZ 2019/377	Fragmento indeterminado
	MPZ 2019/378	Fragmento indeterminado, posible fragmento de vértebra
	MPZ 2019/379	Fragmento indeterminado
	MPZ 2019/380	Fragmento de vértebra cervical
	MPZ 2019/381	Fragmento distal de arco hemal
Sauropoda indet.	MPZ 2019/382	Esquirla de hueso largo
	MPZ 2019/383	Fragmento de hueso largo
	MPZ 2019/384	Fragmento de hueso largo

**Tabla 1.-** Elementos óseos utilizados para la descripción histológica de *Galvesaurus herreroi* y Sauropoda indet.

Las láminas delgadas de las muestras fueron realizadas por el Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros de la Universidad de Zaragoza. Las láminas tienen un grosor de 100  $\mu\text{m}$  siguiendo la metodología de Padian y Lamm (2013) en la que establecen que el citado grosor permite reconocer estructuras histológicas que no serían observables si este fuese menor. Este grosor permite reconocer la distribución de las fibras de colágeno y otras estructuras tridimensionales (Padian y Lamm, 2013).

La descripción paleohistológica se ha realizado en base al estudio de las muestras por microscopía de luz transmitida y posteriormente han sido analizadas a través de FES-EM. Las observaciones histológicas y del relleno de las cavidades vasculares de los huesos se realizaron en el Servicio de Microscopía Óptica e Imagen de la Universidad de Zaragoza, utilizando un microscopio Olympus AX70-TF, que tiene acoplada una cámara Olympus CAMEDIA C-7070 de 7,1 megapíxeles. Se tomaron fotografías de las muestras a través del programa a Cam2Com®, a una distancia focal de 17,3 mm. Las imágenes fueron tratadas con Adobe Photoshop CC y Adobe Illustrator CC.

Klein y Sander (2008) establecieron los denominados HOS (*Histological Ontogenetic Stages*, estadios ontogénicos histológicos) utilizando inicialmente ejemplares de saurópodos diplodócidos y macronarios basales. Posteriormente esta metodología se ha aplicado a otros grupos de macronarios más derivados como los titanosaurios (Klein *et al.*, 2009). Así, Klein y Sander (2008) definieron 13 HOS en función de siete tipos de tejidos estandarizados (desde Tipo A hasta Tipo G) encontrados en diferentes muestras. Los HOS se basan en el tipo de tejido óseo, la organización y densidad vascular, la presencia de marcas de crecimiento y la aparición de EFS (*External Fundamental System*; Cormark, 1987). Las etapas ontogénicas histológicas generalmente se relacionan con el tamaño del cuerpo del animal. Klein y Sander (2008) proponen que la madurez sexual se alcanza en el HOS-8, coincidiendo con un descenso en la vascularización, lo que no implica que los saurópodos hubiesen alcanzado su tamaño corporal máximo. Stein *et al.* (2010) definieron un nuevo HOS (HOS-14) al observar en huesos largos de saurópodos adultos varias generaciones de osteonas secundarias superpuestas, permitiendo diferenciar entre una remodelación ósea moderada (HOS-13) y elevada (HOS-14). En la mayoría de los saurópodos, tras la formación de EFS la remodelación ósea continúa a través de todo el hueso compacto eliminando el hueso primario y

sus características histológicas. Por tanto, las osteonas secundarias son la única estructura ósea remanente cuando los saurópodos alcanzan la senectud. Mitchell *et al.* (2017) tratan de cuantificar la remodelación ósea en varios taxones de saurópodos, al observar el tamaño, densidad y generaciones de osteonas secundarias en huesos largos. Establecen estadios de remodelación

ósea (*Remodeling Stages*, RS) para caracterizar el desarrollo de tejido haversiano en saurópodos adultos. Estos RS se establecen calculando el número máximo de generaciones de osteonas en la parte interna, media y externa del hueso compacto en base a la superposición de estas. Además, los estadios de remodelación ósea proporcionan información adicional sobre los cambios en la histología a través de la ontogenia en saurópodos.

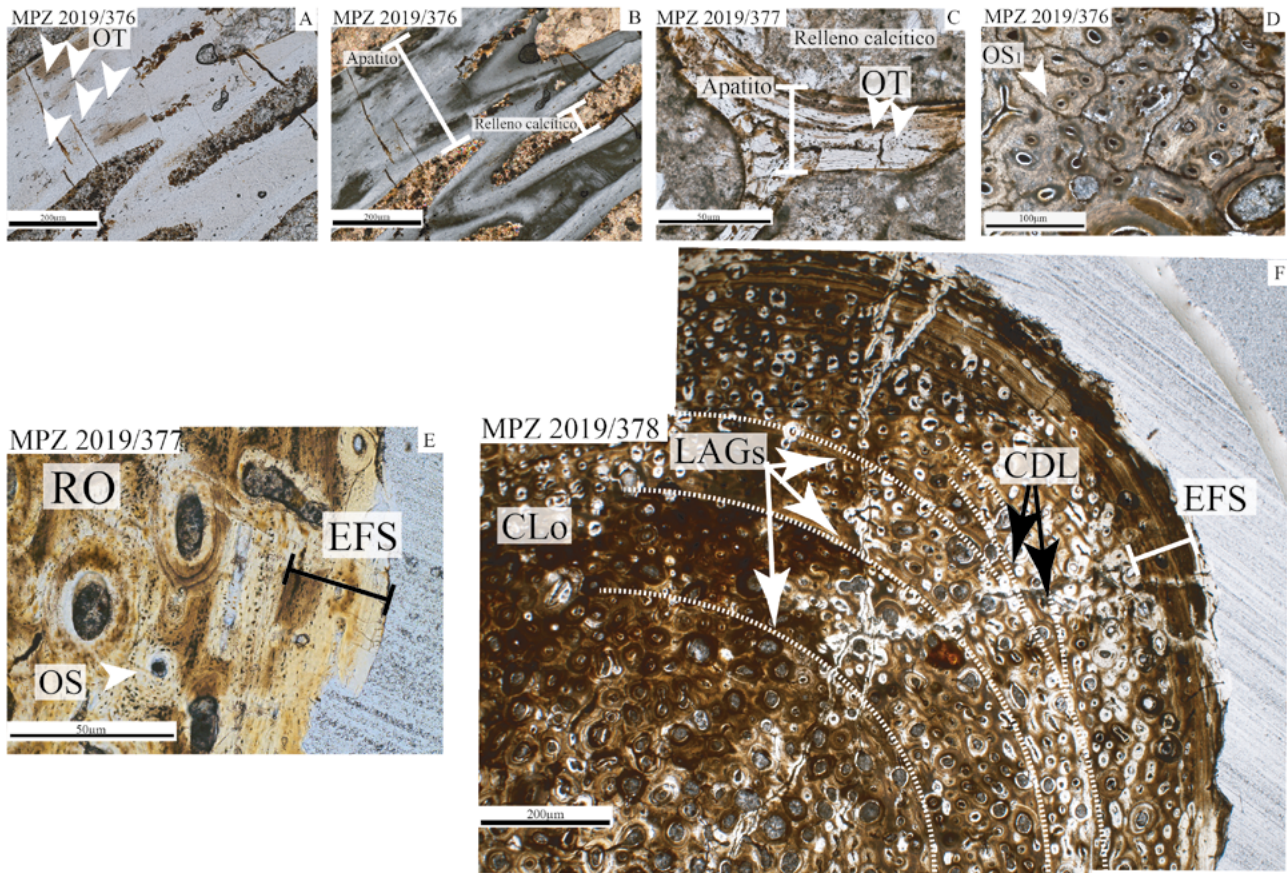
La identificación de las fases minerales que forman el hueso y los rellenos dentro de este, su composición química y relaciones texturales se realizaron en el Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Zaragoza. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM). Para el estudio se seleccionaron las láminas MPZ 2019/376 y MPZ 2019/380, pertenecientes a *Galvesaurus*, y MPZ 2019/383 del saurópodo de La Peñuela. Previamente se recubrieron con carbono para hacerlas conductoras de los electrones.

Las observaciones se realizaron en un FESEM Carl Zeiss MERLIN™. El microscopio está equipado con un detector Oxford EDS, INCA 350 (Oxford Instruments) con una resolución de energía entre 127 eV y 5,9 keV. Se trabajó a 15 Kv para obtener análisis químicos e imágenes composicionales generadas con la señal de rayos-X y electrones retrodispersados, respectivamente. Para la obtención de las imágenes de electrones retrodispersados se ha utilizado el detector AsB (*angle-selective backscatter*) (Lloyd, 1987). Los análisis químicos fueron procesados con el software AZTEC de Oxford, que dispone de estándares internos para la cuantificación. Los análisis se presentan en porcentaje en peso.

## Descripción de la paleohistología y la permineralización de *Galvesaurus*

### Paleohistología

Todas las muestras paleohistológicas estudiadas de *Galvesaurus herreroi* muestran secciones de hueso compacto (HC) y de hueso esponjoso (HE), aunque en algunos de los cortes solo está presente alguno de los tipos como se detalla en cada caso. En MPZ 2019/378 (posiblemente fragmento de vértebra) el corte perpendicular al eje largo del hueso se realizó en una sección distal, por lo que solo se observa hueso compacto. En el caso de MPZ 2019/376 (fragmento indeterminado; Fig. 2A, B) el corte es longitudinal al eje largo del hueso, de modo que no se aprecian las osteonas (OS) y otras estructuras histológicas, pero sí



**Fig. 2.-** Fotomicrografías de los restos óseos de *Galvesaurus herreroi*. A y B. Detalle del hueso esponjoso y rellenos calcíticos de las cavidades vasculares en un corte oblicuo a un fragmento de vértebra (A: nicoles paralelos; B: nicoles cruzados). C. Detalle de una trabécula fragmentada. D. Hueso primario en la porción compacta del hueso, donde se reconocen osteonas primarias. E. Porción compacta del hueso con tejido haversiano de tipo laxo. Se reconoce cierto grado de remodelación ósea y el sistema fundamental externo (EFS) en la zona superficial del hueso. F. Porción compacta del hueso. Aparecen señaladas en la imagen las líneas de crecimiento; se observa la presencia de líneas de deriva cortical que acaban contra LAGs. En la zona más externa del hueso se reconoce un EFS bien desarrollado. En la zona interna se aprecian canales vasculares con orientación longitudinal. Ver lista de abreviaturas en el texto.

el bandeo del apatito (Ap) y los rellenos calcíticos de las cavidades vasculares (CV), más evidentes en microscopía óptica trabajando con nicoles cruzados (Fig. 2B). Este bandeo en el apatito que compone el hueso está generado por la orientación cristalográfica variable de los cristales, similar al descrito por Pyzalla *et al.* (2006) en el apatito de huesos de saurópodos.

En las porciones esponjosas de los elementos óseos de este saurópodo, las trabéculas (Tr) aparecen muy fragmentadas (MPZ 2019/377; Fig. 2C): en ellas se reconoce una matriz ósea de fibras paralelas. Las grietas que aparecen en las trabéculas del hueso están rellenas de cemento calcítico, del mismo modo que lo están las cavidades vasculares. Además se reconocen abundantes osteocitos y lagunas osteocíticas (OT; Fig. 2C).

En el hueso compacto se reconoce tanto hueso primario (formado por osteonas primarias; MPZ 2019/376, Fig. 2D) como hueso secundario, con cierto grado de remodelación ósea (RO; MPZ 2019/377; Fig. 2E), de forma que se reconoce tejido haversiano de tipo laxo, con matriz de fibras paralelas visible entre las osteonas secundarias (MPZ 2019/376, MPZ 2019/378; Fig. 2D–F). De este modo la orientación de canales vasculares es longitudinal (CLo) en

todos los casos.

Además, se reconocen distintos tipos de marcas de crecimiento en las secciones compactas. Por un lado aparecen marcas de crecimiento concéntricas al eje largo del hueso. Se trata de marcas de crecimiento detenido (LAGs) y annulis, líneas de crecimiento oscuras. Aparecen también las denominadas zonas, marcas de crecimiento claras. Las zonas se corresponden con episodios de crecimiento rápido del hueso (Castanet, 1994). Algunas de estas líneas no son perfectamente concéntricas al eje del hueso, si no que acaban contra otras marcas de crecimiento: se trata de líneas de deriva cortical (CDL; Fig. 2F). En la zona más externa del hueso se observa una porción de hueso avascular y acelular en la que se reconocen varios anillos o capas, que se corresponde con el sistema fundamental externo (EFS, Comark, 1987; Fig. 2E, F).

Se han reconocido tejidos tipo F y G, con presencia de EFS, según los estandarizados por Klein y Sander (2008) para los saurópodos. Se observa un máximo de cinco generaciones de osteonas secundarias en la parte media del hueso compacto. El número de generaciones de osteonas secundarias se reconoce por superposición de estas (Mitchell *et al.*, 2017).

Muestra/	Elemento (% en peso, normalizado)						
	O	F	Na	P	S	Cl	Ca
MPZ 2019/376	39.14	3.87	0.49	17.36	0.74	0.00	38.39
	38.36	4.01	0.52	16.23	0.76	0.19	37.74
	38.04	3.85	0.41	16.33	0.68	0.00	38.21
	38.01	3.70	0.53	16.05	0.67	0.00	38.18
	39.60	3.72	0.56	17.28	0.81	0.27	37.76
	38.81	4.04	0.48	15.94	0.75	0.27	37.39
	39.78	4.31	0.53	16.95	0.70	0.32	37.42
	38.67	4.32	0.57	17.35	0.69	0.00	38.39
	38.92	4.01	0.44	17.34	0.63	0.23	38.40
	39.24	4.04	0.49	17.19	0.75	0.00	38.30
	39.79	3.70	0.47	17.19	0.70	0.41	37.72
	39.19	4.12	0.42	17.34	0.71	0.35	37.87
	39.40	3.73	0.47	17.53	0.61	0.49	37.76
	39.98	3.97	0.48	17.06	0.58	0.45	37.50
	40.18	3.75	0.48	16.99	0.74	0.45	37.43
	38.08	3.86	0.52	16.51	0.63	0.20	38.29
	38.47	3.82	0.56	17.55	0.76	0.00	38.86
	37.32	3.64	0.43	17.64	0.80	0.00	40.14
	37.58	3.90	0.45	16.30	0.54	0.24	38.09
	38.13	3.81	0.49	17.27	0.77	0.40	39.10
	38.40	3.92	0.42	17.55	0.69	0.29	38.72
	39.11	3.40	0.51	17.64	0.62	0.00	38.74
	28.97	2.59	0.35	21.20	0.76	0.00	46.13
39.02	3.51	0.45	17.38	0.81	0.52	38.32	
37.81	3.89	0.43	16.48	0.65	0.35	38.35	
37.86	3.62	0.56	17.76	0.70	0.00	39.50	
38.25	4.11	0.48	17.66	0.63	0.17	38.71	
MPZ 2019//380	38.91	3.81	0.47	15.54	0.79	0.24	37.44
	38.98	3.94	0.57	17.17	0.77	0.00	38.58
	37.10	3.76	0.66	17.55	0.78	0.00	39.27
	38.33	3.49	0.69	17.21	0.72	0.42	38.46
	38.32	3.90	0.57	17.40	0.82	0.00	38.99
<b>Promedio</b>	38.37	3.82	0.50	17.19	0.71	0.20	38.57
<b>Máximo</b>	40.18	4.32	0.69	21.20	0.82	0.52	46.13
<b>Mínimo</b>	28.97	2.59	0.35	15.54	0.54	0.00	37.39
<b>D.S.</b>	1.88	0.31	0.07	0.93	0.07	0.18	1.53

**Tabla 2.-** Contenidos elementales del apatito en los restos óseos de *Galvesaurus hurreroi*.

### Mineralogía

Tras observar las láminas en microscopía óptica, se analizó la mineralogía y relaciones texturales de las fases y componentes de los huesos en FESEM. Las láminas analizadas corresponden con MPZ 2019/376 (fragmento indeterminado) y MPZ 2019/380 (fragmento de vértebra cervical). Cabe destacar que la lámina MPZ 2019/376 corresponde con un corte longitudinal del hueso (se observan canales de Havers longitudinalmente) mientras que la lámina MPZ 2019/380 es de un corte transversal a la vértebra.

La composición teórica del apatito es 18,25% de fósforo, 39,36% de calcio, 38,76% de oxígeno, 1,24% de fluor y 2,32% de cloro (Dumont *et al.*, 2011). En las muestras analizadas el hueso conservado tiene una composición promedio próxima a la teórica y se compone principalmente de fósforo (17,19% en peso), calcio (38,57% en peso) y oxígeno (38,37% en peso), y proporciones menores de flúor (3,82% en peso) y cloro (0,16% en peso) lo que sugiere que se trata de flúor-cloro apatito (Tabla 2).

El apatito del hueso analizado es muy homogéneo com-

posicionalmente. Además de los elementos típicos del mineral (WebMineral, 2019) se han detectado proporciones muy bajas de sodio (0,50% en peso) y azufre (0,71% en peso). Tanto en microscopio óptico como en el electrónico se reconoce un bandeo de diferentes tonos de grises en torno a los canales vasculares (Fig. 3A). Si bien inicialmente parecía que se trataba de un bandeo composicional, la realización de análisis químicos por rayos X, tanto puntuales como en áreas, muestra que la composición del apatito es homogénea y por tanto el bandeo es un efecto debido a las orientaciones variables de los cristales de apatito durante el crecimiento del hueso, es decir debido al contraste cristalográfico. Además de no observar cambios composicionales significativos tampoco se observaron diferencias en el tamaño en los cristales de apatito.

Los canales vasculares están completamente rellenos por diversas fases minerales que podrían clasificarse en tres grupos:

- Granos detríticos (GD), entre los que se han identificado fragmentos de cuarzo, micas, feldespato potásico y óxidos de titanio y hierro (FeOx) que, habitualmente, aparecen cementados por cristales de calcita (Cal) de tamaño micrométrico (Fig. 3B, C).

- Cristales de calcita que crecen sobre las paredes de los canales vasculares con textura micrítica y progresivamente adquieren tamaños mayores hacia el centro del canal. Este cemento calcítico rellena la mayoría de los canales y cavidades vasculares y, además de los elementos químicos característicos del mineral, se ha detectado magnesio y hierro. En algunos casos el cemento calcítico reemplaza parcialmente al apatito del hueso.

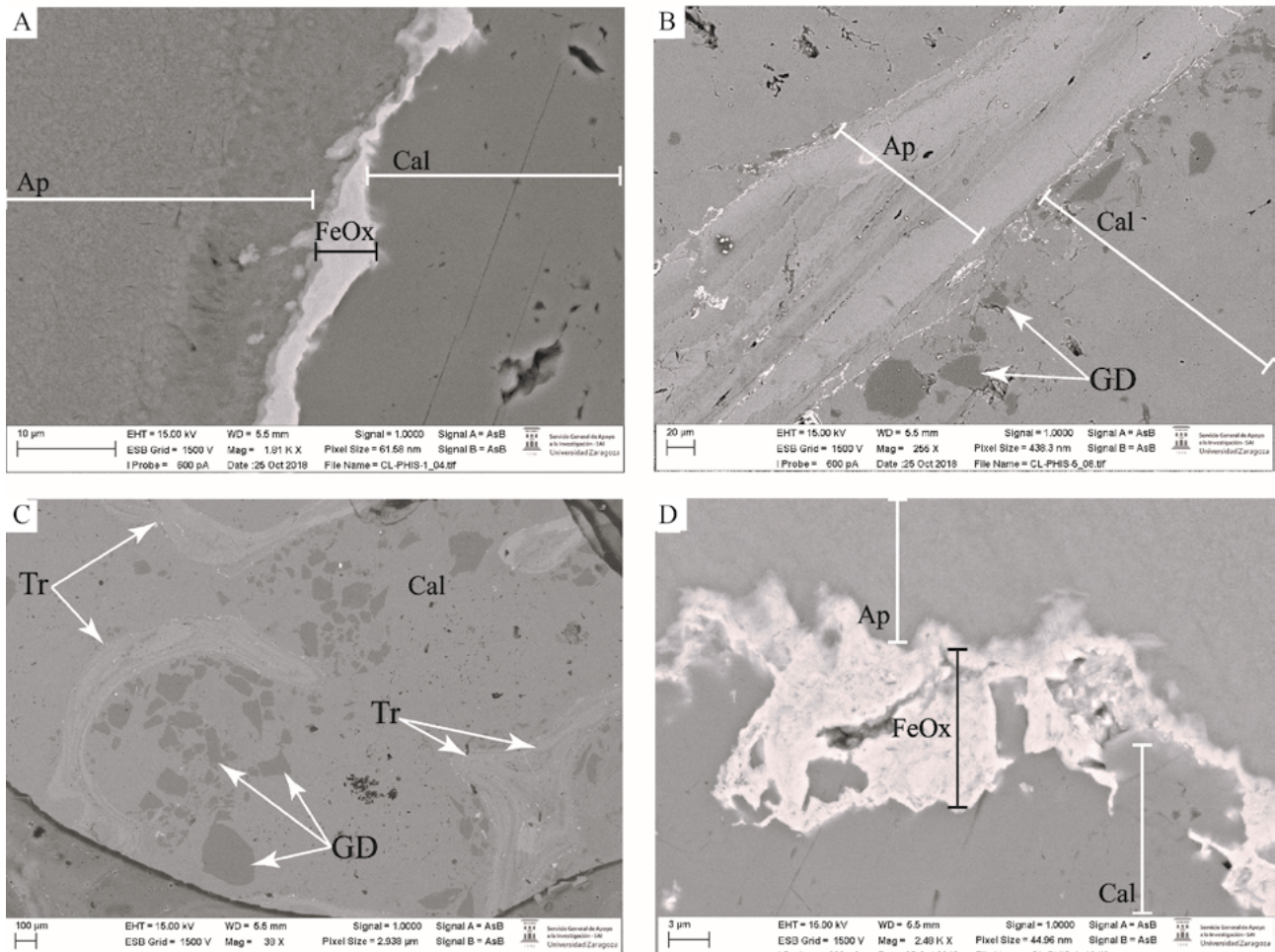
- Se han observado óxidos de hierro y titanio que rellenan grietas de espesor nanométrico. También aparecen en la interfase entre el apatito del hueso y la calcita que rellena los canales vasculares (Fig. 3B, C). Estos óxidos contienen, además de hierro y oxígeno, proporciones menores de aluminio (1,36% en peso).

### Descripción de la paleohistología y permineralización del saurópodo de La Peñuela

#### Paleohistología

Los huesos fueron recogidos en superficie; en *visu* se reconoce erosión superficial. En las secciones histológicas de este saurópodo se reconoce hueso compacto y hueso esponjoso (Fig. 4A). En las porciones de las muestras en las que aparece tejido esponjoso se observan trabéculas óseas con distintos grados de fracturación, generados durante la fosilización del hueso (Fig. 4A, B). La calcita, además, rellena grietas y cavidades dentro de los huesos. En las trabéculas óseas se reconocen abundantes osteocitos y lagunas osteocíticas (Fig. 4C).

En las porciones de hueso compacto se reconoce una remodelación ósea muy avanzada con tejido haversiano de tipo denso, de manera que no aparece matriz ósea entre las osteonas secundarias (Fig. 4D, E). Esta avanzada remodelación ósea ha eliminado todo tipo de marcas de crecimiento como pudiesen ser LAGs (marcas de crecimiento



**Fig. 3.-** Imágenes FESEM (AsB) de *Galvesaurus herreroi*. A. Interfase entre el apatito, óxidos de hierro y calcita. B. Detalle de una de las trabéculas y granos detríticos incluidos en el cemento calcítico. C. Detalle de granos detríticos en las cavidades vasculares. D. Óxidos de hierro en la interfase entre el hueso y las cavidades vasculares superpuestos a la calcita.

detenido) o zonas. La orientación de los canales vasculares es longitudinal en todos los casos. Se reconocen tejidos de tipo G según los estandarizados por Klein y Sander (2008) aunque no se ha observado EFS (Comark, 1987) conservado (Fig. 4E). Se ha contabilizado un máximo de seis generaciones de osteonas secundarias en la zona medida del hueso compacto.

### Mineralogía

Tras el análisis histológico a través de microscopía óptica, se analizó la mineralogía y relaciones texturales de los componentes del hueso con microscopía electrónica. En concreto, la lámina analizada corresponde con un corte transversal de un fragmento de hueso largo (MPZ 2019/383), de manera que los canales que se observan con morfología circular corresponden con canales de Havers.

En las cavidades vasculares del hueso esponjoso se observan cristales de calcita de tamaño variable. En las zonas próximas al hueso la calcita es micrítica y hacia el centro del canal es esparítica. El hueso conservado se compone de apatito formado por calcio (38,57% en peso), fósforo (17,16% en peso), oxígeno (37,67% en peso) y, en menor porcentaje, flúor (3,90% en peso) (promedio del porcentaje

en peso normalizado de los elementos en Tabla 3). Además de estos elementos químicos típicos de la composición del apatito, se han detectado proporciones muy bajas en sodio (0,52% en peso), de azufre (0,51% en peso) y hierro (1,57% en peso). La Figura 5A muestra los contenidos (%) y distribución del oxígeno, flúor, fósforo y calcio a lo largo de la línea marcada en la imagen de la muestra MPZ 2019/383. La figura muestra que, excepto en tres puntos concretos, los contenidos en estos elementos son constantes a lo largo de la línea. Los cambios bruscos observados en tres puntos concretos coinciden con grietas de la lámina.

Los canales de Havers y las cavidades vasculares están rellenos mayoritariamente de cemento calcítico, si bien en los bordes de los canales se observan óxidos de hierro que en ocasiones reemplazan parcialmente al apatito (Fig. 5B, C). Aparecen también cristales subidiomorfos de óxidos de hierro y otros metales dentro de los canales vasculares (Fig. 5C).

### Discusión paleohistológica

Inferir observaciones de la paleobiología de organismos extintos es complejo debido a que la información proviene casi exclusivamente de restos óseos y, en muchos casos son

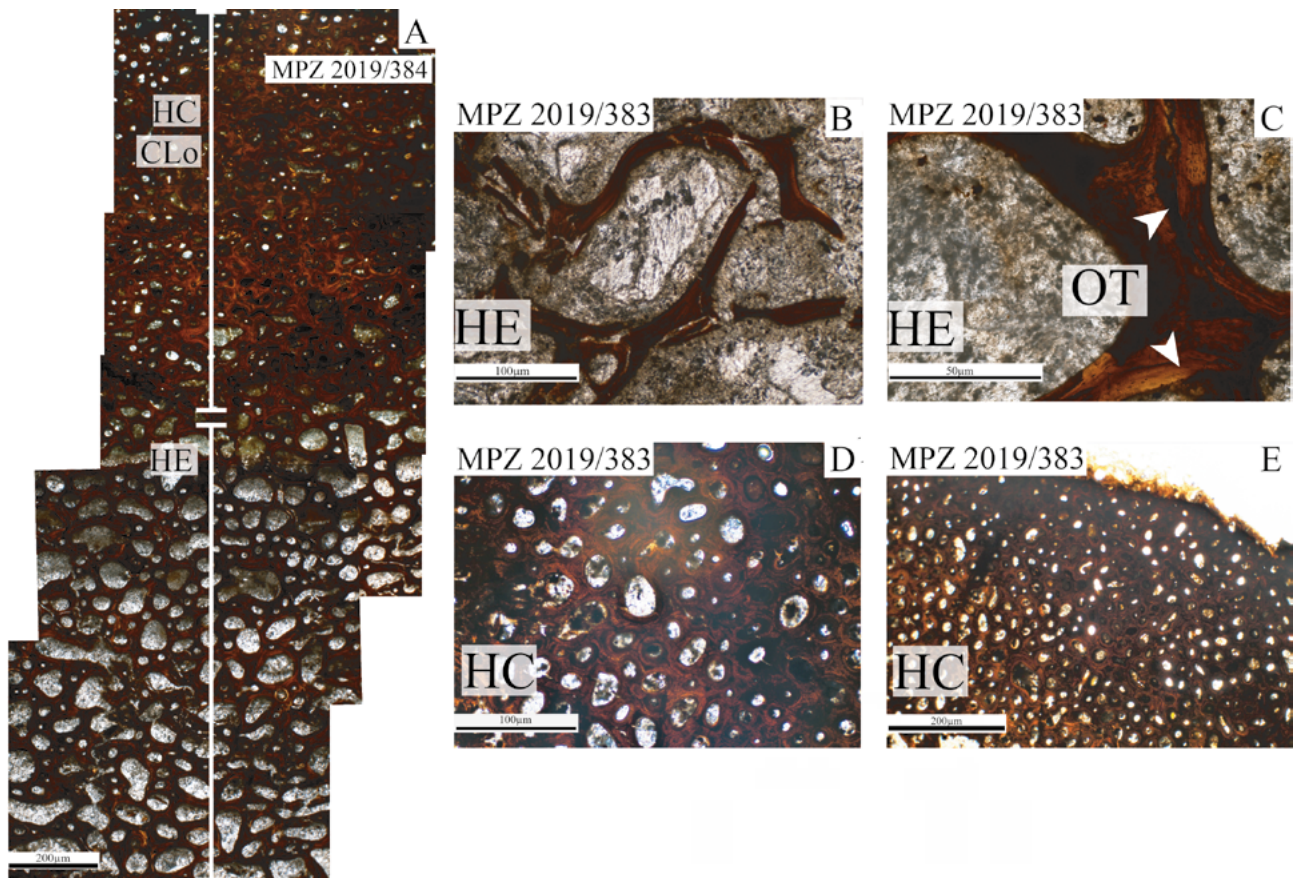
Muestra	Elemento (%en peso, normalizado)						
	O	F	Na	P	S	Ca	Fe
MPZ 2019/383	37.91	4.23	0.57	16.96	0.61	39.72	0.00
	37.07	3.92	0.52	18.03	0.65	39.80	0.00
	36.70	3.16	0.48	15.69	0.00	34.00	9.43
	37.38	4.13	0.54	17.77	0.69	39.49	0.00
	38.22	4.01	0.50	17.42	0.59	39.27	0.00
	38.73	3.95	0.52	17.11	0.53	39.17	0.00
<b>Promedio</b>	37.67	3.90	0.52	17.16	0.51	38.57	1.57
<b>Máximo</b>	38.73	4.23	0.57	18.03	0.69	39.80	9.43
<b>Mínimo</b>	36.70	3.16	0.48	15.69	0.00	34.00	0.00
<b>D.S.</b>	0.76	0.38	0.03	0.83	0.26	2.25	3.85

**Tabla 3.-** Tabla de contenidos elementales del apatito en los restos óseos de Sauropoda indet.

fragmentarios. Por esta razón, la paleohistología es una metodología que aporta interesante y diferente información paleobiológica al permitir realizar inferencias imposibles con solo la morfología de los huesos (Chinsamy-Turan, 2005). Las muestras utilizadas para la descripción paleohistológica provienen de elementos anatómicos no coincidentes, lo que dificulta la comparación entre los dos ejemplares.

En el caso de *Galvesaurus herreroi*, los huesos presentan un cierto grado de remodelación ósea. Destaca la presencia de marcas de crecimientos en las secciones: se reconocen

desde zonas, annulis y LAGs, hasta líneas de deriva cortical (CDL). Estas marcas implican variación en las tasas de crecimiento del hueso en la ontogenia de *Galvesaurus*. En numerosos estudios se ha relacionado la formación de LAGs con ciclicidad anual en anfibios y reptiles (Klein *et al.*, 2009) aunque una remodelación ósea avanzada en la zona central del hueso hace que las marcas de crecimiento desaparezcan (Stein *et al.*, 2010). La remodelación ósea es intensa en las zonas centrales de los huesos de *Galvesaurus*, de manera que difumina estas marcas de crecimiento. Los canales vasculares observados tienen orientación longitudinal. Esto implica que la tasa de crecimiento del hueso era lenta, entre 3 y 16  $\mu\text{m}$  al día (Castanet *et al.*, 2000). Se han reconocido tejidos de tipo F y G según los tejidos estandarizados propuestos por Klein y Sander (2008). Destaca la presencia de EFS en varias secciones. La presencia de este sistema implica un cese en el crecimiento centrífugo (Padian y Lamm, 2013). El tejido haversiano que presenta *Galvesaurus* es laxo, lo que lo sitúa en un HOS-13 de Stein *et al.* (2010). Se identifican un máximo de cinco generaciones de osteonas secundarias, lo que sitúa al ejemplar en un RS-13/RS-14 de Mitchell *et al.* (2017). Por lo tanto *Galvesaurus* tuvo un crecimiento continuo pero lento y habría alcanzado la madurez sexual en el momento de su muerte, es decir, sería somáticamente maduro.



**Fig. 4.-** Fotomicrografía del saurópodo de la Peñuela. A. Transición entre la porción de hueso compacto y la porción de hueso esponjoso. B. Trabéculas fragmentadas. En el interior de las cavidades vasculares se reconoce calcita con diferentes texturas. C. Detalle de matriz ósea de fibras paralelas conservada en una de las trabéculas, aparecen señalados osteocitos y lagunas osteocíticas. D. Detalle de la sección compacta del hueso. E. Detalle de la zona media de la sección compacta en la que la remodelación ósea está muy avanzada. Nótese la ausencia de EFS en la zona más externa del hueso.

El saurópodo de La Peñuela muestra una remodelación ósea avanzada, hasta tal punto que las marcas de crecimiento y otras características histológicas primarias han sido eliminadas por esta propia remodelación. La orientación de los canales vasculares en el hueso compacto es longitudinal, lo que implica una tasa de crecimiento lenta que podría oscilar entre 3 y 16  $\mu\text{m}$  por día (Padian y Lamm, 2013), similar a *Galvesaurus*. En la mayor parte de la sección se reconocen tejidos de tipo G de Klein y Sander (2008) lo que sitúa al saurópodo de la Peñuela en un HOS-14 de Stein *et al.* (2010), con tejido haversiano denso en el que apenas se reconoce matriz ósea entre las osteonas secundarias del hueso compacto. No aparece conservado el sistema fundamental externo (EFS). El hueso en *visu* muestra erosión superficial, lo que genera que este EFS solo esté conservado en pequeñas porciones del hueso. La avanzada remodelación ósea es patente en la superposición de seis o más generaciones de osteonas secundarias, lo que situaría a este saurópodo en un RS-15, el máximo de los establecidos por Mitchell *et al.* (2017). Se trata por tanto de un ejemplar adulto, incluso senil.

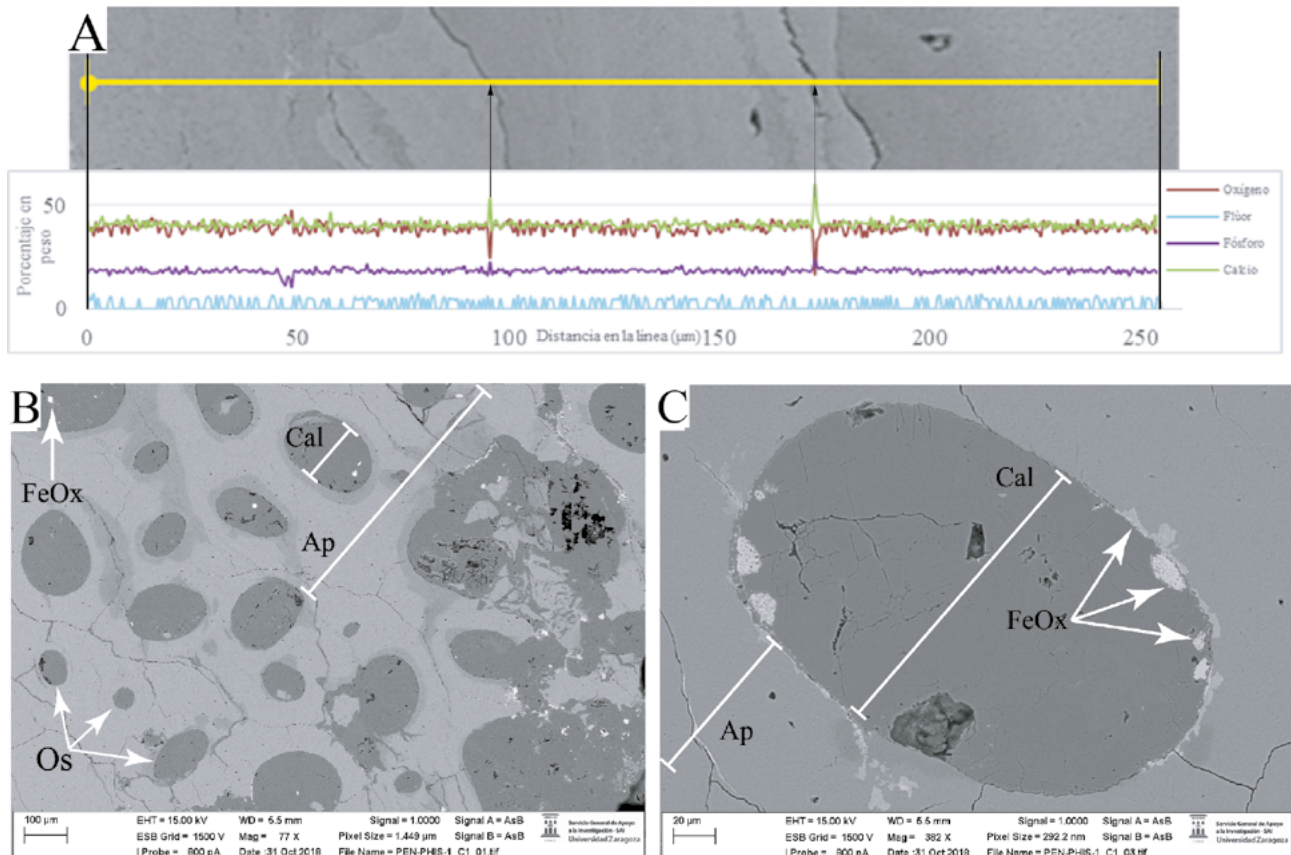
### Discusión sobre la permineralización

A pesar de que las formaciones y edades en las que han recuperado estos saurópodos son diferentes, litológi-

camente tienen características comunes (Bádenas *et al.*, 2018; Val *et al.*, 2019). Ambas se componen de una alternancia de calizas (con mayor o menor influencia mareal) y materiales detríticos (desde areniscas hasta lutitas) y representan ambientes costeros, lo que puede marcar puntos comunes en los rellenos de las cavidades vasculares de ambos taxones.

Los huesos analizados de *Galvesaurus* presentan una composición de apatito, de tipo flúor-, cloroapatito, si bien estos dos elementos, flúor y cloro, no están presentes en todos los análisis químicos realizados (Tabla 2). Esto puede ser debido a que la distribución de estos elementos no sea homogénea en el hueso, o alternatively la cuantificación de estos elementos no haya sido correcta debido a su volatilidad (número atómico bajo) durante el análisis. El apatito que conforma el hueso presenta también bajas cantidades de sodio y azufre. Estos elementos pueden entrar en la estructura del apatito sustituyendo al calcio y fósforo respectivamente, como se ha observado en trabajos anteriores (Bauluz *et al.*, 2014). El bandeado de grises que se observa en las imágenes de electrones retrodispersados de microscopía electrónica refleja variaciones en la orientación cristalográfica de los cristales de apatito, y no cambios en la composición ni en el tamaño de los cristales.

El relleno de los canales y cavidades vasculares es mayoritariamente calcítico. A este se incorporan los com-



**Fig. 5.-** Saurópodo de la Peñuela. A. Arriba, imagen FESEM (AsB) de MPZ 2019/383. Se reconocen diferentes tonalidades de gris en el apatito. En amarillo aparece marcada la línea de análisis elemental realizada. Abajo, gráfico de contenidos elementales de la línea analizada en porcentaje en peso normalizado. B. Sección compacta del hueso en la que se observa el apatito y los canales de Havers rellenos de calcita y granos detríticos. C. Detalle de un canal de Havers relleno de calcita. En la interfase entre este relleno y el apatito aparecen óxidos de hierro.

ponentes detríticos a través de fracturas en el hueso de *Galvesaurus* durante la sedimentación y el inicio de la diagénesis de este. La calcita comenzó a precipitar a partir del agua marina atrapada en el hueso en un episodio diagenético temprano, pero posterior al relleno del hueso por sedimentos detríticos. El tamaño variable de los cristales de calcita implica una elevada nucleación de cristales micríticos próximos al hueso que aumentan su tamaño hacia la parte central de los canales y cavidades vasculares, pero todos ellos fueron generados probablemente a partir de un fluido de composición relativamente homogénea y en un único evento. Por último, la formación de óxidos de hierro es posterior a la de la calcita, es decir, se generó durante un episodio diagenético posterior, ya que se observa que los óxidos de hierro crecen superpuestos a la calcita (Fig. 3A, D).

En el caso del saurópodo de La Peñuela, los análisis químicos obtenidos indican que el hueso conservado se compone de apatito de tipo fluor- y cloroapatito (Tabla 3) con bajos contenidos en sodio, azufre y hierro, que podrían entrar en la estructura del apatito (Bauluz *et al.*, 2014). Como en los casos anteriores las distintas tonalidades de grises que se observan en las imágenes de microscopio electrónico correspondientes al apatito son debidas a las variaciones en la orientación cristalográfica de sus cristales. Los análisis plasmados en la Figura 5A corroboran esta interpretación, ya que los contenidos elementales son muy similares.

Las relaciones texturales entre la calcita y los óxidos de hierro en los rellenos de las cavidades y canales vasculares sugieren que los óxidos de hierro se formaron en una etapa diagenética posterior. Por la morfología cúbica de los cristales no puede descartarse que inicialmente se tratase de piritas u otros sulfuros que posteriormente se hayan oxidado. El medio reductor generado por la materia orgánica asociada a los huesos habría facilitado la formación de pequeños cristales de pirita. Sin embargo, no hay evidencias para concluir que todos los óxidos de hierro encontrados fuesen inicialmente sulfuros tipo pirita.

La composición del apatito en los huesos es constante en los dos saurópodos, con pequeñas variaciones en cuanto al hierro, sodio y otros elementos, pero no son significativas, lo que indica que la mineralogía de los restos óseos no ha sido modificada significativamente por procesos diagenéticos. Esto permite la observación de las estructuras histológicas en los restos óseos analizados. Los procesos diagenéticos observados en los ejemplares analizados son similares independientemente de su edad y ubicación. Se forman rellenos predominantemente calcíticos, con granos detríticos y diferentes tipos de óxidos en los canales y cavidades vasculares. Estas similitudes tanto en la composición del apatito como en los rellenos presentes pueden asociarse a la similitud litológica y de historia geológica de las formaciones de los yacimientos.

## Conclusiones

Se han estudiado un total de nueve muestras óseas de dinosaurio a partir de los cuales se han obtenido muestras

paleohistológicas. Corresponden a fragmentos del esqueleto axial y apendicular de dos dinosaurios saurópodos (*Galvesaurus herreroi* y un ejemplar indeterminado en fase de estudio del yacimiento de La Peñuela) recuperados en formaciones del final de la secuencia Jurásica de la Cuenca del Maestrazgo (subcuenca de Galve, provincia de Teruel).

Las observaciones paleohistológicas han permitido conocer que la tasa de crecimiento del hueso era lenta en los dos dinosaurios, entre 3 y 16  $\mu\text{m}$  al día, además de inferir el estadio ontogenético en el momento de su muerte. El tejido haversiano que presenta *Galvesaurus* es laxo, lo que lo sitúa en un HOS-13, es decir murió en un estadio adulto, pero no senil. Sin embargo el saurópodo de La Peñuela se encontraba en un estadio ontogenético más avanzado, pudiendo ser senil, al observarse en mayor parte de las secciones estudiadas tejidos de tipo G (HOS-14).

La mineralogía de los restos no ha sido modificada. La permineralización observada en los ejemplares analizados es similar independientemente de su edad y ubicación. De este modo, posiblemente fue la litología encajante la que controló los procesos diagenéticos que tuvieron lugar durante la fosilización de estos saurópodos. El hecho de que estos fósiles estén en medios ricos en carbonatos, y por tanto se produzca la generación de cementos calcíticos favorece que, a pesar de la fracturación de los restos óseos, su morfología, la estructura de los tejidos así como la composición del apatito se preserve en condiciones óptimas para desarrollar estudios paleohistológicos. Se observan, además, rellenos de granos detríticos y óxidos en los canales y cavidades vasculares. Estas similitudes tanto en la composición del apatito como en los rellenos presentes pueden asociarse a la similitud litológica y de historia geológica de las formaciones donde se han recuperado los fósiles de saurópodos estudiados.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por medio del Ministerio de Economía y Competitividad (CGL2017-85038-P, RTI2018-093419-B-I00, MINECO/FEDER, UE) y el Fondo Europeo para el desarrollo regional y el Gobierno de Aragón por medio del Grupo de Referencia Aragosaurus: Recursos geológicos y paleoambientes. Los autores desean agradecer la colaboración del Servicio de Apoyo de la Investigación-SAI, Universidad de Zaragoza. La investigación de Diego Castanera está financiada por el programa posdoctoral Beatrui de Pinós (BP2017-00195) de la Secretaría de Universidades e Investigación del Departamento de Empresa y Conocimiento de la Generalidad de Cataluña. Los autores además agradecen a Pedro Cirugeda, Jesús Herrero y Miguel Ángel Herrero por su ayuda en la localización del yacimiento de La Peñuela; y a José Manuel Gasca, Manuel Pérez-Pueyo, Beatriz Bádenas y Marcos Aurell. Las sugerencias del Dr. Miguel Moreno-Azanza y de un revisor anónimo han mejorado el manuscrito inicial.



Anexo I.- Fotografías de los fragmentos óseos de *Galvesaurus herreroi* utilizados para la caracterización paleohistológica.



Anexo II.- Fotografías de los fragmentos óseos Sauropoda indet. utilizados para la caracterización paleohistológica.



## Referencias

- Aurell, M., Bádenas, B., Gasca, J.M., Canudo, J.I., Liesa, C.L., Soria, A.R., Moreno Azanza, M., Najas, L., 2016. Stratigraphy and evolution of the Galve sub-basin (Spain) in the middle Tithonian-early Barremian: Implications for the setting and age of some dinosaur fossil sites. *Cretaceous Research*, 65: 138-162.
- Aurell, M., Badenas, B., Canudo, J.I., Castanera, D., García Penas, A., Gasca, J.M., Martín-Closas, C., Moliner, L., Moreno-Azanza, M., Rosales, I., Sequero, C., 2019. Kimmeridgian-lower Valanginian stratigraphy and sedimentary evolution of the central Iberian Rift System (NE Spain). *Cretaceous Research*, 103: 104153.
- Bádenas, B., Aurell, M., Gasca, J.M., 2018. Facies model of a mixed clastic-carbonate, wave-dominated open-coast tidal flat (Tithonian-Berriasian, north-east Spain). *Sedimentology*, 65 (5): 1631-1666.
- Bailleul, A.M., O'Connor, J., Schweitzer, M.H., 2019. Dinosaur paleohistology: review, trends and new avenues of investigation. *PeerJ*, 7: e7764.
- Barco, J.L., Canudo, J.I., 2012. On the phylogenetic position of the sauropod *Galvesaurus*, and other reflections. *Actas de V Jornadas Internacionales sobre Paleontología de Dinosaurios y su Entorno*, Salas de los Infantes, 17-30.
- Barco, J.L., Canudo, J.I., Cuenca-Bescós, G., 2006. Descripción de las vértebras cervicales de *Galvesaurus herreroi* (Dinosauria, Sauropoda) del tránsito Jurásico Cretácico en Galve (Teruel, Aragón, España). *Revista Española de Paleontología*, 21 (2): 189-205.
- Barco, J.L., Canudo, J.I., Cuenca-Bescós, G., Ruiz-Omeñaca, J.I., 2005. Un nuevo dinosaurio saurópodo *Galvesaurus herreroi* gen. nov., sp. nov., del tránsito Jurásico-Cretácico en Galve (Teruel, NE de España). *Naturaleza Aragonesa*, 15: 4-17.
- Bauluz, B., Gasca, J.M., Moreno-Azanza, M., Canudo, J.I., 2014. Unusual replacement of biogenic apatite by aluminium phosphate phases in dinosaur teeth from the Early Cretaceous of Spain. *Lethaia*, 47 (4): 556-566.
- Canudo, J.I., 2018. The collection of type fossils of the Natural Science Museum of the University of Zaragoza (Spain). *Geoheritage*, 10: 385-392.
- Carballido, J.L., Pol, D., Parra Ruge, M.L., Padilla Bernal, S., Páramo Fonseca, M.E., Etayo-Serna, F., 2015. A new Early Cretaceous brachiosaurid (Dinosauria, Neosauropoda) from northwestern Gondwana (Villa de Leiva, Colombia). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 35 (5): 1-12.
- Casanovas, M.L., Santafé, J.V., Sanz, J., 2001. *Losillasaurus giganteus*, un nuevo saurópodo del tránsito Jurásico - Cretácico de la cuenca de "Los Serranos" (Valencia, España). *Paleontología i Evolució*, 32-33: 99-122.
- Castanet, J., 1994. Age estimation and longevity in reptiles. *Gerontology*, 40: 174-192.
- Castanet J., Curry-Rogers K., Cubo J., Boisard J.-J., 2000. Periosteal bone growth rates in extant ratites (ostriche and emu). Implications for assessing growth in dinosaurs. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Serie III Sciences De La Vie*, 323: 543-550.
- Chinsamy-Turan, A., 2005. The Microstructure of dinosaur bone: Deciphering Biology with Fine-Scale Techniques. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 26 (1): 233-234.
- Cormack, D.H. (1987). Bone, en "Ham's Histology". Philadelphia: JB Lippincott, cap. 12, 273-323.
- Company, J., 2011. Bone histology of the titanosaur *Lirainosaurus astibiae* (Dinosauria: Sauropoda) from the Latest Cretaceous of Spain. *Naturwissenschaften*, 98: 67-78.
- Company, J., Cruzado-Caballero, P., Canudo, J.I., 2015. Presence of diminutive hadrosaurids (Dinosauria: Ornithomorphs) in the Maastriichtian of the south-central Pyrenees (Spain). *Journal of Iberian Geology*, 41 (1): 71-81.
- Dumont, M., Koskka, A., Sander, P.M., Borbely, A., Kaysser-Pyzalla, A., 2011. Size and size distribution of apatite crystals in sauropod fossil bones. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310: 108-116.
- Griebeler, E.M., Klein N., Sander, P.M., 2013. Aging, maturation and growth of sauropodomorph dinosaurs as deduced from growth curves using long bone histological data. *Plos One*, 8 (6): e67012.
- Klein, N., Sander, M., 2008. Ontogenetic stages in the long bone histology of sauropod dinosaurs. *Paleobiology*, 34 (2): 247-263.
- Klein, N., Scheyer, T., Tütken, T., 2009. Skeletochronology and isotopic analysis of a captive individual of *Alligator mississippiensis* Daudin, 1802. *Fossil Record*, 12: 121-131.
- Lloyd, A.P., 1987. Counselor Education in Malaysia. *Counselor Education and Supervision*, 26: 221-227.
- Mannion, P.D., Upchurch, P., Barnes, R.N., Mateus, O., 2013. Osteology of the Late Jurassic Portuguese sauropod dinosaur *Lusotitan atalaiensis* (Macronaria) and the evolutionary history of basal titanosauriformes. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 168: 98-206.
- Martín-Closas, C., 2000. *Els caròfits del Juràssic superior i el Cretaci inferior de la Península Ibèrica*. Arxius de les Seccions de Ciències, Institut d'Estudis Catalans, 125, 304 p.
- Mas, R., Alonso, A., Meléndez, N., 1984. La formación Villar del Arzobispo: un ejemplo de llanuras de mareas siliciclásticas asociadas a plataformas carbonatadas. Jurasico terminal. (NW de Valencia y E de Cuenca). *Publicaciones de Geología*, 20: 175-188.
- Mitchell, J., Sander, P.M., 2014. The three-front model: a developmental explanation of long bone diaphyseal histology of Sauropoda. *Biological Journal of the Linnean Society*, 112: 765-781.
- Mitchell, J., Sander, P.M., Stein, K., 2017. Can secondary osteons be used as ontogenetic indicators in sauropods? Extending the histological ontogenetic stages into senescence. *Paleobiology*, 43 (2): 321-342.
- Padian, K., Lamm, E.T., 2013. *Bone histology of fossil tetrapods: Advancing methods, analysis and interpretation*. University of California Press, Berkeley, Los Angeles & London, 285 p.
- Perales-Gogenola, L., Elorza, J., Canudo, J.I., Pereda-Suberbiola, X., 2019. Taphonomy and palaeohistology of ornithischian dinosaur remains from the Lower Cretaceous bonebed of La Cantalera (Teruel, Spain). *Cretaceous Research*, 98: 316-334.
- Pérez-Lorente, F., Cuenca-Bescós, G., Aurell, M., Canudo, J.I., Soria, A.R., Ruiz-Omeñaca, J.I., 1997. Las Cerradicas track-site (Berriasian, Galve, Spain): Growing evidence for quadrupedal ornithomorphs. *Ichnos*, 5: 109-120.
- Pérez-Pueyo, M., Moreno-Azanza, M., Barco, J.L., Canudo, J.I., 2019. New contributions to the phylogenetic position of the sauropod *Galvesaurus herreroi* from the Tithonian (Jurassic) of Spain (Teruel). *Boletín Geológico y Minero*, 130 (3): 375-392.
- Pyzalla, A.R., Sander, P.M., Hansen, A., Ferreyro, R., Yi, S.B., Stempniewicz, M., Brokmeier, H.G., 2006. Texture analyses of sauropod dinosaur bones from Tendaguru. *Materials Science and Engineering A*, 437(1): 2-9.
- Royo-Torres, R., Cobos, A., Alcalá, L., 2006. A giant European dinosaur and a new sauropod clade. *Science*, 314: 1925-1927.
- Royo-Torres, R., Cobos, A., Aberasturi, A., Espílez, E., Fierro, I., González, A., Luque, L., Mampel, L., Alcalá, L., 2007.

- Riodeva sites (Teruel, Spain) shedding light to european sauropod phylogeny. *Geogaceta*, 41: 183-186.
- Salas, R., Guimerá, J., 1996. Rasgos estructurales principales de la cuenca cretácica inferior del Maestrazgo. *Geogaceta*, 20 (7): 1704-1706.
- Salas, R., Guimerá, J., Mas, R., Martín-Closas, C., Meléndez, A., Alonso, A., 2001. Evolution of the Mesozoic Central Iberian Rift System and its Cenozoic inversion (Iberian chain). *Peritethys Memoir*, 6: 145-185.
- Sanz, J.L., Buscalioni, A.D., Casanovas, M.L., Santafé, J.V., 1987. Dinosaurios del Cretácico Inferior de Galve (Teruel, España). *Estudios Geológicos, vol. extr. Galve – Tremp*: 45-64.
- Soria, A.R., Martín-Closas, C., Meléndez, A., Meléndez, M.N., Aurell, M., 1995. Estratigrafía del Cretácico Inferior continental de la Cordillera Ibérica Central. *Estudios Geológicos*, 51: 141-152.
- Stein, K., Csiki, Z., Rogers, K.C., Weishampel, D.B., Redelstorff, R., Carballido, J.L., Sander, P.M., 2010. Small body size and extreme cortical bone remodeling indicate phyletic dwarfism in *Magyarosaurus dacus* (Sauropoda: Titanosauria). *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 107: 9258-9263.
- Val, J., Aurell, M., Bádenas, B., Castanera, D., Subías, S., 2019. Cyclic carbonate-siliciclastic sedimentation in a shallow marine to coastal environment (latest Kimmeridgian-early Tithonian, Galve sub-basin, Spain). *Journal of Iberian Geology*, 45: 195-222.
- Woodward, H.N., 2019. *Maiasaura* (Dinosauria: Hadrosauridae) tibia osteohistology reveals non-annual cortical vascular rings in young of the year. *Frontiers in Earth Sciences*, 7: 50.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 7-4-2020

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 15-7-2020

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 31-7-2020



# REVISIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE TSUNAMIS, BLOQUES Y TSUNAMITAS, EN LAS COSTAS DEL MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL

*Review of tsunami deposits, blocks and tsunamites on the coasts of the western Mediterranean*

Francesc Xavier Roig-Munar<sup>1</sup>, José Ángel Martín-Prieto<sup>1,2</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>2</sup>, Bernadí Gelabert<sup>3</sup>, Joan Manuel Vilaplana<sup>4</sup> y Carla Garcia-Lozano<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Investigador independiente, Consultor ambiental, C/ Carritxaret 18-6, es Migjorn Gran, 07749 Menorca, xiscoroig@gmail.com

<sup>2</sup> Dpto. de Geografía, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, 07122 Palma de Mallorca, josean33@gmail.com

<sup>3</sup> Dpto. de Biología, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, 07122 Palma de Mallorca, bernadi.gelabert@uib.es

<sup>4</sup> Dpto. de Geodinámica y Geofísica, Grupo RISKMAT, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona, nue.vilaplana@ub.edu

<sup>5</sup> Laboratorio de análisis y gestión del Paisaje, Universitat de Girona, Plaça Ferrater Mora, 17003 Girona, carla.garcia@udg.edu

**Abstract:** *The catalog of tsunami deposits in the western Mediterranean, with the exception of the Balearic Islands, is not very large. In total there are 82 localities, of which 65 correspond to the Balearic archipelago. From those two sites have tsunamites while the rest correspond to large blocks on cliffs. This work is the result of a bibliographic scan of all the articles related to this type of event with the aim of facilitating an adequate weighing of the risks in this half of the Mediterranean. Tsunami frequency is highest in the central Mediterranean and high in the eastern Mediterranean where the vast majority of research work is found. The work describes the general characteristics of the western Mediterranean deposits and their relation with the mathematical models of propagation towards the coast.*

**Keywords:** *Western Mediterranean, historical tsunamis, boulders, tsunamites.*

**Resumen:** *El catálogo de depósitos de tsunami en el Mediterráneo occidental, a excepción de las Baleares, no es muy numeroso. En total son 82 localidades, de las que 65 corresponden al archipiélago Balear. De este conjunto tan solo dos localidades presentan tsunamitas, mientras que el resto corresponde a bloques de gran tamaño sobre acantilados. Este trabajo es el resultado de un revisión bibliográfica de artículos relacionados con este tipo de depósitos sedimentarios asociados a eventos de tsunami, con el objetivo de facilitar una adecuada ponderación de los riesgos en este tercio del Mediterráneo. La frecuencia de tsunamis es más alta en el Mediterráneo central y sobretodo en el oriental donde se encuentra la gran mayoría de los trabajos de investigación. El trabajo describe las características generales de los depósitos del Mediterráneo occidental y su relación con los modelos matemáticos de propagación hacia las costas.*

**Palabras clave:** *Mediterráneo occidental, tsunami históricos, bloques, tsunamitas.*



Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B., Vilaplana, J.M., García-Lozano, C., 2020. Revisión de los depósitos de tsunamis, bloques y tsunamitas, en las costas del Mediterráneo occidental. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33 (2): 17-30.

## Introducción

Los catálogos de tsunamis recogen más de 2000 eventos a escala mundial en los últimos 4000 años (Soloviev *et al.*, 2000; Maramai *et al.*, 2014), jugando estos un importante papel en la evolución morfológica de muchas costas (Dawson, 1994). La cuenca mediterránea no es ajena a fenómenos de tsunamis, ya que su sismicidad está fuertemente vinculada a sus características tectónicas. Tinti *et al.* (2005) definen tres regiones sísmicas mediterráneas y realizan modelizaciones de propagación de tsunamis (Tinti y Armigliato, 2003), con tres fuentes hipotéticas: el escenario Tirreno Sur-Oriental de Sicilia, el escenario Helénico y el escenario Argelino, directamente relacionado con el Mediterráneo occidental. Las características generales de la cuenca mediterránea, caracterizada por la compresión entre las placas euroasiática y africana, cubren todos los fenómenos que podrían generar un tsunami: sísmico, volcánico y/o gravitacional (Marone *et al.*, 2004).

En torno al 10% de los tsunamis en el mundo en los últimos 4000 años se produjeron en el Mediterráneo, asociado a movimientos de fallas inversas en la plataforma continental, y en torno al 7% de los terremotos de esta región produjo un tsunami (Bryant, 2001), con una distribución geográfica controlada por la sismicidad (Sorensen *et al.*, 2012). Los catálogos de tsunamis del Mediterráneo recogen mayoritariamente los asociados a terremotos (Soloviev *et al.*, 2000; Papadopoulos, 2002; Tinti *et al.*, 2004; Fokaefs y Papadopoulos, 2007). Los tsunamis históricos que han afectado a las costas españolas han sido recogidos en varios catálogos (Galbis, 1932; Campos y Romero, 1992; Martínez-Solares, 2001; Martínez-Solares y Mezcuca, 2002), donde se reconocen frecuentes eventos en las costas del S de la península Ibérica. La mayoría fueron originados por terremotos localizados a lo largo de la costa septentrional de África, y señalan cuatro terremotos en las islas Baleares en los años 1756, 1856, 1980 y 2003 (Silva y Rodríguez-Pascua, 2019), que posteriormente plasman en una cartografía detallando la costa S de Baleares y la costa del mar de Alborán como costas afectadas por tsunamis (Silva *et al.*, 2015).

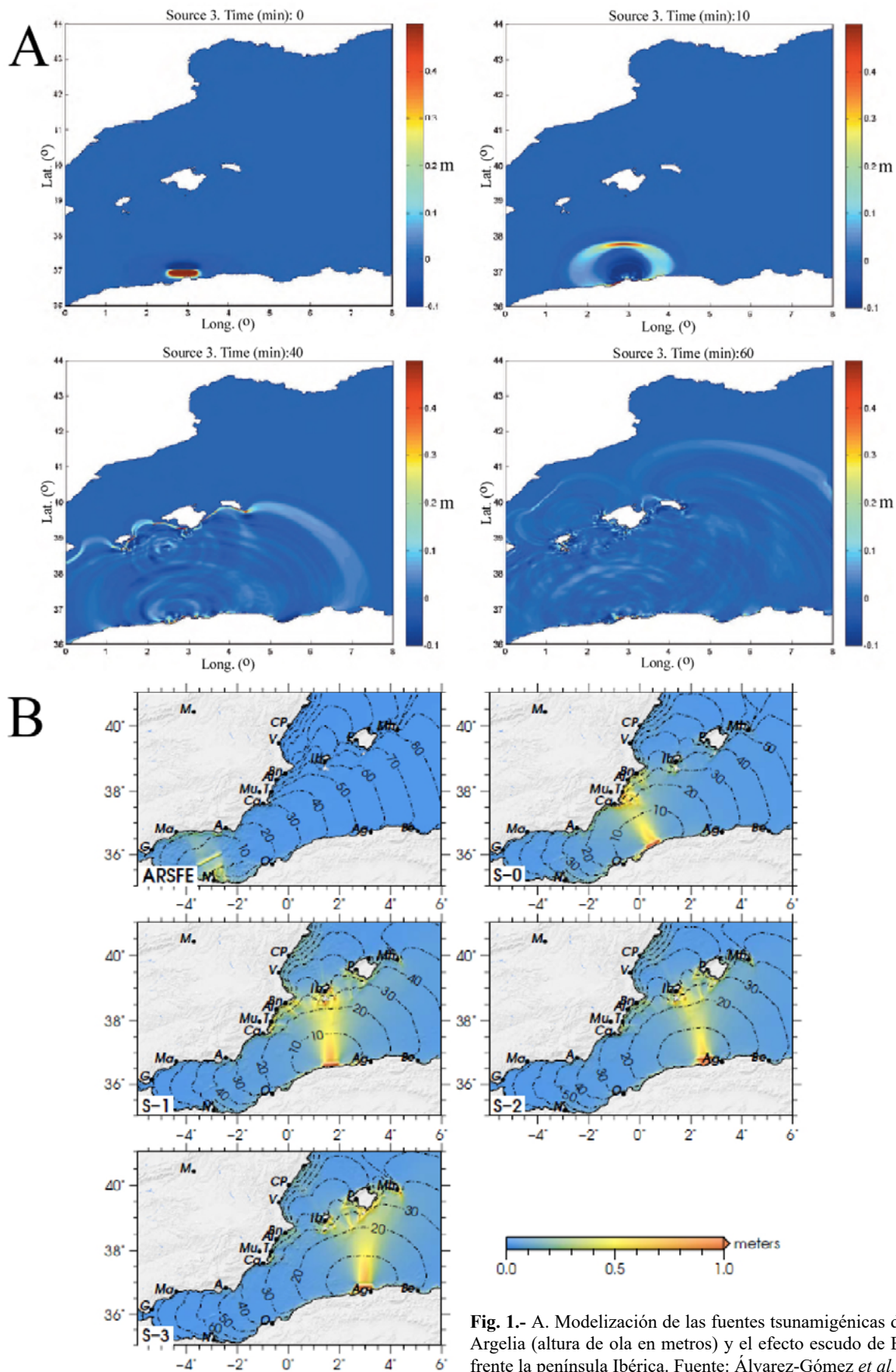
El Mediterráneo se caracteriza por una tectónica compleja que se debe describir en el marco de la colisión entre las placas euroasiática y africana (*e.g.*, Henares *et al.*, 2003). En el extremo occidental del Mediterráneo se puede definir dos áreas en términos de geología y tectónica. Por un lado el entorno del Mar de Alborán, caracterizado por un tipo tectónico transcurrente dominante, y en segundo lugar, el cinturón del Atlas, en el N de Argelia, caracterizado por un tipo de deformación compresiva. Ambas áreas son consideradas zonas tsunamigénicas con potencial intermedio (Papadopoulos y Fokaefs, 2005). La costa del N de África está geológicamente formada por el sistema de

cordilleras del Rif-Tell-Atlas, un sistema orogénico construido aproximadamente desde el Paleoceno-Eoceno hasta el presente, en el contexto de la orogenia Alpina, y que configuró la orografía actual de las fronteras mediterráneas. La deformación del área es causada por el movimiento hacia el O de la placa africana hacia la placa euroasiática, acomodándose por un sistema de esfuerzos NE-SO a E-O, con una doble vergencia, hacia el SE y hacia el NE, absorbiendo esta área alrededor de 2-4 mm/año. Las estructuras tectónicas, frecuentemente conocidas como sismogénicas tierra adentro, tienen su continuación en alta mar y son las fuentes de tsunamis (Alasset *et al.*, 2006). Estas fuentes representan fallas inversas de bajo ángulo hacia el N y NE capaces de generar terremotos. Estas fallas forman el N del límite del cinturón de deformación del Atlas del N de África, que ejerce un empuje sobre la cuenca Algero-Balear. En los tsunamis mediterráneos, generados por terremotos en las plataformas continentales, se espera que presenten longitudes de onda entre 5 y 20 km, mientras que las máximas profundidades de agua afectadas son del orden de 3 km (Wang y Liu, 2005), debido a la morfología de los fondos marinos. La sismicidad histórica e instrumental de la cuenca mediterránea occidental indica que el N de Argelia está expuesto a peligros y riesgos sísmicos relevantes (Harbi *et al.*, 2003). El mayor evento registrado es el terremoto de Asnam, del 10 de octubre de 1980, con una magnitud de 7,3 y el último evento sísmico fue el de Boumerdès-Zemmouri del 21 de mayo de 2003, con una magnitud de 6,9.

El objetivo principal de este trabajo es localizar y ubicar, mediante revisión bibliográfica, los depósitos y emplazamientos con presencia de bloques de tsunami y/o tsunamitas, estudiados y descritos en las últimas décadas en el Mediterráneo occidental. Los trabajos revisados van desde el s. IV BCE a 1700 CE., asociados a terremotos documentados en la zona de Alborán, hasta los coetáneos del tsunami de 1700, que se encuentran en muchos de los emplazamientos analizados. Un segundo objetivo es poner énfasis en la necesidad de nuevos estudios asociados a las modelizaciones de las trayectorias de tsunamis, y la reinterpretación de sedimentos ya analizados en áreas modelizadas sin una visión de eventos de tipo tsunami, así como poner énfasis en nuevos estudios geológicos y geomorfológicos litorales que tengan presente el factor tsunami.

## Estado de la cuestión de la modelización de tsunamis que afectan al Mediterráneo occidental

En la cuenca mediterránea occidental se han realizado diversas modelizaciones, coincidiendo con las regiones descritas por Tinti *et al.* (2005). Las modelizaciones realizadas en base al terremoto de Boumerdès-Zemmouri (2003) han sugerido varios mecanismos de generación, según diferentes parámetros de la fuente tsunamigénica.



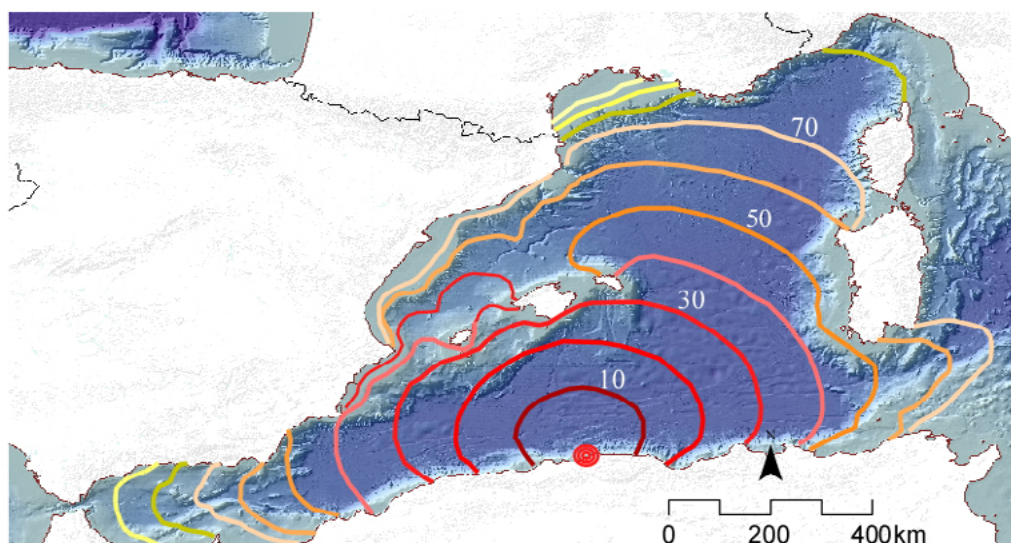
**Fig. 1.-** A. Modelización de las fuentes tsunamigénicas del N de Argelia (altura de ola en metros) y el efecto escudo de Baleares frente la península Ibérica. Fuente: Álvarez-Gómez *et al.* (2010). B. Mapas regionales de elevación máxima de onda de la fuente tsunamigénica del mar de Alborán y por las fuentes del N de Argelia. Fuente: Álvarez-Gómez *et al.* (2011).

Hébert y Alasset (2003) presentan un modelado de tsunamis para las islas Baleares, según el tsunami de 2003, observando que las mayores pendientes batimétricas se encuentran mar adentro, favoreciendo una reflexión en lugar de una amplificación de onda. Wang y Liu (2005), Alasset *et al.* (2006) y Sorensen *et al.* (2012) realizan modelizaciones numéricas en base al estudio de diferentes eventos y de su impacto, estudiando la peligrosidad de tsunamis en relación con la dinámica de estructuras tectónicas que bordean el N de África. Roger y Hébert (2008) se centran en la modelización del tsunami de 1856 y su propagación hacia las islas Baleares, mostrando que la posición de la falla fue discriminatoria respecto al conjunto de las áreas potenciales de impacto y de las áreas afectadas, donde la propagación del tsunami se orientó preferentemente hacia el S de Francia y hacia las islas Baleares. Vela *et al.* (2010) consideran que estas simulaciones están faltas de una batimetría de alta resolución y geometrías locales que permitan un análisis más detallado. Sahal *et al.* (2009), mediante una modelización del tsunami de 2003, confeccionan un mapa del tiempo de viaje de olas que afectan a todas las costas.

Álvarez-Gómez *et al.* (2010) realizan una modelización de tsunamis hacia la isla de Mallorca (Fig. 1A), y posteriormente Álvarez-Gómez *et al.* (2011) modelizan los posibles tsunamis generados por fuentes cercanas a la península Ibérica y las islas Baleares (Fig. 1B), basándose en varios tsunamis históricos y con un dominio de simulación que cubre la cuenca Balear, el mar de Alborán y Argelia. Los resultados obtienen nueve fuentes tsunamigénicas que afectan de diferentes formas e intensidad a las costas (Álvarez-Gómez *et al.*, 2011). El resultado de la modelización representa fuentes con un bajo ángulo de fallas inversas que buzcan hacia el N y NO, capaces de generar terremotos de intensidad 7,3, formando estas fallas el límite N del cinturón de deformación de los materiales del Atlas del N de África empujando sobre la cuenca argelino-balear. Los modelos de Álvarez-Gómez *et al.* (2010, 2011) concluyen y confirman, que las fuentes del N de Ar-

gelia suponen el mayor riesgo para la costa suroriental de la península Ibérica y de las islas Baleares, y que presentan características similares a las responsables de los terremotos de al-Asnam en 1980 y de Boummerrès-Zemmouri en 2003. Schindelé *et al.* (2014, 2015), y posteriormente Heidarzadeh *et al.* (2019) modelizan y establecen tiempos de viaje de la ola de tsunami en el Mediterráneo occidental, coincidentes con los de Sahal *et al.* (2009) y de Álvarez-Gómez *et al.* (2011), considerando que las modelizaciones de los cañones submarinos parecen jugar un papel importante en la amplificación de la onda, y que deben ser determinantes con amplificaciones en varios lugares a lo largo del litoral español y el SE de Francia. En la Figura 2 se aprecia que el impacto de ola es perceptible en toda la costa del Mediterráneo occidental, incluyendo la costa O de las islas de Córcega y Cerdeña, según Heidarzadeh *et al.* (2019). Según los datos del mareógrafo y el análisis TTT (Tsunami Time Travel), el tsunami llegó a Baleares (Ibiza, Palma) después de ~40 min, mientras que las ondas tardaron entre 60 y 75 min para llegar a Francia continental y costa peninsular española.

Además de las referencias de tsunamis generados por terremotos en la plataforma continental, existen diversos trabajos que constatan deslizamientos submarinos, que muy probablemente también generaron tsunamis. Varios de estos se sitúan en el frente del prodelta del Ebro, en el margen catalán y en los márgenes de las islas Baleares (Canals *et al.*, 2004; Lastras *et al.*, 2007; Iglesias *et al.*, 2012). Rodríguez *et al.* (2017) describen procesos asociados a tsunamis originados por deslizamientos submarinos en el mar de Alborán. Tesson *et al.* (2000) también han descrito deslizamientos que podrían generar tsunamis en las costas de la desembocadura del delta del Ródano. Según Iglesias (2015) estos eventos de tsunamis asociados a deslizamientos presentan olas mucho menores que los tsunamis ocasionados por terremotos, de aquí que la presencia de bloques asociados a tsunamis por deslizamientos sea difícil de hallar o identificar.



**Fig. 2.-** Análisis del tiempo de viaje de las olas para el tsunami del 21 de mayo de 2003 con contornos de intervalos de 10 minutos. Simplificado de Heidarzadeh *et al.* (2019).

## Registro sedimentario de los tsunamis: tsunamitas y depósitos de bloques

Las costas rocosas presentan acumulaciones de bloques que permiten inferir las características distintivas de su transporte (Etienne y París, 2010). Muchos depósitos de bloques pueden tener un origen poligénico asociado a tormentas severas y a tsunamis (Hall, 2011). Sin embargo, la distinción entre depósitos de tsunami y de oleaje se basa en un conjunto de criterios sedimentológicos, morfológicos, cronológicos, estratigráficos y de organización que tienen que ser analizados en conjunto (Lario *et al.*, 2010, 2011).

La cuenca mediterránea occidental se caracteriza por una costa recortada que individualiza pequeñas subcuencas, y donde la energía del oleaje está condicionada por la velocidad del viento y por la forma de sus subcuencas (Cañelles *et al.*, 2007). Como consecuencia, en el Mediterráneo la ola difiere respecto a los océanos en cuanto a energía y recorrido, por lo que sus costas pueden presentar buenos indicadores para diferenciar los efectos excepcionales que han dado lugar a la sedimentación y disposición de bloques o sedimentos tsunamigénicos (Mastronuzzi *et al.*, 2006, 2007).

La identificación de bloques transportados por tsunami y/o por tormenta es importante para el reconocimiento de la ocurrencia de eventos, así como para estimar sus propiedades hidráulicas (Nott, 2003; Imamura *et al.*, 2008). Las características morfológicas de los depósitos pueden indicar diferencias sedimentológicas entre tsunamis y tormentas (París *et al.*, 2011). Imamura *et al.* (2008) analizaron cuantitativamente el proceso de transporte para proponer los caracteres que definen los bloques afectados por tsunami y estimar el patrón de flujos y propiedades del oleaje. En esta línea Michetti *et al.* (2007), y posteriormente ampliado y modificado por Lario *et al.* (2016), realizan la descripción de los efectos geoambientales de tsunamis actualmente incluidos en los efectos macrosísmicos de la escala *Environmental Seismic Intensity Scale* (ESI-07) (Michetti *et al.*, 2007), extraídos para la categoría más amplia de *Earthquake Environmental Effect* (EEE) de olas anómalas y tsunamis.

Las olas de tormenta también son capaces de desplazar grandes bloques (Mastronuzzi y Sanso, 2004; Goto *et al.*, 2010), es por ello que es necesario definir los tipos de sedimentos asociados a ambos eventos. Las olas de tormentas extremas son un mecanismo probable de transporte de bloques, cada vez más reconocido en latitudes altas, como el Atlántico N, donde son capaces de transportar bloques a alturas y distancias considerables (Hall *et al.*, 2008; Cox *et al.*, 2018; Cox, 2020). Aunque los bloques de mayores dimensiones no pueden en sí mismos ser utilizados como indicadores climáticos, ya que reflejan eventos poco frecuentes y no climáticos (Lorang, 2000), los bloques de menor tamaño pueden utilizarse como registro de las condiciones climáticas de oleaje, y pueden ser medidos y monitoreados a escalas temporales relativamente cortas (Pérez-Alberti y Trenhaile, 2015).

La evidencia de tsunamis se conserva en el registro estratigráfico en zonas costeras como áreas con bloques y/o

con depósitos de arenas, tsunamitas, aunque no hay unas características sedimentológicas que identifiquen de manera inequívoca el sedimento resultado de un tsunami, ya que pueden depositar sedimentos desde arena a gravas y bloques, ya sea durante el flujo de entrada o durante el flujo de retorno (MacInnes *et al.*, 2009). No obstante, uno de los principales efectos de los tsunamis en las costas rocosas es la sedimentación de grandes bloques tierra adentro, pero hay pocos ejemplos documentados de bloques que hayan sido claramente desplazados por tsunamis históricos (Goto *et al.*, 2007; Bourgeois y MacInnes, 2010). En general diferenciamos dos tipos de depósitos asociados a tsunamis: tsunamitas y depósitos de boques.

### *Tsunamitas*

La composición, el tamaño de grano y la continuidad lateral de las facies del tsunami a menudo es variada, y difiere de un lugar a otro, dependiendo de la naturaleza del depósito original, del entorno y de la geomorfología local (Morales *et al.*, 2008). Sin embargo, hay características que son comunes en muchos de los depósitos arenosos de tsunamis (Dawson y Smith, 2000; Nichol *et al.*, 2003; Luque *et al.*, 2001; Goff *et al.*, 2004). Estas características incluyen un contacto erosivo con la unidad subyacente, con un depósito de sedimento alóctono que puede incluir facies mixtas de ambientes costeros con fauna marina (Sawai, 2002). Shanmugam (2006) describe que la sedimentación tsunamigénica se produce en cuatro etapas progresivas: activación, propagación, sedimentación de bancos de arena y un flujo de salida. Goff *et al.* (2001) y Morales *et al.* (2008) sugieren tres diferencias sedimentarias entre sedimentos de tormentas y tsunamis; a) las tsunamitas muestran una erosión de base, mientras que las capas de tormenta presentan un límite inferior deposicional; b) el tamaño de grano de tormenta normalmente es más grueso que en una tsunamita, pero la clasificación es más clara; y c) una tsunamita es normalmente más extensa lateralmente y en profundidad que una capa de tormenta, debido a que la capacidad de desplazamiento hacia zonas estuarinas o deltaicas es mayor. Según Hori *et al.* (2007) es poco probable que los depósitos de tsunami sean conservados como se formaron, con una reducción y alteración de su espesor. Según Scheffers y Kelletat (2003) los sedimentos de tsunami a lo largo de las costas son difíciles de detectar y son ampliamente ignorados por muchos autores.

### *Depósitos de bloques*

Algunos de los depósitos de tsunamis más convincentes pueden ser los campos o trenes de bloques (Goff *et al.*, 2001). Un tsunami puede llevar a la erosión, el arrastre y la resedimentación de materiales depositados en el flujo, e incluso la removilización de depósitos precedentes (Einsle *et al.*, 1996). Según Hori *et al.* (2007) es muy poco probable que los depósitos de tsunami sean conservados como se formaron, ya que los procesos post-sedimentarios pueden reducir probablemente su posición por efectos del oleaje, en función de su posición, altura y distancia de la

línea de costa (Roig-Munar *et al.*, 2016a). Algunos trabajos indican que el tamaño de los bloques se puede utilizar para estimar las velocidades de las corrientes de ola generadas por tormentas y por tsunamis (Paris *et al.*, 2009; Goto *et al.*, 2009). Varios modelos han sido aplicados para diferenciar los procesos en función de su origen, tanto con el uso de modelos hidrodinámicos como las características morfológicas del espacio de sedimentación (Weiss, 2012). Mastronuzzi y Sanso (2004) describieron diferentes mecanismos de transporte a lo largo de las costas rocosas del Mediterráneo oriental, donde las condiciones necesarias para su arranque, transporte y sedimentación se deben a la presencia de un patrón de fracturación y estratificación, con un impacto que se puede resumir en tres fases: desalojo o arranque, transporte y emplazamiento.

Los tsunamis son capaces de arrancar bloques de un acantilado por medio de un único impacto o acontecimiento que lo inunda progresivamente, mientras que las olas de tormentas extraordinarias lo realizan mediante múltiples impactos que van debilitando el acantilado en diferentes temporales. Una vez que los bloques son individualizados, su movimiento puede darse por deslizamiento, rodamiento y/o rebote, en conformidad con las presiones hidrodinámicas iniciales y con diversos parámetros, tales como el tamaño del bloque, su forma, su rugosidad, la pendiente de la costa, la litología y la altura (Loranger, 2000). Los bloques de tsunami presentan un patrón de cordones paralelos a la línea de costa, orientados hacia el flujo de la ola y con imbricación, en el caso Mediterráneo (Roig-Munar, 2016a), aunque autores como Cox *et al.* (2020), que solo ha trabajado en el Atlántico, ponen en duda la imbricación y creación de cordones como resultado de tsunamis.

Las herramientas de uso común en los estudios de bloques son las formulaciones matemáticas para determinar los procesos hidrodinámicos necesarios para su arranque y transporte. Las ecuaciones matemáticas y los modelos numéricos se utilizan comúnmente para determinar el tipo de evento de alta energía que depositó los bloques. Estas ecuaciones ayudan a diferenciar entre eventos de tsunamis y tormentas, reconstruyendo la energía necesaria para su depósito. A lo largo de las dos últimas décadas se han ido perfeccionando las ecuaciones iniciales de Nott (1997), ampliando las variables y coeficientes (Nott, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009; Barbano *et al.*, 2010; Switzer y Burston, 2010; Benner *et al.*, 2010; Nandasena *et al.*, 2011; Engel y May, 2012). Las ecuaciones más comunes utilizadas en los trabajos sobre bloques en las últimas décadas y utilizadas en el Mediterráneo occidental son:

1) Scheffers y Kelletat (2003) aplicaron la ecuación *Transporte Figure* (TF) para definir umbral del transporte de bloques. Consiste en la multiplicación del peso del bloque por la distancia donde se encuentra hasta el borde del acantilado y por la altura del bloque sobre el nivel del mar. Poco utilizada en el campo del estudio de bloques, los autores la han aplicado para definir diferentes bloques de tsunamis en todo el mundo. Esta fórmula establece umbrales y condiciones para discernir la ola de tormenta de la ola de tsunami, mediante una aproximación a la energía necesaria para el arranque y transporte de cada bloque. Aplicada en

el caso de Mallorca, los autores establecen que bloques con valores de TF superiores a 250 se estiman como tsunami.

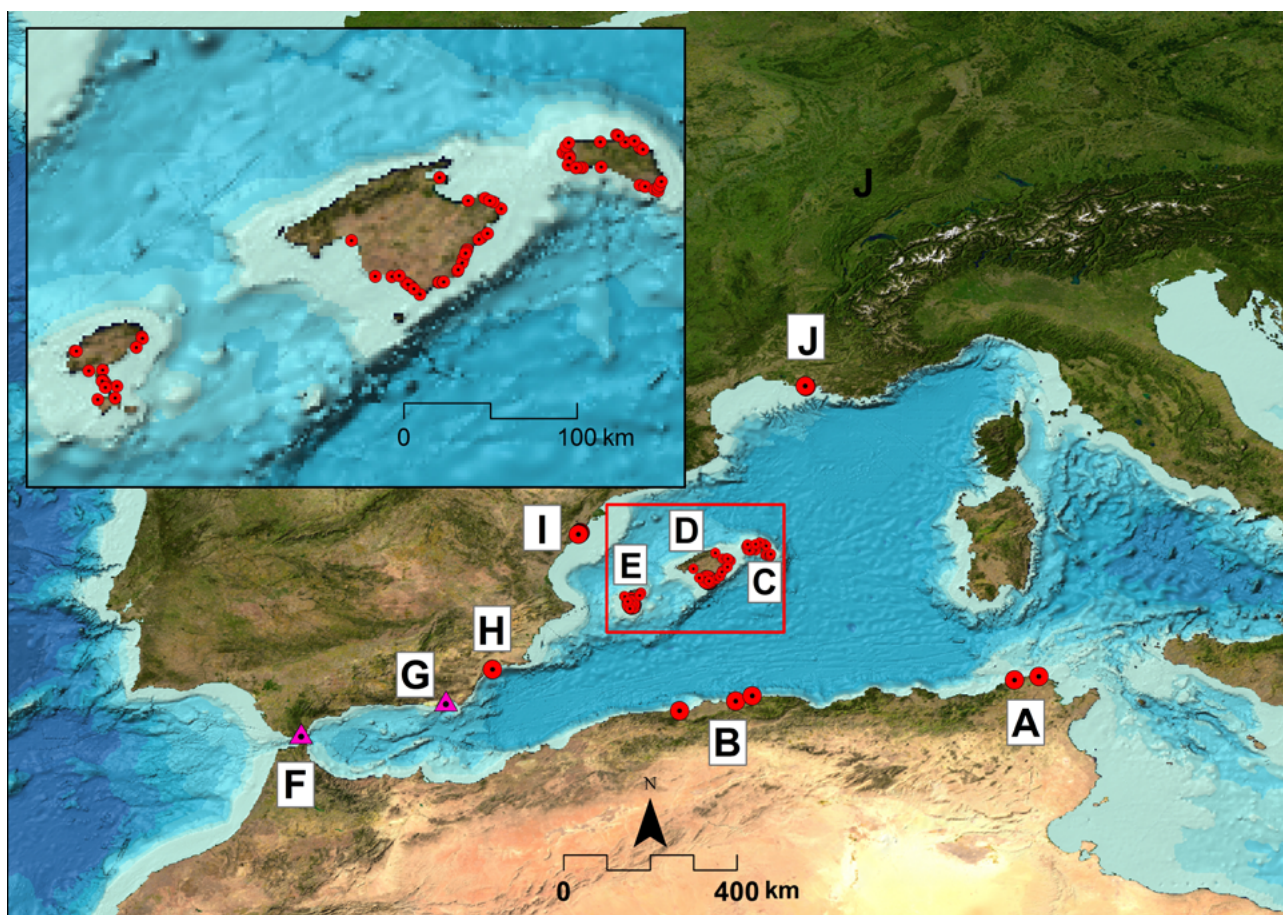
2) Nott (2003) desarrolló ecuaciones hidrodinámicas para el cálculo de la altura mínima de ola capaz de iniciar los movimientos de bloques, estableciendo tres escenarios hipotéticos para tormentas y tsunamis; bloques sumergidos, bloques sobre plataformas y bloques delimitados por fracturas. En estos tres escenarios las formulas calculan la altura necesaria que una ola ha de tener para mover o desplazar un bloque. Según Nott, las olas de tormenta necesitan ser cuatro veces más altas que las de tsunami para mover el mismo bloque, fundamentalmente debido a la diferencia de período de ola, el tipo de flujo y la masa de estas.

3) Engel y May (2012) realizan un cálculo más preciso de las densidades de los bloques, que permite inferir con mayor precisión la altura de ola. Según los autores, a las fuerzas que actúan sobre una roca delimitada por fracturas hay que añadir el factor del ángulo de la pendiente de la plataforma litoral, estimando mejor la fuerza de inercia producida por la masa de agua. Los autores tienen presente los valores reales de cada bloque, la densidad del agua marina local y la densidad de los bloques recalculadas con el coeficiente de sustentación (Nandasena *et al.*, 2011). Los parámetros utilizados en esta nueva formulación influyen significativamente en los resultados hidrodinámicos, lo que resulta en alturas de la ola más realistas. No obstante se calcula la altura de ola como si el bloque estuviera a nivel de la mar, no teniendo presente la altura de los acantilados, su morfometría, ni la batimetría existente. Roig-Munar *et al.* (2018a) aportan a las ecuaciones de Nott (2003) y Engel y May (2003) la altura del bloque analizado para determinar la altura real del flujo de *run-up* (Zhao *et al.*, 2017).

#### *Depósitos de tsunamis en el Mediterráneo occidental*

A lo largo de las costas rocosas del Mediterráneo oriental y central grandes bloques han sido reconocidos como originados por tsunamis (Scicchitano *et al.*, 2007; Mastronuzzi y Sanso, 2004; Mastronuzzi *et al.*, 2007; Biolchi *et al.*, 2015; Furlani *et al.*, 2014). Gran parte de los trabajos realizados fueron parcialmente recopilados en el conjunto de todo el Mediterráneo por Mastronuzzi (2010), Furlani *et al.* (2014), De Martini *et al.* (2020) y Scardino *et al.* (2020), cartografiando con especial interés los del Mediterráneo oriental y dejando sin estudiar gran parte de los analizados en el Mediterráneo occidental. En algunos casos estos trabajos sobre bloques asociados a tsunamis se diferenciaban mediante valores de *Transporte Figure* (Scheffers y Kelletat, 2003), que en algunos emplazamientos no alcanzan el valor 250, valor establecido por los autores como bloque de tsunami, en otros mediante la aplicación de ecuaciones (Nott, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009; Engel y May, 2012), y otros eran atribuidos cualitativamente a tsunamis por sus características. En base a la revisión bibliográfica de los enclaves del Mediterráneo occidental realizada en este trabajo se presentan las áreas donde se han analizado y publicado sedimentos asociados a tsunamis (Fig. 3), con el fin de actualizar y ampliar las cartografías existentes.





**Fig. 3.-** Ubicación de bloques y tsunamis estudiados en el Mediterráneo occidental. En círculos apreciamos bloques de tsunamis, en triángulos sedimentos de tsunamis. A. Túnez; B. Argelia; C. Menorca; D. Mallorca; E. Ibiza y Formentera (ver detalle de C a E en el mapa de la parte superior izquierda); F. Algeciras; G. Almería; H. Murcia; I. Castellón; J. Francia.

Se observa que en el mapa de distribución (Fig. 3) hay abundantes zonas con ausencia de depósitos sedimentarios de tsunamis (bloques y tsunamis), incluyendo las costas de las islas de Córcega y de Cerdeña, y zonas con escasos depósitos en las costas meridionales norafricanas y en la costa de la península Ibérica y S de Francia. Quizás este hecho hay que atribuirlo a la falta de estudios y no a la falta de depósitos, ya que en base a las modelizaciones cabría esperar la existencia de más emplazamientos de depósitos sedimentarios tsunamigénicos. Además, la fuerte urbanización litoral puede haber sido un factor clave en la destrucción y desaparición de registro tsunamigénico. Roig-Munar *et al.* (2016a) proponen un modelo evolutivo de la costa rocosa asociada a diferentes eventos de tsunami, con secuencias de episodios de arranque y deposición de bloques, dando lugar a la actual configuración de acantilados con presencia de cordones de bloques imbricados no afectados por oleaje. La preservación de los depósitos de bloques requiere la existencia de plataformas rocosas litorales con pocos grados de inclinación, así como plataformas tabulares que permitan conservar el registro morfológico de los diferentes eventos en forma de bloques. La erosión de estas áreas de acantilados, es lenta, lo que permite conservar estos registros sedimentarios en forma de bloques aislados o cordones de bloques. No se encuentran registros de bloques en las costas inestables, debido posiblemente a su dinamismo, que no permite la conservación del registro.

*Costas de las Islas Baleares (C, D y E, Fig. 3).* En las costas rocosas del Mediterráneo occidental los primeros bloques analizados en el presente trabajo se localizan en Mallorca, y fueron reconocidos como bloques de tsunami por Bartel y Kelletat (2003), Shefers y Kelletat (2003) y Kelletat *et al.* (2005), mediante la aplicación del *Transporte Figure*, asociándolos a diferentes tsunamis registrados en Baleares. No obstante, estos autores dejaron la puerta abierta a una interpretación basada en procesos mixtos de oleaje y tsunami. Femenias (2007) realizó un análisis de bloques de gran tamaño del Cap Salinas, Mallorca, con la aplicación de diferentes ecuaciones, llegando a la conclusión de que eran bloques de tsunami, y proponiendo un estudio batimétrico para detectar bloques en la zona sumergida. Siguiendo las propuestas de Femenias (2007), Corrales (2015) analizó la posible presencia de bloques en la zona sumergida del Cap Salinas, Mallorca, detectando diferentes bloques de grandes dimensiones con escaneo batimétrico, aunque no descartó que simplemente fueran bloques agrupados.

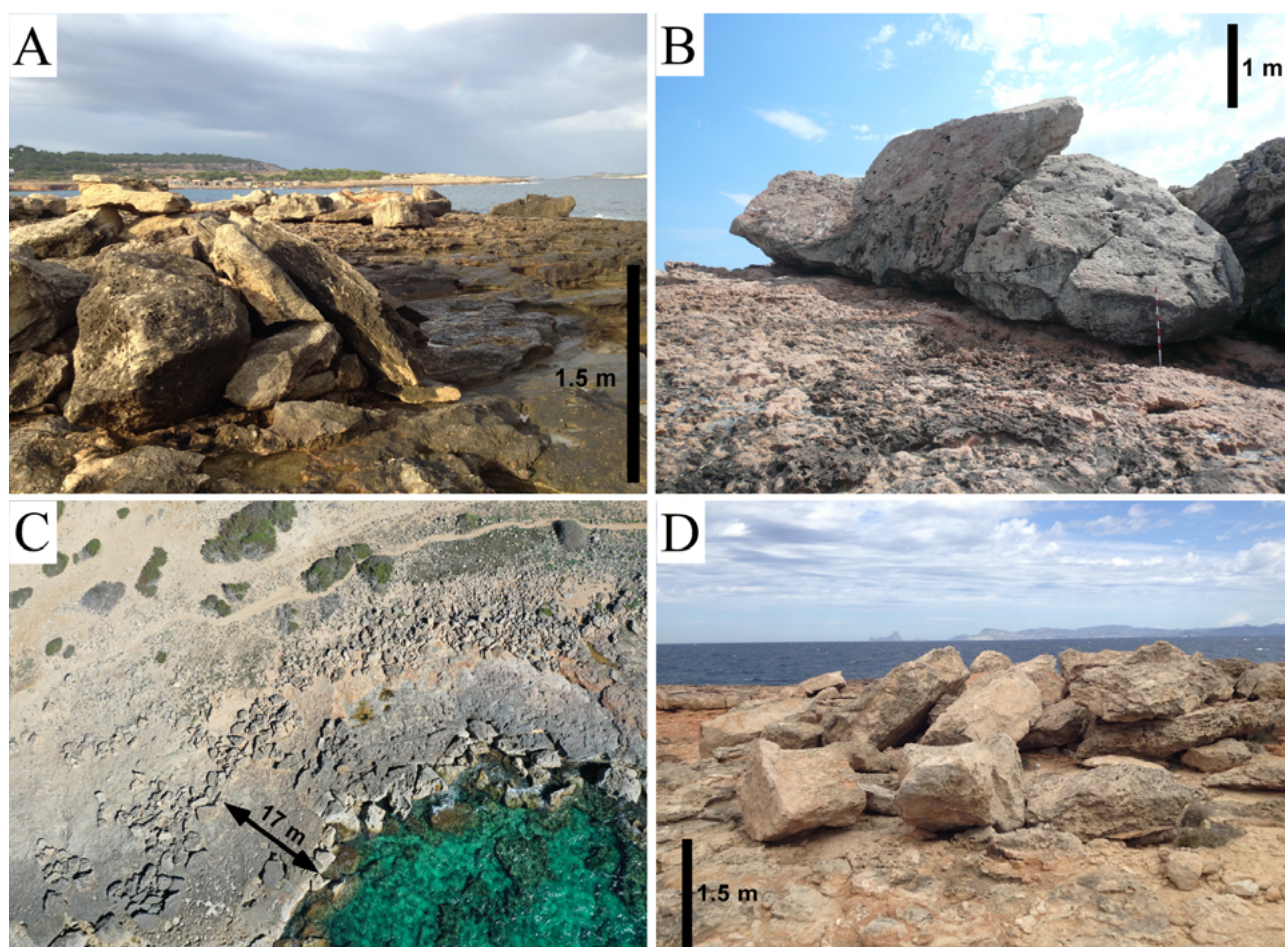
Roger y Hébert (2008) en base a la modelización de tsunamis concluyen que se requiere un estudio de depósitos de tsunamis en el Mediterráneo occidental, con especial atención a las islas Baleares, con el fin de identificar paleotsunamis, distinguiendo estos depósitos de los de tormentas, y de proponer así periodos de recurrencia. En este sentido Paris *et al.* (2010) realizaron estudios de cam-

po a lo largo de las costas de Mallorca y Menorca, donde encontraron pocas evidencias de tsunamis, identificando pequeños niveles de arenas con bioclastos marinos en tres áreas inferiores a 2 m s.n.m. y atribuyéndoles un origen tsunamigénico. Asimismo identificaron bloques a lo largo de la costa S de Mallorca, pero interpretaron que también habían podido ser sedimentados por tormentas.

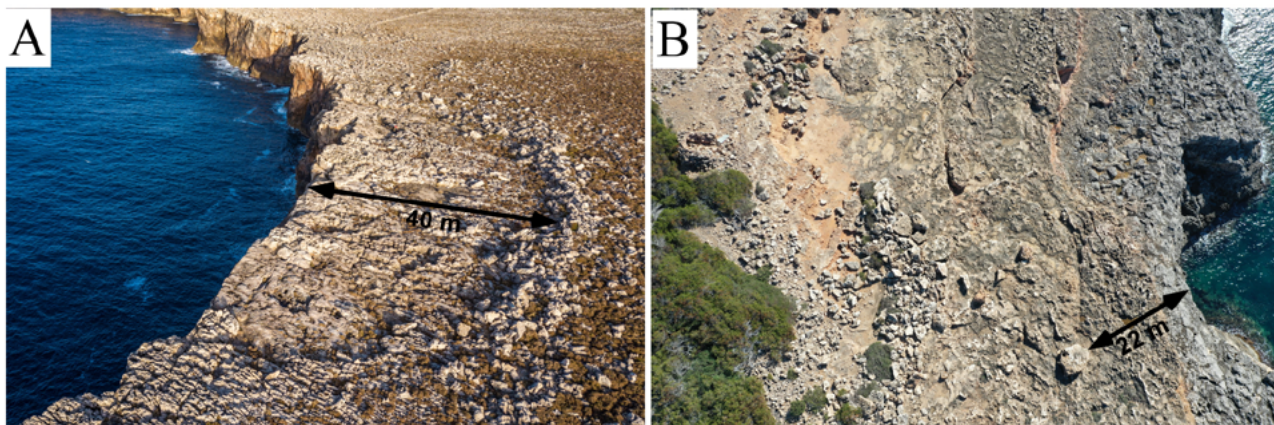
Gómez-Pujol y Roig-Munar (2013) realizaron una primera aproximación del origen de los bloques en la costa S de Menorca, atribuyéndolo a procesos de oleajes. Roig-Munar (2016) analizó 54 ubicaciones de bloques de tsunamis en las costas rocosas de Baleares (Fig. 4), definiendo seis tipos de perfiles de costa rocosa con presencia de bloques en alturas s.n.m. entre 1 y 25 m, y ubicados a distancias de hasta 195 m de la cornisa. A los bloques se les aplicaron diferentes ecuaciones (Nott, 2003; Shefers y Kelletat, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009; Engel y May, 2012), aplicando un factor de corrección de su masa y peso real, y añadiendo la altura real del bloque desplazado para determinar el *run-up*, y con ello, distinguir entre los bloques asociados a tormentas y bloques asociados a tsunamis. Además de los depósitos existentes, se identificaron localidades donde estos habían desaparecido o se encontraban modificados por causas antrópicas (Roig-Munar *et al.*, 2016b). Posteriormente Roig-Munar *et*

*al.* (2017a, 2018a, 2019a, b) ampliaron los emplazamientos de bloques a 65 localizaciones en todo el archipiélago, y aplicaron modificaciones en las ecuaciones de Shefers y Kelletat (2003), Nott (2003) y Engel y May (2012) para determinar el *run-up* de la masa asociada a los tsunamis en las costas de los acantilados, algunos superiores a 20 s.n.m. (Fig. 5). Los resultados obtenidos por Roig-Munar *et al.* (2018, 2019) determinan que los bloques se localizan según las trayectorias definidas por Roger y Hébert (2008) y por Álvarez-Gómez *et al.* (2011), y que estos son concordantes en su orientación. Así mismo, las dataciones obtenidas en los bloques analizados en las cuatro islas, mediante radiocarbono, disolución cársica y fuentes escritas, dan fechas entre 1570 y 1813 CE, ajustándose la mayoría de ellos al tsunami histórico de 1756 (Fotseré, 1918). En base a las fuentes escritas del tsunami de 1756 (Fotseré, 1918), Roig-Munar *et al.* (2017b) realizan una reconstrucción de los hechos basándose en las crónicas de la prensa local del tsunamis de 2003 CE, coincidiendo en los fenómenos descritos.

*Bahía de Algeciras* (F, Fig. 3). Becker-Heidmann *et al.* (2007) analizan tsunamitas en la bahía de Algeciras y mediante datación por radiocarbono, consideran estos sedimentos posteriores al s. XIV CE, y los correlacionan con el terremoto de 1522 de Almería ( $M > 6.5$ ), que afectó a



**Fig. 4.-** Bloques de tsunamis analizados por Roig-Munar (2016) en las costas rocosas de las islas Baleares asociados a las trayectorias de tsunamis (Figs. 1 y 2). A. Trenes de bloques imbricados en la costa de Sant Antoni, Ibiza. B. Bloques de 280 T en la isla del Aire, Menorca. C. Vista aérea de cordones de bloques en cala'n Carbó, Mallorca (Imágenes de los autores tomadas con drone). D. Cordones de bloques imbricados en Punta Gavina, Formentera.



**Fig. 5.-** Presencia de bloques de tsunami en acantilados superiores a 20 m s.n.m. A. Cordones de bloques en Punta Nati, Menorca, a 33 m s.n.m. B. Cordones de bloques en es Bancals, Mallorca, a 28 m s.n.m. (Imágenes de los autores tomadas con drone).

grandes áreas en el Mediterráneo occidental. Reicherter y Hübscher (2007) consideran que el epicentro de este evento fue en alta mar, relativamente cerca de la costa y a lo largo de la zona de fallas de Carboneras. Posteriormente, Arteaga *et al.* (2015) en unos sondeos arqueológicos en la ciudad romana de la bahía de Algeciras, identifican materiales de gravas, arenas medias y bioclastos de origen marino, y atribuyen estos sedimentos a un tsunami acaecido en el s IV BCE, que relacionan con cambios bruscos estructurales asociados a los sedimentos marinos.

*Costa de Almería* (G, Fig. 3). Reicherter y Becker-Heidmann (2008) analizan diferentes sondeos en la costa de Almería, y mediante la datación por radiocarbono de sedimentos y conchas marinas, evidencian que estos estratos pueden ser atribuibles también al terremoto de 1522 CE en Almería ( $M > 6.5$ ). Según Gracia *et al.* (2006) el terremoto de Almería de 1522 afectó a grandes áreas en el Mediterráneo occidental, con un probable epicentro en alta mar en Alborán, pero con pequeño potencial para la generación de tsunamis con afectaciones en el Golfo de Almería y el Cabo de Gata. Los resultados de estas tsunamitas indican que pueden corresponder a una de las fuentes definidas por Álvarez-Gómez *et al.* (2011) y Silva *et al.* (2015).

*Costas de Murcia y Castellón* (H e I, Fig. 3). El estudio de bloques de tsunami en las costas mediterráneas de la península Ibérica se circunscriben a los realizados en las costas rocosas

de cabo Cope, Murcia (Lario *et al.*, 2017), y las costas rocosas las sierras de Irta, Castellón (Roig-Munar *et al.*, 2018b). En el caso de Murcia se trata de bloques de gran tamaño que forman cordones imbricados a alturas de entre 1 y 4 m s.n.m., ubicados sobre acantilados de aeolianitas (Fig. 6A), y a los que se aplicaron las ecuaciones de Nott (2003) y de Engel y May (2012). Los autores atribuyen estos bloques a un tsunami generado en el Mediterráneo occidental que pudo alcanzar al menos 4 m s.n.m. de *run-up*. Las orientaciones de estos bloques serían coincidentes con los modelos con fuente tsunamítica en el N de Argelia (Álvarez-Gómez *et al.*, 2011). Para el caso de los bloques de Castellón, que previamente habían sido descritos como campos de bloques transportados por barrancos (Mateu, 1992), Roig-Munar *et al.* (2018b) describen seis áreas con presencia de bloques sobre terrazas de conglomerados a alturas entre 2 y 3,5 m s.n.m. (Fig. 5B), y que atribuyen, a partir de la aplicación de las ecuaciones de Nott (2003) y de Engel y May (2012), a procesos de tsunamis. Los autores atribuyen estos bloques a tsunamis procedentes de la fuente tsunamigénica S-1 y S-2 definidas por Álvarez-Gómez *et al.* (2011) que afecta las costas del S de Mallorca y S de Ibiza, y que penetra hacia la península entre ambas islas hasta impactar con la costa de Castellón (Fig. 2). Los 7 emplazamientos analizados en la costa peninsular presentan un patrón común de creación de cordones e imbricación atribuible a procesos de tsunami en las costas rocosas del Mediterráneo (Fig. 6).



**Fig. 6.-** Bloques de tsunamis analizados en las costas rocosas de la península Ibérica. A. Bloques imbricados en Cabo Cope, Murcia (Lairo *et al.*, 2017). B. Bloques imbricados en las sierras de Irta, Castellón (Roig-Munar *et al.*, 2018).

*Costa de Túnez* (A, Fig. 3). May *et al.* (2010) analizan dos emplazamientos con acumulaciones de grandes bloques en el sector NE de Túnez, con bloques ubicados sobre plataformas calcáreas a 4 m s.n.m., y a unos 50 m de distancia de la costa. Los autores sugieren, de forma cualitativa, y en función de la posición, distancia, imbricación de bloques, presencia de cordones y presencia de cubetas de disolución sobre los bloques, que estos están asociados a tsunamis que los arrancaron de las cornisas de los acantilados y los depositaron tierra adentro, aunque no especifican la posible fuente, y sugieren la aplicación de ecuaciones hidrodinámicas como las de Nott (2003) para discernir sus incertidumbres.

*Costa de Argelia* (B, Fig. 3). Maouche *et al.* (2009) analizan en Argelia tres emplazamientos de similares características geológicas y geomorfológicas a largo de 150 km, entre Tipasa y Dellys. Se trata de costas calcareníticas donde hay bloques agrupados e imbricados en forma de cordones con presencia de organismos marinos incrustados; algunos de estos bloques pesan 200 T. Los autores aplican las ecuaciones de Nott (2003) y establecen que los bloques son atribuibles a grandes olas de carácter catastrófico en base a otros estudios realizados en el Mediterráneo, sugiriendo procesos de tormenta y/o tsunami. El análisis realizado mediante radiocarbono data organismos marinos entre el 419 y el 1700 CE, que según los autores, y en base al catálogo de terremotos de Argelia, serían coincidentes con dos terremotos en 1716 y 1773 CE, asociados a la generación del evento de tsunami en el mar de Alborán.

*Costa del S de Francia* (J, Fig. 3). Vella *et al.* (2011) analizan la presencia de bloques en el S de Francia, en la Provenza, Golfo de León, sobre materiales calcáreos del Mioceno. Se trata de acumulaciones de bloques aislados, y algunos imbricados en forma de cordones a alturas medias de 2,8 m s.n.m. y distancias medias de 15 m. Los autores analizan numerosos bloques con radiocarbono, obteniendo un variado rango de edades (entre 2100 BCE y 1292 CE), y deduciendo la posibilidad de los efectos combinados de tsunamis y tormentas para explicar las acumulaciones. Aunque los autores atribuyen los bloques a la existencia de eventos de tormentas excepcionales, sin embargo, no excluyen el impacto de eventos de tsunami. Posteriormente Shah-Hosseini *et al.* (2013) aplicaron las ecuaciones de Nott (2003) y Engel y May (2012) a los bloques analizados por Vella *et al.* (2011), concluyendo que podrían haber sido desplazados inicialmente por una ola de tsunami de 3,5 m de altura. Según los autores los modelos de propagación de tsunamis no son compatibles con la situación de los bloques, y apuestan más por el impacto repetido de olas extremas. No obstante sí existen modelos que indican trayectorias de tsunamis que afectan al S de Francia (Roger y Hébert, 2008; Álvarez-Gómez *et al.*, 2011; de Heidarzadeh *et al.*, 2019) y que pueden explicar la presencia de estos bloques (Figs. 1 y 2). Posteriormente Piscitelli *et al.* (2017) analizan una área cercana, ubicada entre la bahía de Bonnieu y la de Chariot, Marsella, con presencia de grandes bloques, con pesos máximos de 35 T, colocados hasta 10 m de la costa y aproximadamente a 2 m s.n.m. A estos se les aplicaron las ecuaciones de Piscitelli *et al.* (2009), y Engel y May (2012), atribuyéndolos

al impacto de una fuerte tormenta en las últimas dos décadas, sustentándose en la interpretación de fuentes orales e imágenes aéreas. Por tanto, los depósitos de estas dos áreas del S de Francia están aún hoy en discusión sobre su origen de tsunami o tormenta. De hecho los autores minimizan los efectos de tsunamis que desde 1755 CE han afectado la costa de Marsella. Uno de estos episodios, el de 1812, podría haber sido el responsable de los bloques datados por Vella *et al.* (2011) y Shah-Hosseini *et al.* (2013), aunque en estos trabajos se postula más por diferentes secuencias de oleajes de gran energía, discordantes con las recientes modelizaciones numéricas de trayectorias de tsunamis realizadas en el Mediterráneo occidental con afectación a la costa del S de Francia (Schendelé *et al.*, 2014, 2015; Gaillier *et al.*, 2018).

## Conclusiones

El presente trabajo refleja todos los emplazamientos analizados en el Mediterráneo occidental asociados a tsunamis, donde todas las localizaciones descritas son compatibles con las modelizaciones realizadas con fuentes tsunamigénicas procedentes del N de Argelia, y se enmarcan dentro de un período desde el s. IV BCE a 1700 CE. La presencia de estos depósitos no invalida la existencia de otros que han podido ser destruidos por acciones antrópicas o por eventos de tsunamis de mayor intensidad que han modificado el registro precedente, o bien han sido ignorados por desconocimiento, ya que el campo del estudio de bloques de tsunami es relativamente reciente.

A lo largo de toda la costa mediterránea, la evidencia morfológica y sedimentológica, así como las fuentes escritas y registros arqueológicos, atestiguan el impacto generado por eventos de tsunamis, muchos de ellos catalogados, y estudiados mediante modelizaciones numéricas, aunque esta línea de investigación es relativamente reciente, ya que los primeros trabajos son del 2003.

Todos los bloques o campos de bloques analizados presentan un patrón común (Figs. 4, 5 y 6), se encuentran sobre acantilados rocosos estables y presentan agrupaciones y/o cordones de bloques imbricados. Todos los estudios revisados en este trabajo los asocian a tsunamis, tanto con valores cualitativos como con valores cuantitativos mediante el uso de ecuaciones y dataciones, hecho que refuerza el proceso de imbricación como patrón de sedimentación de bloques en el Mediterráneo occidental, concordante con los resultados de los patrones de imbricación del Mediterráneo oriental. Por tanto la imbricación se presenta como una característica asociada a tsunamis en el Mediterráneo y representa un claro indicador cualitativo.

Los emplazamientos de tsunamis se ubican en fondos de bahías y presentan el patrón de presencia de sedimentos marinos gruesos en zonas interiores, concordante con las estructuras sedimentarias analizadas en el Mediterráneo oriental, y correspondientes a zonas de rotura de barras, cordones dunares y/o marismas.

La distribución conocida de los bloques y su relación con los modelos evidencia la necesidad de estimar los peligros, riesgos y vulnerabilidades asociadas al litoral, y evaluar con precisión el riesgo de tsunami al que están expues-

tas las costas antropizadas del occidente mediterráneo. La ampliación de estudios de bloques y tsunamitas, ayudaría a mejorar la comprensión de los peligros de tsunami y la vulnerabilidad de la costa, para poder realizar una cartografía detallada de espacios afectados y con registro sedimentario y aplicar planes de gestión.

La presencia de bloques y tsunamitas asociados a las trayectorias modelizadas, demanda ampliar los estudios a todas las costas rocosas y sedimentarias del Mediterráneo occidental. La búsqueda de estos depósitos está directamente relacionada con las múltiples modelizaciones existentes y con unas características geológicas y geomorfológicas de la costa en la que impacta en tsunami.

La escasa bibliografía asociada a tsunamitas en las costas del Mediterráneo occidental nos lleva a replantear una reinterpretación de los trabajos sedimentológicos existentes, especialmente en aquellos trabajos focalizados en sondeos en zonas húmedas y costas bajas, y también en trabajos sobre depósitos pleistocenos y cuaternarios. Existe la posibilidad de que algunos niveles estudiados en Valencia (Fumaral *et al.*, 1993; Viñals *et al.*, 1993; Sanjaume y Carmona, 1995; Segura, 1995; Segura *et al.*, 1995) hayan sido interpretados como tempestitas o como roturas de barras y dunas por oleajes extraordinarios, sin dar lugar a la interpretación de tsunamis. Viñals *et al.* (1993) habla de sedimentos gruesos asociados a rotura de barras litorales, y Segura *et al.* (1995) mencionan acumulaciones de arenas de grano grueso de origen marino en las zonas húmedas interiores en Castellón. En este sentido debe prestarse atención a las zonas afectadas por las trayectorias de tsunamis definidas en los modelos y que presentan costas bajas rocosas y estables, así como costas sedimentarias como sistemas dunares, albuferas o deltas.

Retomando las sugerencias de Roger y Hébert (2008), y que fueron recogidas en las islas Baleares por Roig-Munar (2016), se requiere seguir con los estudios de depósitos de tsunami en el conjunto de la costa rocosa y sedimentaria del Mediterráneo occidental, con el fin de identificar y datar paleotsunamis, y así estimar períodos de recurrencia más precisos. Así mismo se abre la puerta a nuevas líneas de investigación relacionadas con sedimentos asociados a zonas litorales arenosas, zonas húmedas o yacimientos arqueológicos litorales, ya que este sedimento, según Scheffers y Kelletat (2003), ha sido ampliamente ignorado.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a los dos revisores anónimos y a una tercera revisora, la Dra. Teresa Bardají, las correcciones y sugerencias realizadas del manuscrito, las cuales consideramos que han ayudado en gran medida a la mejora y comprensión del trabajo. Así mismo dar especialmente las gracias a la editora de la revista, la Dra. Beatriz Bádenas, por su apoyo y por sus últimas correcciones que han contribuido al resultado final del manuscrito. También queremos agradecer al Dr. Juan Antonio Morales de la Univ. de Huelva, y actual presidente de la Sociedad Geológica de España, su apoyo siempre incondicional a la temática tratada en este trabajo.

## Referencias

- Alasset, J.P., Hébert, H., Maouche, S., Calbini, V., Meghraoui, M., 2006. The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw p 6.9 Algeria): modelling and results. *Geophysical Journal International*, 166: 213-226.
- Álvarez-Gómez, J.A., Olabarrieta, M., González, M., Otero, L., Carreño, E., Martínez-Solares, J.M., 2010. The impact of tsunamis on the Island of Majorca induced by North Algerian seismic sources. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19: 367-383.
- Álvarez-Gómez, J.A., Aniel-Quiroga, I., González, M., Otero, L., 2011. Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 227-240.
- Arteaga, C., Blánquez, J., Roldán, L., 2015. Consideraciones paleogeográficas en la bahía de Algeciras. Acerca de un posible tsunami en la Cateria romana de San Roque, Cádiz. *Cuaternario y Geomorfología*, 29 (1): 137-156.
- Barbano, M.S., Pirrotta, C., Gerardi, F., 2010. Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits?. *Marine Geology*, 275: 140-154.
- Bartel, P., Kelletat, D., 2003. Erster Nachweis holozäner Tsunamis im Westlichen Mittelmeergebiet (Mallorca, Spanien) mit einem Vergleich von Tsunami und Sturmwellenwirkung auf Festgesteinsküsten. *Berichte Forschungszentrum Westküste*, 28, Büsseldorf: 93-107.
- Becker-Heidmann, P., Reicherter, K., Silva, P.G., 2007. 14C dated charcoal and sediment drilling cores as first evidence of Holocene tsunamis at the Southern Spanish coast. *Radiocarbon*, 49 (2): 827-835.
- Benner, R., Browne, T., Brückner, H., Kelletat, D., Scheffers, A., 2010. Boulder Transport by Waves: Progress in Physical Modelling. *Zeitschrift für Geomorphologie*, SI, 54 (3): 127-146.
- Biolchi, S., Furlani, S., Antonioli, F., Baldassini, N., Causon Deguara, J., Devoto, S., Di Stefano, A., Evans, J., Gambin, T., Gauci, R., Mastronuzzi, G., Monaco, C., Scicchitano, G., 2015. Boulder accumulations related to extreme wave events on the eastern coast of Malta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 5977-6019.
- Bourgeois, J., Macinnes, B., 2010. Tsunami boulder transport and other dramatic effects of the 15 November 2006 central Kuril Islands tsunami on the island of Matua. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementary Issues*, 54: 175-195.
- Bryant, E., 2001. *Tsunami. The underrated hazard*. Cambridge University Press, Cambridge, 320 p.
- Campos Romero, M.L., 1992. *El riesgo de Tsunamis en España. Análisis y valoración geográfica*. Instituto Geográfico Nacional, Monografías, núm. 9, 204 p.
- Canals, M., Lastras, G., Urgeles, R., Casamor, J.L., Mienert, J., Cattaneo, A., De Batist, M., Hafliadason, H., Imbo, Y., Laberg, J.S., Locat, J., Long, D., Longva, O., Masson, D.G., Sultan, N., Trincardi, F., Bryn, P., 2004. Slope failure dynamics and impact from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project. *Marine Geology*, 213: 9-72.
- Cañelles, B., Orfila, A., Méndez, F.J., Menéndez, M., Tintoré, J., 2007. Application of a POT model to estimate the extreme significant wave height levels around the Balearic Sea (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, SI, 50: 329-333.
- Corrales, O., 2015. Geomorfología submarina de la plataforma continental davant del cap de Ses Salines, Mallorca. Memòria del Treball de Final de Grau, Universitat de Barcelona, 35 p.
- Cox, R. 2020. Megagravel deposits on the west coast of Ireland show the impacts of severe storms. *Weather*, 75 (3): 72-77.
- Cox, R., Jahn, K.L., Watkins, O.O., Cox, P., 2018. Extraordinary boulder transport by storm waves (west of Ireland, Winter

- 2013–2014), and criteria for analysing coastal boulder deposits. *Earth Science Reviews*, 177: 623–636.
- Cox, R., Arduin, F., Dias, F., Autret, R., Beisiegel, N., Earlie, C.S., Herterich, J.G., Kennedy, A., Paris, R., Raby, A., Schmitt, P., Weiss, R., 2020. Systematic review shows that work done by storm waves can be misinterpreted as tsunami-related because commonly used hydrodynamic equations are flawed. *Frontiers in Marine Science*, 7: 1–18.
- Dawson, A.G., 1994. Geomorphological effects of tsunami run-up and backwash. *Geomorphology*, 10: 83–94.
- Dawson, S., Smith, D.E., 2000. The sedimentology of mid-Holocene tsunami facies in northern Scotland. *Marine Geology*, 170: 69–79.
- De Martini, P.M., Graziani, L., Maramai, A., Orefice, S., Pantosti, D., Smedile, A., 2020. Tsunamis in the Mediterranean Sea. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 1–17.
- Einsele, G., Chough, S.K., Shiki, T., 1996. Depositional events and their records; an introduction. *Sedimentary Geology*, 104: 1–9.
- Engel, M., May, S.M., 2012. Bonaire's boulder fields revisited: Evidence for Holocene tsunami impact on the Lee-ward Antilles. *Quaternary Science Reviews*, 54: 126–141.
- Etienne, S., Paris, R., 2010. Boulder accumulations related to storms on the south coast of the Reykjanes Peninsula (Iceland). *Geomorphology*, 114: 55–70.
- Femenias, J., 2007. Els grans blocs de Cap de Salines (Mallorca): Estudi sedimentològic i dinàmic. Treball Final de Carrera. Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, 39 p.
- Fokaefs, A., Papadopoulos, G.A., 2007. Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in Cyprus and the Levantine Sea. *Natural Hazards*, 40 (3): 503–526.
- Fontseré, E., 1918. Notas sueltas de sismología Balear. *Publicaciones de la Sección de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona*, 5–12.
- Fumaral, M.P., Mateu, G., Rey, J., Somoza, L., Viñals, M.J., 1993. Las unidades morfosedimentarias cuaternarias del litoral del Cap de la Nau (Valencia-Alicante) y su correlación con la plataforma continental. En: *Estudios sobre Cuaternario: Medios sedimentarios, cambios ambientales, hábitat humano*, (M.P. Fumaral, J. Bernabeu, Eds). Univ. de València, 53–64.
- Furlani, S., Pappalardo, M., Gómez-Pujol, Ll., Chelli, A., 2014. The rock coast of the Mediterranean and Black seas. *Geological Society, London, Memoirs*, 40: 89–123.
- Galbis, R.J., 1932. *Catálogo sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 50°E y 20°W de Greenwich y los paralelos 45° y 25°N*. Dirección General del Instituto Geográfico, Catastral y de Estadística, 2 tomos, 807 p. y 277 p.
- Gailler, A., Hébert, H., Schindelé, F., Reymond, D., 2018. Coastal Amplification Laws for the French Tsunami Warning Center: Numerical Modeling and Fast Estimate of Tsunami Wave Heights Along the French Riviera. *Pure and Applied Geophysics*, 175: 1429–1444.
- Goff, J., Chagué-Goff, C., Nichol, S., 2001. Palaeotsunami deposits: a New Zealand perspective. *Sedimentary Geology*, 143: 1–6.
- Goff, J., McFadgen, B.G., Chagué-Goff, C., 2004. Sedimentary differences between the 2002 Easter storm and the 15th-century Okoropunga tsunami, southeastern North Island, New Zealand. *Marine Geology*, 204: 235–250.
- Gómez-Pujol, Ll., Roig-Munar, F.X., 2013. Acumulaciones de grandes bloques en las crestas de los acantilados del sur de Menorca (Illes Balears): observaciones preliminares. *Geo-Temas*, 14: 71–74.
- Goto, K., Chavanich, S.A., Imamura, F., Kunthasap, P., Matsui, T., Minoura, K., Sugawara, D., Yanagisawa, H., 2007. Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Sedimentary Geology*, 202: 821–837.
- Goto, K., Okada, K., Imamura, F., 2009. Characteristics and hydrodynamics of boulders transported by storm waves at Kudaka Island, Japan. *Marine Geology*, 262: 14–24.
- Goto, K., Shinozaki, T., Minoura, K., Okada, K., Sugawara, D., Imamura, F., 2010. Distribution of boulders at Miyara Bay of Ishigaki Island, Japan: A flow characteristic indicator of tsunami and storm waves. *Island Arc*, 19: 412–426.
- Gracia, E., Pallàs, R., Soto, J.I., Comas, M., Moreno, X., Masana, E., Santanach, P., Diez, S., García, M., Dañobeitia, J., 2006. Active faulting offshore SE Spain (Alboran Sea). Implications for earthquake hazard assessment in the Southern Iberian Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 241: 734–749.
- Hall, A.M., 2011. Storm wave currents, boulder movement and shore platform development: a case study from East Lothian, Scotland. *Marine Geology*, 283: 98–105.
- Hall, A.M., Hansom, J.D., Jarvis, J., 2008. Patterns and rates of erosion produced by high energy wave processes on hard rock headlands: The Grind of the Navir, Shetland, Scotland. *Marine Geology*, 248: 28–46.
- Harbi, A., Benouar, D., Benhallou, H., 2003. Re-appraisal of Seismicity and Seismotectonics in the North-Eastern Algeria, Part I: Review of Historical Seismicity. *Journal of Seismology*, 7, 1: 115–136.
- Hébert, H., Alasset, P.J., 2003. The Tsunami Triggered by the 21 May 2003 Algiers Earthquake. *EMSC Newsletter, Centre Sismologique Euro-Méditerranéen*, 20: 10–12.
- Heidarzadeh, M., Wang, Y., Satake, K., Mulia, I.E., 2019. Potential deployment of offshore bottom pressure gauges and adoption of data assimilation for tsunami warning System in the western Mediterranean Sea. *Geoscience Letters*, 6: 19.
- Henares, J., López Casado, C., Sanz de Galdeano, C., Delgado, J., Peláez, J.A., 2003. Stress Fields in the Iberian-Maghrebi Region. *Journal of Seismology*, 7-1: 65–78.
- Hori, K., Kuzumoto, R., Hirouchi, D., Umitsu, M., Janjirawuttikul, N., Patanakanog, B., 2007. Horizontal and vertical variation of 2004 Indian tsunami deposits: an example of two transects along the western coast of Thailand. *Marine Geology*, 239 (3-4): 163–172.
- Iglesias, O., 2015. Generación y propagación de tsunamis en el mar catalano-balear. Tesis Doctoral, Univ. Barcelona, 247 p.
- Iglesias, O., Lastras, G., Canals, M., Olabarrieta, M., González, M., Aniel-Quiroga, I., Otero, L., Durán, R., Amblas, D., Casamor, J.L., Tahchi, E., Tinti, S., De Mol, B., 2012. The BIG'95 Submarine Landslide-Generated Tsunami: A Numerical Simulation. *Journal of Geology*, 120 (1): 31–48.
- Imamura, F., Goto, K., Ohkubo, S., 2008. A numerical model for the transport of a boulder by tsunami. *Journal of Geophysical Research*, 113, 7: 1–12.
- Kelletat, D., Whelan, F., Bartel, P., Scheffers, A., 2005. New Tsunami evidences in Southern Spain Cabo de Trafalgar and Mallorca Island. En: *Geomorfologia Litoral i Quarternari, Homenatge al professor Vincenç M. Rosselló i Verger*, (E. Sanjaume, J.F. Matheu, Eds). Universitat de València, Spain, 215–222.
- Lario, J., Luque, L., Zazo, C., Goy, J.L., Spencer, C., Cabero, A., Bardají, T., Borja, F., Dabrio, C.J., Civis, J., González-Delgado, J.A., Borja, C., Alonso-Azcárate, J., 2010. Tsunami vs. Storm surge depósitos: a review of the sedimentological and geomorphological records of extreme wave eventos (EWE) during the Holocene in the Gulf of Cádiz, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 54, Suppl. 3: 301–316.
- Lario, J., Zazo, C., Goy, J.L., Silva, P.G., Bardají, T., Cabero, A., Dabrio, C.J., 2011. Holocene palaeotsunami catalogue of SW Iberia. *Quaternary International*, 242: 196–200.
- Lario, J., Barjadí, T., Silva, P.G., Zazo, C., Goy, J.L., 2016. Improving the coastal record of tsunamis in the ESI-07 scale: Tsunami Environmental Effects Scale (TEE-16 scale). *Geo-*

- logica Acta*, 14, 2: 179-193.
- Lario, J., Bardají, T., Spencer, C., Marchante, A., 2017. Eventos de oleaje extremo en la costa del sureste peninsular: bloques y megabloques como indicadores de tsunamis o tormentas extremas. *Geo-Temas*, 17: 227-230.
- Lastras, G., Canals, M., Amblas, D., Frigola, J., Urgeles, R., Calafat, A.M., Acosta, J., 2007. Slope instability along the northeastern Iberian and Balearic continental margins. *Geologica Acta*, 5 (1): 35-47.
- Lorang, M., 2000. Predicting the threshold entrainment mass for a boulder. *Journal of Coastal Research*, 16 (2): 432-445.
- Luque, L., Lario, J., Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Silva, P.G., 2001. Tsunami deposits as palaeoseismic indicators: examples from the Spanish coast. *Acta Geologica Hispanica*, 36: 197-211.
- MacInnes, B.T., Bourgeois, J., Pinegina, T., Kravchunovskaya, E.A., 2009. Tsunami geomorphology: Erosion and deposition from the 15 November 2006 Kuril Island tsunami. *Geology*, 37: 995-998.
- Maouche, S., Morhange, C., Meghraoui, M., 2009. Large boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. *Marine Geology*, 262: 96-104.
- Maramai, A., Brizuela, B., Graziani, L., 2014. The Euro-Mediterranean tsunami Catalogue. *Annals of Geophysics*, 57 (4): S0435.
- Marone, F., Van Der Lee, S., Giardini, D., 2004. Three-Dimensional Upper-Mantle S-Velocity Model for the Eurasia-Africa Plate Boundary Region. *Geophysical Journal International*, 158-1: 109-130.
- Martínez-Solares, J.M., 2001. *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, 756 p.
- Martínez-Solares, J.M., Mezcuá-Rodríguez, J., 2002. *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a. C.-1990)*. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, 253 p.
- Mastronuzzi, G., 2010. Tsunami in Mediterranean Sea. The Egyptian. *Journal of Environmental Change*, 2: 1-12.
- Mastronuzzi, G., Sanso, P., 2004. Large Boulder Accumulations by Extreme Waves along the Adriatic Coast of Southern Apulia (Italy). *Quaternary International*, 120: 173-184.
- Mastronuzzi, G., Pignatelli, C., Sanso, P., 2006. Boulder Fields: A valuable morphological indicator of paleotsunami in the mediterranean sea. *Zeitschrift für Geomorphologie, NF Suppl.-Bd.*, 146: 173-194.
- Mastronuzzi, G., Pignatelli, C., Sanso, P., Selleri, G., 2007. Boulder accumulations produced by the 20th February 1743 tsunami along the coast of SouthEastern Salento (Apulia region, Italy). *Marine Geology*, 242: 191-205.
- Mateu, J.F., 1982. El norte del País Valencià, geomorfología litoral y prelitoral. *Universitat de València, secció de Geografia, València*, 285 p.
- May, S.M., Willershauser, T., Vött, A., 2010. Boulder transport by high-energy wave events at Cap Bon (NE Tunisia). En: *From Brazil to Thailand – New Results in Coastal Research*, (K. Schwarzer, K. Schrottke, K. Statterger, Eds.). *Coastline Reports*, 16: 1-10.
- Michetti, A.M., Esposito, E., Guerrieri, L., Porfido, S., Serva, L., Tatevossian, R., Vittori, E., Audemard, F., Azuma, T., Clague, J., Comerci, V., Gurbinar, A., McCalpin, J., Mohammadioun, B., Morner, N.A., Ota, Y., Roghazin, E., 2007. Intensity Scale ESI 2007. En: *Memorie Descrittive Carta Geologica d'Italia, 74*, (L. Guerrieri, E. Vittori, Eds.). Servizio Geologico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Roma, 53 p.
- Morales, J.A., Borrego, J., San Miguel, E.G., López-González, N., Carro B., 2008. Sedimentary record of recent tsunamis in the Huelva Estuary (southwestern Spain). *Quaternary Science Reviews*, 27: 734-746.
- Nandasena, N.A.K., Paris, R., Tanaka, N., 2011. Reassessment of hydrodynamic equations to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis). *Marine Geology*, 281:70-84.
- Nichol, S.L., Lian, O.B., Carter, C.H., 2003. Sheet-gravel evidence for a late Holocene tsunami run-up on beach dunes, Great Barrier Island, New Zealand. *Sedimentary Geology*, 155: 129-145.
- Nott, J., 1997. Extremely high-energy wave deposits inside the Great Barrier Reef, Australia: determining the cause – tsunami or tropical cyclone. *Marine Geology*, 141: 193-207.
- Nott, J., 2003. Tsunami or storm waves? Determining the origin of a spectacular field of wave emplaced boulders using numerical storm surge and wave models and hydrodynamic transport equations. *Journal of Coastal Research*, 19: 348-356.
- Papadopoulos, G.A., 2002. Tsunamis in the East Mediterranean: A Catalogue for the Area of Greece and Adjacent Seas. *Proceedings of Joint IOC-IUGG International Workshop on Tsunami Risk Assessment beyond: Theory, Practice and Plans. Moscow, Russia*: 34-42.
- Papadopoulos, G., Fokaefs, A., 2005. Strong tsunamis in the Mediterranean Sea: A re-evaluation, ISET. *Journal of Earthquake Technology*, 42, 159-170.
- Paris, R., Wassmer, P., Sartohadi, J., Lavigne, F., Barthomeuf, B., Desgages, E., Grancher, D., Baumert, P., Vautier, F., Brunstein, D., Gómez, C., 2009. Tsunamis as geomorphic crises: lessons from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, West Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Geomorphology*, 104: 59-72.
- Paris, R., Wassmer, P., Roger, J., Loevenbruck, A., 2010. Tsunami deposits in the Balearic Islands (Western Mediterranean) and implications for hazard assessment. *Geophysical Research Abstracts*, 12: 1896.
- Pérez-Alberti, A., Trenhaile, A.S., 2015. Clast mobility within boulder beaches over two winters in Galicia, northwestern Spain. *Geomorphology*, 248: 411-426.
- Pignatelli, C., Sanso, P., Mastronuzzi, G., 2009. Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260: 6-18.
- Piscitelli, A., Milella, M., Hippolyte, J.C., Shah-Hosseini, M., Morhange, C., Mastronuzzi, G., 2017. Numerical approach to the study of coastal boulders: The case of Martigues, Marseille, France. *Quaternary International*, 439: 52-64.
- Reicherter, K., Becker-Heidmann, P., 2008. Tsunamites in lagoons: remains of the 1522 Almería earthquake (western Mediterranean). *2nd International Tsunami Field Symposium IGCP Project 495 Quaternary Land-Ocean Interactions: Driving Mechanisms and Coastal Responses Ostuni (Italy) and Ionian Islands (Greece)*: 127-129.
- Reicherter, K., Hübscher, C., 2007. Evidence for a seafloor rupture of the Carboneras Fault Zone (southern Spain): relation to the 1522 Almería earthquake?. *Journal of Seismology*, 11 (1): 15-26.
- Rodríguez, M., Maleuvre, C., Jollivet-Castelot, M., d'Acremont, E., Rabaute, A., Lafosse, M., Ercilla, G., Tomás-Vázquez, J., Alonso, B., Ammar, A., Gorini, C., 2017. Tsunamigenic submarine landslides along the Xauen-Tofiño Banks in the Alboran Sea (WesternMediterranean Sea). *Geophysical Journal International*, 209: 266-281.
- Roger, J., Hébert, H., 2008. The 1856 Djiielli (Algeria) earthquake and tsunami source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 721-731.
- Roig-Munar, F.X., 2016. Blocs de tempesta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfològica. Tesis doctoral, Univ. Barcelona, 410 p.
- Roig-Munar, F.X., Vilaplana, J.M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.Á., Gelabert, B., 2016a. Indicadores geomorfolò-

- gicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Geo-Temas*, 16 (1): 641-64.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.Á., Vilaplana, J.M., Gelabert, B., 2016b. El uso de bloques de tormenta y de tsunami como materia prima en las islas Baleares. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29 (2): 79-88.
- Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B., Vilaplana, J.M., 2017a. Análisis morfométrico de bloques de tsunami en la isla de Formentera, islas Baleares. *Cuaternario y Geomorfología*, 31 (3-4): 73-96.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.Á., Vilaplana, J.M., Gelabert B., 2017b. Bloques en plataformas rocosas y acantilados del SE de Menorca: tipología y procesos. En: *Geomorfología litoral de Menorca: dinámica, evolución y prácticas de gestión*, (L. Gómez-Pujol, G.X. Pons, Eds). Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 25: 47-66.
- Roig-Munar, F.X., Vilaplana, J.M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.Á., Gelabert, B., 2018a. Tsunamis boulders on the rocky shores of Minorca (Balearic Islands). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 1985-1998.
- Roig-Munar, F.X., Forner, E., Martín-Prieto, J.Á., Segura, J., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B., Vilaplana, J.M., 2018b. Presència de blocs de tsunamis i tempestes a les costes rocoses de la serra d'Irta (el Baix Maestrat, País Valencià). *Nemus*, 8:7-28.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, J.M., Martín-Prieto, J.Á., Gelabert, B., Vilaplana, N., 2019a. Tsunami boulders in Majorca Island (Balearic Islands, Spain). *Geomorphology*, 334: 76-90.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Vilaplana, J.M., Martín-Prieto, J.Á., Gelabert, B., 2019b. Tsunami Boulders on the Rocky Coasts of Ibiza and Formentera (Balearic Islands). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7: 327.
- Sahal, A., Roger, J., Allgeyer, S., 2009. The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1823-1834.
- Sanjaume, E., Carmona, P., 1995. L'Albufera de València: rasgos geomorfológicos y evolución cuaternaria. En: *El cuaternario del País valenciano*. Ed. Universitat de Valencia, 155-162.
- Sawai, Y., 2002. Evidence for 17th-century tsunamis generated on the Kuril-Kamchatka subduction zone, Lake Tokotan, Hokkaido, Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 903-911.
- Scardino, G., Piscitelli, A., Milella, M., Sansò, P., Mastronuzzi, G., 2020. Tsunami fingerprints along the Mediterranean coasts. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 1-16.
- Scheffers, A., Kelleat, D., 2003. Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Reviews*, 63: 83-92.
- Schindelé, F., Gailler, A., Gutierrez, E., Hébert, H., Hernandez, B., Loevenbruck, A., Roudil P., 2014. Les défis de l'alerte tsunami en Méditerranée. *Revue scientifique et technique de la Direction des applications militaires*, 45: 43-50.
- Schindelé, F., Gailler, A., Hébert, H., Loevenbruck A., Gutierrez, E., Monnier, A., Roudil, P., Reymond, D., Rivera, L., 2015. Implementation and Challenges of the Tsunami Warning System in the Western Mediterranean. *Pure and Applied Geophysics*, 17: 821-833.
- Scicchitano, G., Monaco, C., Tortorici, L., 2007. Large Boulder deposits by tsunami along the Ionian coast of south-eastern Sicily (Italy). *Marine Geology*, 238: 75-91.
- Shah-Hosseini, M., Morhange, C., De Marco, A., Wante, J., Anthony, E.J., Sabatier, F., Mastronuzzi, G., Pignatelli, C., Piscitelli, A., 2013. Coastal boulders in Martigues, French Mediterranean: evidence for extreme storm waves during the Little Ice Age. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57, Suppl. 4: 181-199.
- Segura, F., Sanjaume, E., Pardo, J., 1995. Evolución cuaternaria de las albuferas del sector septentrional del Golfo de Valencia. En: *El cuaternario del País valenciano*. Ed. Universitat de Valencia, 139-153.
- Silva, P.G., Rodríguez Pascual. M.A., Eds., 2019. *Catálogo de los efectos Geológicos de los terremotos en España, 2ª Ed. (Revisada y Ampliada)*. Serie Riesgos Geológicos y Geotecnia nº6, Instituto Geológico y Minero de España, 806 p.
- Silva, P.G., Bardají, T., Roquero, E., Martínez-Graña, A., Perucha, M.A., Huerta, P., Lario, J., Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Cabero, A., Goy, J.L., Zazo, C., 2015. Seismic palaeogeography of coastal zones in the Iberian Peninsula: Understanding ancient and historic earthquakes in Spain. *Cuaternario y Geomorfología*, 29 (1-2): 31-56.
- Soloviev, S.L., Solovieva, O.N., Go, C.N., Kim, K.S., Shchetnikov, N.A., 2000. *Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D.* Advances in Natural and Technological Hazards Research, Kluwer Academic Publisher, 242 p.
- Sorensen, M.B., Spada, M., Babeyk, O.A., Wiemer, S., Grünthal, G., 2012. Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 117: B01305.
- Switzer, A.D., Burston, J.M., 2010. Competing mechanisms for boulder deposition on the southeast Australian coast. *Geomorphology*, 114: 42-54.
- Tesson, M., Posamentier, H., Gensous, B., 2000. Stratigraphic organisation of Late Pleistocene deposits of the western part of the Rhone shelf (Languedoc shelf) from high resolution seismic and core data. *AAPG Bulletin*, 84: 119-150.
- Tinti, S., Armigliato, A., 2003. The Use of Scenarios to Evaluate Tsunami Impact in South Italy. *Marine Geology*, 199, 3-4: 221-243.
- Tinti, S., Maramai, A., Graziani, L., 2004. The New Catalogue of Italian Tsunamis. *Natural Hazards* 33 (3): 439-465.
- Tinti, S., Armigliato, A., Pagnoni, G., Zaniboni, F., 2005. Scenarios of giant tsunamis of tectonic origin in the mediterranean. *Journal of Earthquake Technology*, 42-4: 71-188.
- Vela, J., Pérez, B., González, M., Otero, L., Olabarrieta, M., Canals, M., Casamor, J.L., 2010. Tsunami resonance in the Palma de Majorca bay and harbour induced by the 2003 Boumerdes-Zemmouri algerian earthquake (Western Mediterranean). *Proceedings of 32nd International Conference on Coastal Engineering*: 1-12 p.
- Vella, C., Demory, F., Canut, V., Dussouillez, P., Fleury, T.J., 2011. First evidence of accumulation of mega boulders on the Mediterranean rocky coast of Provence (southern France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 905-914.
- Viñals, M.J., Belluomini, G., Fumeral. M.P., Dupré, M., Usera, J., Mestres, J., Manfra, L., 1993. Rasgos paleoambientales holocenos en la bahía de Xàbia (Alicante). En: *Estudios sobre Cuaternario: Medios sedimentarios, cambios ambientales, hábitat humano*, (M.P. Fumeral, J. Bernabeu, Eds). Univ de València, 107-114.
- Wang, X., Liu, P.L.F., 2005. A numerical investigation of Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake and tsunami. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 10: 171-183.
- Weiss, R., 2012. The mystery of boulders moved by tsunamis and storms. *Marine Geology*, 295-298: 28-33.
- Zhao, X., Chen, Y., Huang, Z., Gao, Y., 2017. A numerical study of tsunami wave run-up and impact on coastal cliffs using a CIP-based model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(5): 641-655.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 25-4-2020

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 8-8-2020

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 2-9-2020





## EVALUACIÓN GEOQUÍMICA POR BIOMARCADORES DEL YACIMIENTO DEL MOSQUITO DE LA CUENCA AUSTRAL DE LA PATAGONIA ARGENTINA

*Geochemical evaluation by biomarkers of Del Mosquito reservoir in the Austral Basin of Argentine Patagonia*

Germán J. Tomas<sup>1,2\*</sup>, Walter Vargas<sup>3</sup> y Adrián J. Acuña<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Transferencia de la Provincia de Santa Cruz - CONICET, Av. Lisandro de la Torre 860, Río Gallegos (9400) Santa Cruz, Argentina. gquimico90g@hotmail.com

<sup>2</sup> Grupo de Estudios Ambientales (GEA) Universidad Tecnológica Nacional -Facultad Regional Santa Cruz, Av. de los Inmigrantes 555, Río Gallegos (9400) Santa Cruz, Argentina. adrianjacuna@yahoo.com.ar

<sup>3</sup> YPF - Tecnología (Y-TEC) - CONICET, Av. Del Petróleo s/n, Berisso (1923) Buenos Aires, Argentina. walter.a.vargas@ypftecnologia.com

**Abstract:** Most hydrocarbons have a group of molecules known as biomarkers capable of remaining stable during the aggressive conditions under which they formed. The objective of this paper is analyze key biomarkers of the four samples of crude oil extracted from the Del Mosquito reservoir in the Austral Basin in Southern Argentina, which allows the characterization of their precursor organic matter, the lithology and depositional environment of source rock and the thermal evolution. Biomarker profiles were analyzed by GC / MS from aliphatic and aromatic fractions after separation by column chromatography. Specific parameters such as Pr/Ph, Pr/n-C<sub>17</sub>, Fi/n-C<sub>18</sub>, T<sub>24</sub>/T<sub>23</sub>, T<sub>26</sub>/T<sub>25</sub> and H<sub>29</sub>/H<sub>30</sub> indicate that the crude oil from the Del Mosquito seems to have been generated from type II-III organic matter (mixed), associated with a siliclastic source rock in marine sedimentation environment with moderate oxygen concentration, and in the oil generation window. The results show correlation with the Springhill geological formation, defined for the Austral Basin.

**Keywords:** hopanes, steranes, Springhill formation, Tobífera formation, Austral Basin.

**Resumen:** En el petróleo existe un grupo de moléculas conocidas como biomarcadores capaces de permanecer estables durante las agresivas condiciones en las que aquel se forma. El objetivo de este trabajo fue analizar los biomarcadores de cuatro muestras de crudo extraídas del yacimiento Del Mosquito, que permite una caracterización profunda de los mismos respecto a la materia orgánica que los formó, la litología y ambiente de sedimentación de la roca generadora, y la evolución térmica. Para tal fin, se analizaron los perfiles de biomarcadores por GC/MS a partir de sus fracciones alifáticas y aromáticas previa separación por cromatografía en columna. Parámetros específicos tales como P/F, Pr/n-C<sub>17</sub>, F/n-C<sub>18</sub>, T<sub>24</sub>/T<sub>23</sub>, T<sub>26</sub>/T<sub>25</sub> y H<sub>29</sub>/H<sub>30</sub> indican que el crudo del yacimiento Del Mosquito parece haberse generado de materia orgánica tipo II-III (mixta), asociada a una roca madre siliclastica en ambientes de sedimentación marinos con moderada concentración de oxígeno, y en la ventana de generación del crudo. Estos resultados obtenidos se corresponden con la composición particular de la Formación Springhill de la Cuenca Austral de la cual provienen los crudos.

**Palabras clave:** hopanos, esteranos, Formación Springhill, Formación Tobífera, Cuenca Austral.



Tomas, G.J., Vargas, W., Acuña, A.J., 2020. Evaluación geoquímica por biomarcadores del yacimiento Del Mosquito de la Cuenca Austral de la Patagonia Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33 (2): 31-40.

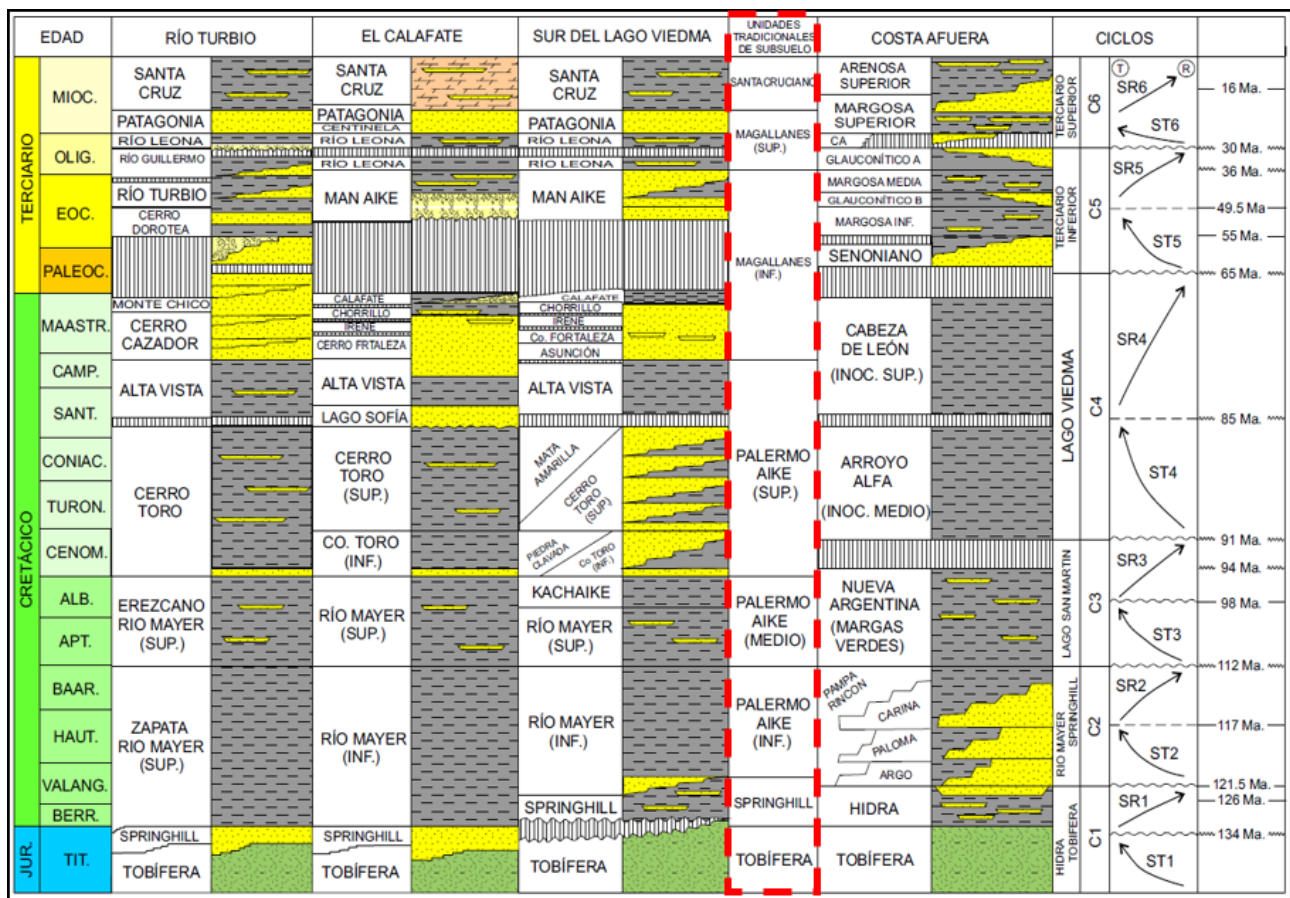
**Introducción**

Los biomarcadores han sido utilizados por los geoquímicos del petróleo desde 1970 para obtener información de los yacimientos petrolíferos, caracterizar químicamente a los crudos que provienen de cada uno de ellos y contrastar dos o más muestras para determinar el grado de similitud (Zhang *et al.*, 2015). Estas moléculas permiten establecer la correlación entre el crudo y la roca madre que lo generó brindando información sobre su origen, determinar la madurez térmica y evaluar la migración y el grado de biodegradación basado en la pérdida de alcanos, isoprenoides, compuestos aromáticos, terpanos y esteranos (Peters *et al.*, 1993). Los biomarcadores también son de utilidad para determinar si las condiciones ambientales de sedimentación de la materia orgánica fueron óxicas o anóxicas, marinas o terrestres, como también para conocer en términos geológicos (eones) la edad de la roca madre (Rangel *et al.*, 2017).

Peters *et al.* (2005) describieron a los biomarcadores como moléculas complejas presentes en el petróleo que se caracterizan por una elevada estabilidad térmica durante las etapas que originan el crudo (diagénesis, catagénesis y metagénesis). Esa propiedad es inherente a la estructura

química característica de cada uno de los biomarcadores, de manera que no sufren grandes modificaciones, lo que permite correlacionarlos con sus precursores biogénicos. Los biomarcadores más estudiados debido a la facilidad con la que se determinan por las técnicas analíticas son el pristano (P = 2,6,10,14-tetrametilpentadecano) y el fitano (F = 2,6,10,14-tetrametilhexadecano); estos derivan de la molécula de fitol asociada a la estructura de la clorofila (Killops y Killops, 2005). Otros grupos importantes son los esteranos y los hopanos, isoprenoides cíclicos con anillos tetracíclicos y pentacíclicos condensados, respectivamente. Hay que destacar que los hopanos y esteranos pueden presentar actividad óptica, lo que sirve para realizar interpretaciones de madurez térmica (Philp y Oung, 1988). En los estudios geoquímicos también se analizan moléculas con un origen inespecífico conocidas como marcadores aromáticos que complementan la información suministrada por los biomarcadores (Silvan *et al.*, 2008). En este grupo los metilfenantrenos han sido utilizados en parámetros de madurez y experimentalmente se correlacionan con la reflectancia de vitrinita calculada (Rc) (Silvan *et al.*, 2008).

La Cuenca Austral se formó durante el Triásico-Jurásico y se ubica en el extremo sur de la Patagonia. Hacia el norte limita contra el macizo del Deseado, un alto estructu-



**Fig. 1.-** Diagrama cronoestratigráfico con comparación de las diferentes localidades de la Cuenca Austral. La línea punteada roja indica las unidades geológicas de subsuelo del área Del Mosquito. Tomado de Schiuma *et al.* (2018).

ral emplazado en el centro-norte de la provincia de Santa Cruz; hacia el noroeste se conecta con la parte occidental de la cuenca del Golfo San Jorge la cual se sitúa entre el norte de la provincia de Santa Cruz y el sur de la provincia de Chubut (Barredo y Stinco, 2010). Un cuarto de la cuenca está en territorio chileno, principalmente en la Isla de Tierra del Fuego y al norte del Estrecho de Magallanes y el resto en Argentina abarcando una superficie de 162.000 km<sup>2</sup>. Esta posee una Plataforma estable (territorio continental) que cubre una faja de aproximadamente 600 Km de largo por un máximo de 150 Km de ancho adosada al litoral marítimo de Santa Cruz y Tierra del Fuego. Le sigue la Plataforma estable (*off-shore*) que comprende el sector costa afuera (*off-shore*), que cubre todo el litoral marítimo, desde la costa hasta el Alto de Dungeness en Argentina y parte del Estrecho de Magallanes en Chile. Continúa con un Talud y Cuenca ubicado ya en el centro oeste de la provincia, documentando el sector más profundo de la cuenca abundantes manifestaciones de hidrocarburos principalmente. Las zonas profundas de la cuenca

se ubican hacia el suroeste de Santa Cruz y se desarrolla una zona de plataforma sobre el borde nororiental paralela al arco de Río Chico-Dungeness. Son estas áreas positivas las que proveyeron los sedimentos para el desarrollo de las secuencias regresivas en especial el área al noroeste, determinando un relleno progresivo de norte a sur. En las últimas etapas, la orogenia andina habilita zonas de aportes desde el oeste (Cagnolatti *et al.*, 1995). Hasta el presente se ha reconocido un conjunto de ciclos de sedimentación con sus respectivos ciclos transgresivo y regresivo (Fig. 1).

El basamento de la cuenca conocido como Formación Tobífera está formado por espesas secuencias volcánicas ácidas (riolitas e ignimbritas) y depósitos lacustres. A partir de ese momento el relleno de la cuenca es principalmente pelítico con predominancia de depósitos de plataforma externa, talud y cuenca, con importantes eventos turbidíticos. En las zonas costeras se desarrollan facies clásticas marino-marginales con depósitos estuáricos mareales a litorales y fluviales, conformando los registros transgresivos. La Formación Springhill suprayace a la Formación Tobífera y es el principal reservorio de la cuenca, con petróleo derivado de un kerógeno tipo II-III (Lagarreta y Villar, 2011). Esta formación se corresponde a areniscas transgresivas que paulatinamente se cubrieron a medida que la trasgresión se desplazaba hacia el borde de la cuenca, por las pelitas marinas consideradas la principal roca madre de los hidrocarburos como lo atestiguan los es-

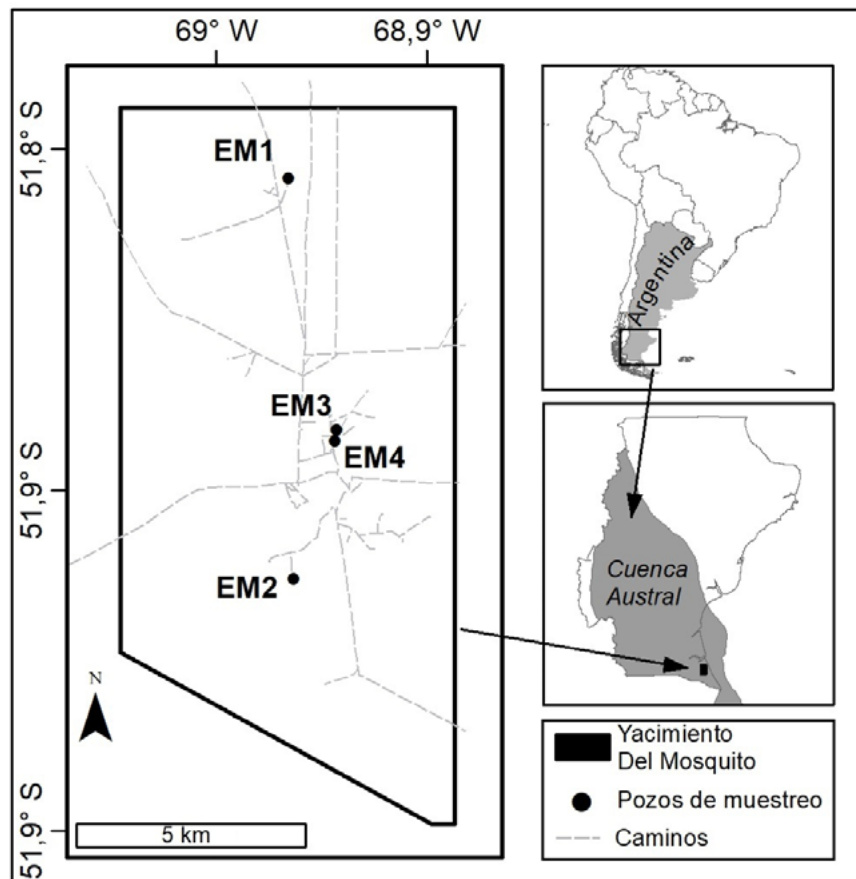


Fig. 2.- Mapa que ubica los pozos donde se han tomado las muestras de petróleo bajo estudio (EM1, EM2, EM3 y EM4) en el yacimiento Del Mosquito al sureste de la Cuenca Austral, en el sur de la Patagonia, Argentina.

tudios geoquímicos realizados (Barredo y Stinco, 2013).

El yacimiento Del Mosquito se encuentra hacia el sureste de la cuenca (51°51'51"S, 68°57'7"W), ubicado en la Estancia Punta Loyola, departamento Güer Aike de la Provincia de Santa Cruz, próximo a la costa del Mar Argentino (Fig. 2). La localidad más cercana corresponde a la ciudad de Río Gallegos, capital de la provincia, distante a aproximadamente 60 km al norte del mencionado yacimiento. Su unidad productiva está constituida por tobas alteradas y fracturas de la Formación Tobífera, y en concreto el nivel estratigráfico Del Mosquito se posiciona en la Formación Tobífera Superior la cual ha sido abastecida de hidrocarburos por la Formación Springhill Continental a través de una migración lateral oeste – este (Cagnolatti *et al.*, 1995). Como yacimiento posee una componente estructural que está dada por un anticlinal profusamente fallado, responsable de una configuración en bloques, uno de los cuales es el productivo. Este paleoalto, en el que las rocas volcánicas han adquirido propiedad de reservorio por intemperismo y fracturación, son responsables de la capacidad de acumulación. Se descarta que la matriz tenga un aporte significativo y la pequeña producción acumulada, parece confirmar esta hipótesis (Cagnolatti y Curia, 1990). La columna estratigráfica es la típica del área de plataforma, en donde existen amplias áreas carentes de depósitos de los términos arenosos de la Formación Springhill (Altos

Pelados). Desde el punto de vista paleogeográfico, parte de la zona de Punta Loyola, área donde se encuentra el yacimiento Del Mosquito, constituye uno de estos altos sin sedimentación de la Formación Springhill. Esta formación aparece en los flancos y está compuesta por dos miembros, uno Continental y otro Marino (Cagnolatti y Curia, 1990).

El yacimiento, descubierto en 1971, está formado por 23 pozos distribuidos a lo largo de una superficie de 101,3 km<sup>2</sup>, de los cuales 4 están activos. Los crudos de este yacimiento se caracterizan en promedio por una gravedad API (seco) en torno a 25 °API (15 °C), una salinidad de 60 g/cm<sup>3</sup> y una concentración de mercurio de 30 ppb medidas en el mismo (Barredo *et al.*, 2004). En la actualidad no existen reportes respecto al perfil de biomarcadores que forman parte del crudo producido en este yacimiento, entendiéndose que su estudio podría aportar un conocimiento más integral de la materia prima producida al tener la posibilidad de caracterizar al yacimiento Del Mosquito desde un nuevo aspecto, sirviendo en algún punto a desarrollar mejores estrategias de producción.

El objetivo de este trabajo fue generar un perfil de biomarcadores de los crudos extraídos del yacimiento Del Mosquito, que permita una caracterización profunda de los mismos respecto a la materia orgánica que lo formó, el ambiente en el que se depositó esa materia orgánica, la litología asociada a la roca generadora y su evolución térmica.

## Materiales y métodos

### Muestras

Se obtuvieron 4 muestras de crudo (EM1, EM2, EM3 y EM4) del yacimiento Del Mosquito (Fig. 2). Se extrajeron de la Formación Tobífera Superior a 1300 m de profundidad promedio. Las mismas fueron recolectadas directamente de los pozos productores y transportados al laboratorio en botellas limpias de vidrio de un litro de capacidad y de color ámbar para evitar la fotooxidación. En el llenado de las botellas, se evitó la presencia de cámara de aire para minimizar el impacto del oxígeno en la estabilidad de las muestras, las cuales fueron almacenadas en lugares oscuros y secos a temperatura ambiente hasta la realización de los análisis.

### Acondicionamiento de muestras de crudo

Aproximadamente 100 µL de crudo se sometieron a una separación en columna de vidrio (20 cm x 1,2 cm) en sus fracciones alifáticas y aromáticas. Para este fin, se empacó la columna de vidrio con 3 g de gel de sílice activado, al que se le adicionó una columna de 50 mg de sulfato de sodio activado y 50 mg de alúmina activada en su parte superior. La mezcla de hidrocarburos se eluyó con 10 mL de n-pentano y 10 mL de diclorometano para obtener las fracciones alifáticas y aromáticas, respectivamente. Ambos extractos se concentraron por separado hasta 0,5 mL bajo corriente de nitrógeno y se transfirieron a un vial de cromatografía. Los dos extractos preparados se almacenaron a -15 °C hasta su análisis (Leal *et al.*, 2011).

### Análisis cromatográfico

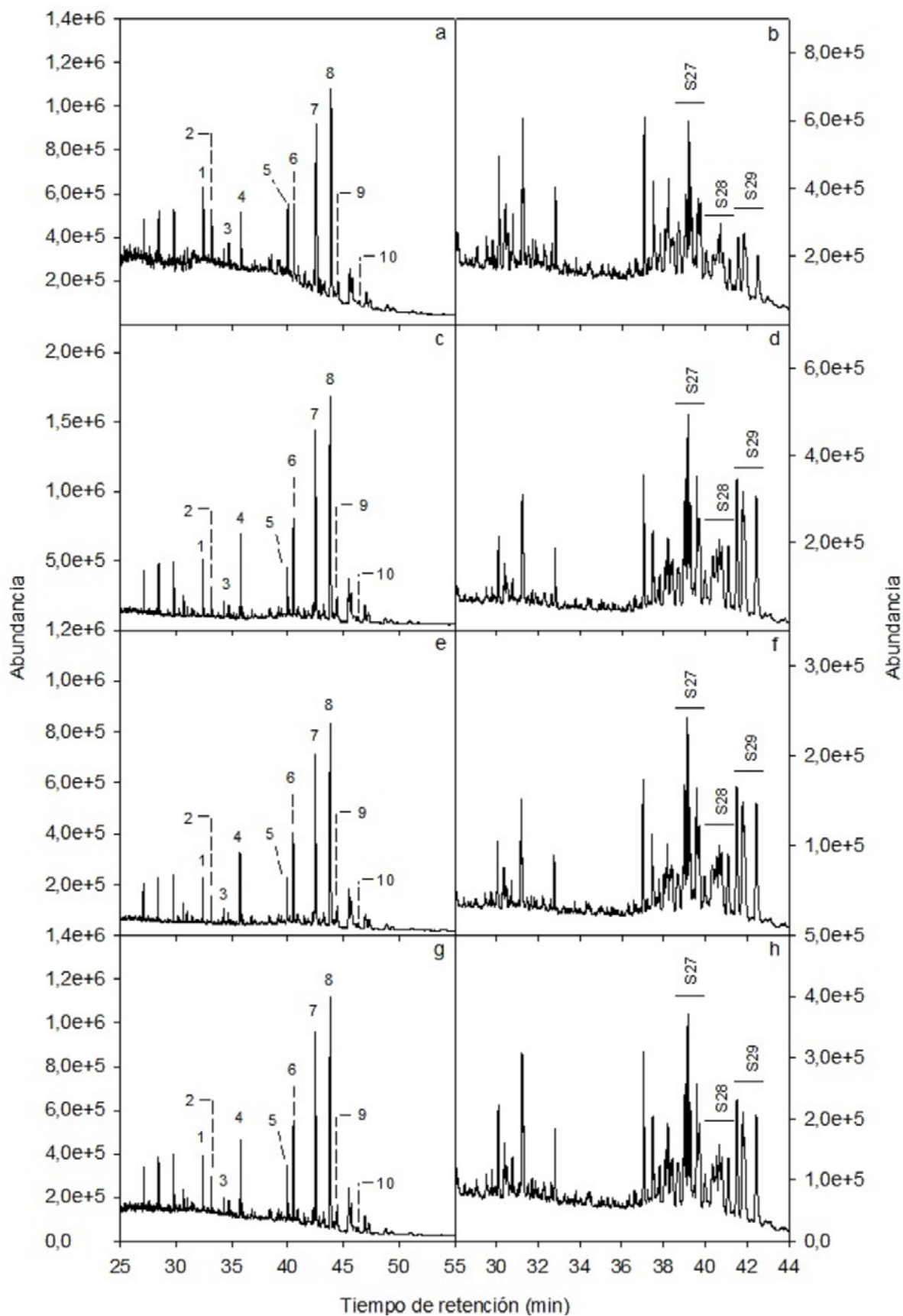
Se inyectó 1 µL de las fracciones alifáticas y aromáticas del crudo en modo *splitless* en un cromatógrafo de gases. La separación cromatográfica se realizó en un cromatógrafo de gases Agilent modelo 7890A, con detector por espectrometría de masas de la misma marca modelo 5975C. Se utilizó una columna HP5ms de 30 m de largo, con un diámetro interno de 0,32 mm y un espesor de película de 0,25 µm. La temperatura del inyector se ajustó a 290 °C y se utilizó helio como gas portador con una velocidad de flujo de 1,2 mL.min<sup>-1</sup>. El programa de temperatura utilizado fue el siguiente: temperatura inicial de 55 °C durante 2 min, seguido de una rampa de 6 °C.min<sup>-1</sup> hasta alcanzar los 270 °C, pasando directamente a otra rampa de 3 °C.min<sup>-1</sup> hasta alcanzar 300 °C, temperatura que se mantuvo durante 17 min. El tiempo total de corrida fue de aproximadamente 65 min. El detector de masas se utilizó con una temperatura de la fuente de iones y de la línea de transferencia de 230 °C y 180 °C respectivamente y una energía de impacto de 70 eV. El escaneo de masas entre 30 y 400 uma se realizó en modo *Scan* para analizar los iones m/z = 178, m/z = 184, m/z = 192, y m/z = 198 de la fracción aromática, y en modo *SIM* para los iones m/z = 191 y m/z = 217 (Fig. 3) para el extracto de la fracción alifática (Stashenko y Robles, 2014).

## Resultados y discusión

### Materia orgánica precursora

Los resultados del análisis cromatográfico de las muestras EM1 a EM4 analizadas se muestran en la Figura 3 y se resumen en la Tabla 1.

*Pristano y fitano.* El pristano (P) y el fitano (F) son los isoprenoides más importantes debido a la concentración en la que se encuentran en las muestras de crudo. La relación entre estos (P/F) se asocia al ambiente en el que se depositó la materia orgánica (Lo Mónaco *et al.*, 1999). La relación P/F para la muestra EM1 fue ligeramente superior a 1 y en torno a 2 para EM2, EM3 y EM4 (Tabla 1). Estos valores se asocian a la relación P/n-C<sub>17</sub> en función de F/n-C<sub>18</sub> (Hunt, 1996), que para las muestra analizadas se indican en la Figura 4. EM1 se sitúa en el límite entre kerógeno Tipo II (marino) y Tipo II-III (mixto), en una zona asociada a elevados valores de P/n-C<sub>17</sub> y F/n-C<sub>18</sub> lo que sugiere indicios de biodegradación, y el resto de las muestras se ubican en la zona Tipo II-III (mixta) (Lo Mónaco *et al.*, 1999). Sin embargo estos resultados por sí solos no pueden ser utilizados para inferir el origen de la materia orgánica ya que las relaciones basadas en estos isoprenoides y sus alcanos correspondientes pueden verse afectados por el nivel de madurez térmica del kerógeno, diferentes fuentes de materia orgánica (Tissot y Welte, 1984), coelución de otros isoprenoides con el mismo tiempo de retención o a efectos de migración primaria durante la expulsión preferencial de los n-alcanos frente a los isoprenoides (Leythaeuser y Schwarzkopf, 1986).



**Fig. 3.-** Fragmentogramas para los iones  $m/z = 191$  y  $m/z = 217$  de las muestras EM1 (a y b), EM2 (c y d), EM3 (e y f) y EM4 (g y h). Se observa en el eje de las ordenadas la abundancia relativa y en el eje de las abscisas el tiempo de retención en min. Los compuestos enumerados son los siguientes: 1- terpano tricíclico  $C_{23}$  ( $TT_{23}$ ), 2- terpano tricíclico  $C_{24}$  ( $TT_{24}$ ), 3- terpano tricíclico  $C_{25}$  ( $TT_{25}$ ), 4- terpano tricíclico  $C_{26}$  ( $TT_{26}$ ), 5- trisnorneohopano  $C_{28}$  ( $Ts$ ), 6- trisnorhopano  $C_{27}$  ( $Tm$ ), 7- norhopano  $C_{29}$  ( $H_{29}$ ), 8- hopano  $C_{30}$  ( $H_{30}$ ), 9- moretano  $C_{30}$  ( $M_{30}$ ), 10- gamacerano  $C_{30}$  ( $G_{30}$ ),  $S_{27}$ -colestanos  $C_{27}$ ,  $S_{28}$ -ergostanos  $C_{28}$  y  $S_{29}$ -stigmastanos  $C_{29}$ .

Relación de diagnóstico	EM1	EM2	EM3	EM4
P/F	1,39	2,20	1,74	2,13
P/n-C <sub>17</sub>	3,46	0,42	0,42	0,37
F/n-C <sub>18</sub>	3,50	0,22	0,26	0,19
% 4-MeDBT	67,00	62,00	57,00	58,00
% 2+3-MeDBT	24,00	28,00	30,00	29,00
% 1-MeDBT	9,00	10,00	13,00	13,00
% TT <sub>23</sub>	11,00	7,00	5,00	8,00
% TT <sub>24</sub>	8,00	5,00	3,00	5,00
% H <sub>30</sub>	81,00	88,00	92,00	87,00
T <sub>S28</sub> /(T <sub>S28</sub> + T <sub>m27</sub> )	0,46	0,34	0,30	0,32
H <sub>29</sub> / H <sub>30</sub>	0,74	0,79	0,75	0,78
(10 x G <sub>30</sub> )/(G <sub>30</sub> + H <sub>30</sub> )	2,85	2,40	2,23	2,29
M <sub>30</sub> / H <sub>30</sub>	0,06	0,08	0,08	0,07
% S <sub>27</sub>	44,00	36,00	33,00	35,00
% S <sub>28</sub>	21,00	19,00	18,00	18,00
% S <sub>29</sub>	35,00	45,00	49,00	47,00

Fórmulas	Referencia
P/F = pristano/fitano	Moldowan <i>et al.</i> (1994)
P/n-C <sub>17</sub> : pristano/heptadecano	Moldowan <i>et al.</i> (1994)
F/n-C <sub>18</sub> : fitano/octadecano	Moldowan <i>et al.</i> (1994)
% 4-MeDBT: (4-MeDBT/4-MeDBT + (2+3)-MeDBT + 1-MeDBT).100	Radke (1988)
% (2+3)-MeDBT: ((2+3)-MeDBT/4-MeDBT + (2+3)-MeDBT + 1-MeDBT).100	Radke (1988)
% 1-MeDBT: (1-MeDBT/4-MeDBT + (2+3)-MeDBT + 1-MeDBT).100	Radke (1988)
% TT <sub>23</sub> : (TT <sub>23</sub> / TT <sub>23</sub> + TT <sub>24</sub> + H <sub>30</sub> ).100	Peters y Moldowan (1993)
% TT <sub>24</sub> : (TT <sub>24</sub> / TT <sub>23</sub> + TT <sub>24</sub> + H <sub>30</sub> ).100	Peters y Moldowan (1993)
% H <sub>30</sub> : (H <sub>30</sub> / TT <sub>23</sub> + TT <sub>24</sub> + H <sub>30</sub> ).100	Peters y Moldowan (1993)
T <sub>S28</sub> /T <sub>S28</sub> +T <sub>m27</sub> : trisnorhopano/trisnorhopano + trisnorhopano	McKirdy <i>et al.</i> (1983)
H <sub>29</sub> /H <sub>30</sub> : norhopano C <sub>29</sub> /hopano C <sub>30</sub>	Peters y Moldowan (1993)
(10 x G <sub>30</sub> )/(G <sub>30</sub> + H <sub>30</sub> ): (10 x gamacerano)/(gamacerano + hopano C <sub>30</sub> )	Sinnighe-Damsté <i>et al.</i> (1995)
M <sub>30</sub> /H <sub>30</sub> : moretano/hopano C <sub>30</sub>	Seifert y Moldowan (1980)
% S <sub>27</sub> : (S <sub>27</sub> (αS + αR + βS + βR)/S <sub>27</sub> (αS + αR + βS + βR) + S <sub>28</sub> (αS + αR + βS + βR) + S <sub>29</sub> (αS + αR + βS + βR)).100	Huang y Meinschein (1976)
% S <sub>28</sub> : (S <sub>28</sub> (αS + αR + βS + βR)/S <sub>27</sub> (αS + αR + βS + βR) + S <sub>28</sub> (αS + αR + βS + βR) + S <sub>29</sub> (αS + αR + βS + βR)).100	Huang y Meinschein (1976)
% S <sub>29</sub> : (S <sub>29</sub> (αS + αR + βS + βR)/S <sub>27</sub> (αS + αR + βS + βR) + S <sub>28</sub> (αS + αR + βS + βR) + S <sub>29</sub> (αS + αR + βS + βR)).100	Huang y Meinschein (1976)

**Tabla 1.-** Información geoquímica de las muestras de petróleo crudo estudiadas EM1 a EM4. MeDBT: metildibenzotiofeno, TT<sub>23</sub>: terpano tricíclico C<sub>23</sub>, TT<sub>24</sub>: terpano tricíclico C<sub>24</sub>, S<sub>27</sub>: colestano, S<sub>28</sub>: ergostano, S<sub>29</sub>: estigmastano.

**Hopanos y terpanos tricíclicos.** Los componentes más importantes del petróleo para determinar el tipo de materia orgánica que le dio origen, ya que conservan mejor la estructura de los componentes biológicos (precursores), son los terpanos tricíclicos y los hopanos (Hunt, 1996). Los hopanoides y terpenoides se encuentran en la membrana celular de las células procariontas y de las algas, respectivamente (Philp, 1985). La distribución del hopano H<sub>30</sub> y de los terpanos tricíclicos TT<sub>23</sub> y TT<sub>24</sub> muestra similitud para todas las muestras (Tabla 1), observándose que el hopano H<sub>30</sub> es el componente predominante. Esto se asocia a materia orgánica de tipo terrestre, teniendo en cuenta que en las pizarras de la Formación Springhill Continental se registra dicho tipo de materia orgánica, compuesta principalmente de grandes tejidos vegetales y restos de carbón (Lagarreta y Villar, 2011). Cagnollatti y Curia (1990) determinaron que la cantidad de exinita y de *Botryococcus* representan menos del 20 y 10 % respectivamente de los kerógenos. En conclusión, la materia orgánica en las lutitas de la Formación Springhill Continental se deriva principalmente de un material vegetal terrestre con una contribución marginal lacustre (Pittion y Gouadain, 1992).

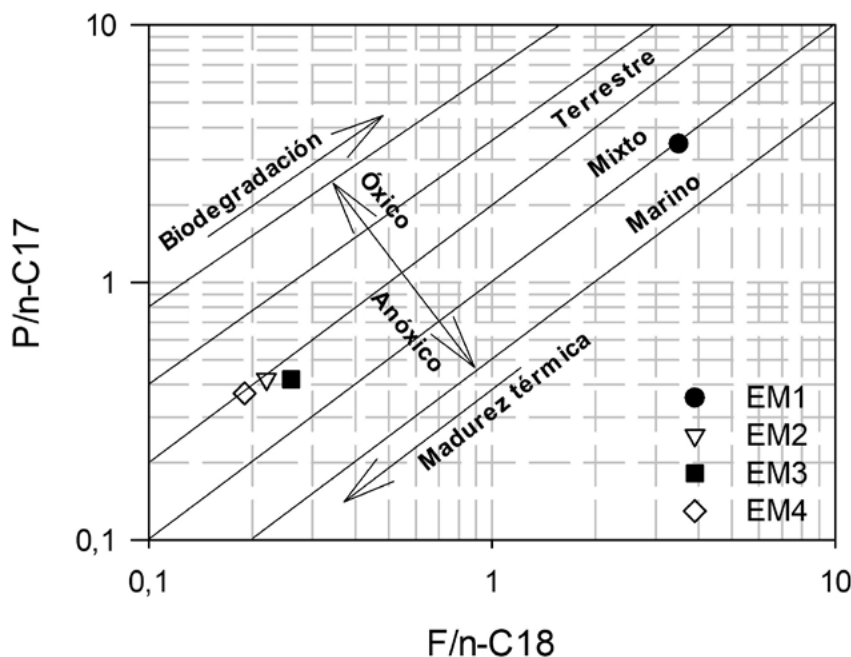
**Esteranos.** Finalmente, los esteranos al igual que los

terpanos, no existen como tales en los organismos vivos. Estos tienen como principales precursores a los esteroides presentes en algas, animales y plantas superiores por lo que también proporcionan información sobre la materia orgánica precursora (Mackenzie *et al.*, 1982). Las proporciones relativas entre los esteranos S<sub>27</sub>, S<sub>28</sub> y S<sub>29</sub> en las muestras analizadas (Tabla 1) pueden sugerir la presencia de algas o materia orgánica de tipo terrestre (Moldowan *et al.*, 1985). EM1 exhibió una contribución más importante de materia orgánica tipo algal que el resto de las muestras estudiadas, debido al predominio del esterano S<sub>27</sub> asociado a zooplankton, algas rojas y verdes (Moldowan *et al.*, 1985). En las muestras EM2, EM3 y EM4 destaca el esterano S<sub>29</sub> que se encuentra principalmente en organismos terrestres, pero excepcionalmente también está presente en ciertas algas marinas (Cortes *et al.*, 2010). La influencia marina de la muestra EM1 está asociada a un 44 % de S<sub>27</sub>, ya que zoo- y fitoplancton aportan este biomarcador (Mackenzie *et al.*, 1982).

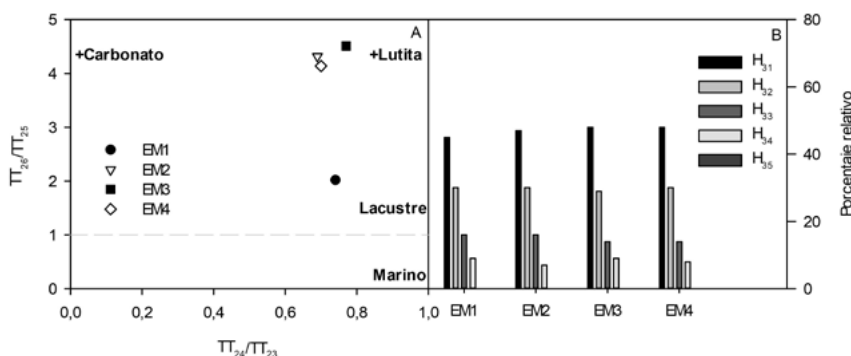
#### *Ambiente de sedimentación y litología de la roca generadora*

La relación P/F es un parámetro importante debido a que permite establecer el ambiente de sedimentación de la materia orgánica (Peters *et al.*, 1999). Para la muestra EM1 se observa un valor de P/F mayor y cercano a 1 (Tabla 1), lo que sugiere que las condiciones en las que se depositó la materia orgánica fueron subóxicas con una concentración de oxígeno menor al resto de las muestras, lo que favorece así la formación de F por sobre P (Peters *et al.*, 1999). Para las muestras EM2, EM3 y EM4 los valores de P/F en torno a 2 ponen de manifiesto una mayor presencia de oxígeno. La descripción dada por esta relación se refleja también en la Figura 4, ya que EM1 se encuentra en el límite entre la zona fuerte y moderadamente reductora. Esto resalta que, a diferencia del resto de muestras, EM1 se formó en un ambiente con menor presencia de oxígeno.

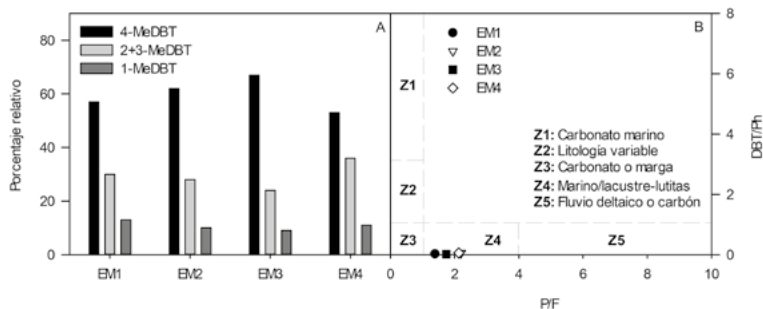
La relación de terpanos tricíclicos TT<sub>26</sub>/TT<sub>25</sub> en función de TT<sub>24</sub>/TT<sub>23</sub> permite visibilizar si el ambiente de sedimentación fue predominantemente marino o lacustre y la influencia carbonática o silicilástica del mismo (Peters *et al.*, 2005). Los resultados obtenidos con estas relaciones de diagnóstico para las muestras estudiadas se observan en la Figura 5A. Las muestras de crudo EM2, EM3 y EM4 se caracterizaron por un ambiente lacustre más marcado respecto a EM1. Puesto que la Formación Springhill se caracteriza por una sedimentación transgresiva marino-litoral donde



**Fig. 4.-** Relación de P/n-C<sub>17</sub> en función de la relación F/n-C<sub>18</sub> (diagrama de Shanmugan, 1985) para los crudos estudiados. P/n-C<sub>17</sub>: pristano/heptadecano, F/n-C<sub>18</sub>: fitano/octadecano.



**Fig. 5.-** Relación entre los terpanos tricíclicos (TT) (A) y porcentaje relativo de los homohopanos (H<sub>31</sub>-H<sub>35</sub>) en función de cada muestra (B) para determinar la litología de la roca generadora. TT<sub>23</sub>/TT<sub>24</sub>: terpano tricíclico C<sub>25</sub>/terpano tricíclico C<sub>24</sub>, TT<sub>26</sub>/TT<sub>25</sub>: terpano tricíclico C<sub>26</sub>/terpano tricíclico C<sub>25</sub>, % H<sub>31</sub>: (H<sub>31</sub>/H<sub>31</sub> + H<sub>32</sub> + H<sub>33</sub> + H<sub>34</sub> + H<sub>35</sub>).100<sup>3</sup>, % H<sub>32</sub>: (H<sub>32</sub>/H<sub>31</sub> + H<sub>32</sub> + H<sub>33</sub> + H<sub>34</sub> + H<sub>35</sub>).100<sup>4</sup>, % H<sub>33</sub>: (H<sub>33</sub>/H<sub>31</sub> + H<sub>32</sub> + H<sub>33</sub> + H<sub>34</sub> + H<sub>35</sub>).100<sup>5</sup>, % H<sub>34</sub>: (H<sub>34</sub>/H<sub>31</sub> + H<sub>32</sub> + H<sub>33</sub> + H<sub>34</sub> + H<sub>35</sub>).100<sup>6</sup>, % H<sub>35</sub>: (H<sub>35</sub>/H<sub>31</sub> + H<sub>32</sub> + H<sub>33</sub> + H<sub>34</sub> + H<sub>35</sub>).100<sup>7</sup>. H<sub>31</sub>: hopano C<sub>31</sub>, H<sub>32</sub>: hopano C<sub>32</sub>, H<sub>33</sub>: hopano C<sub>33</sub>, H<sub>34</sub>: hopano C<sub>34</sub>, H<sub>35</sub>: hopano C<sub>35</sub>.<sup>1,2</sup> Moldowan *et al.* (1983);<sup>3,4,5,6,7</sup> Larcher *et al.* (1987).



**Fig. 6.-** Porcentajes relativos de 4-MeDBT, 2+3-MeDBT y 1-MeDBT en función de cada muestra (A) y Diagrama “DBT/P” de Hughes *et al.* (1995) en función de P/F (B) para determinar la litología de la roca generadora. DBT/Ph: dibenzotiofeno/fenantreno. Ver Tabla 1 para las fórmulas de % 4-MeDBT, % (2+3)-MeDBT y % 1-MeDBT.

se intercalan areniscas y arcillas (Lagarreta y Villar, 2011), las cuatro muestras analizadas encajarían con una litología siliciclástica de la roca generadora, siendo la muestra EM1 indicativa de sedimentación más próxima a condiciones marinas y en un ambiente anóxico.

Los isómeros 1, 2, 3 y 4-Metil-dibenzotiofeno (MeDBT) aportan información sobre la litología de la roca madre (López y Lo Mónaco, 2010). De acuerdo con los resultados obtenidos donde estos isómeros alcanzan valores de 4-MeDBT de 67 a 57 % (Tabla 1), todas las muestras estudiadas se ubicaron en un ambiente de sedimentación marino-lacustre y una litología siliciclástica. Esto se ve reflejado en el patrón tipo escalera de los porcentajes relativos de estos isómeros del MeDBT (Fig. 6A), y en la relación de diagnóstico del dibenzotiofeno (DBT) con el fenantreno (Ph) representada en función de P/F (Fig. 6B) (López y Lo Mónaco, 2010). En concreto, las cuatro muestras presentaron valores similares para el tipo de roca generadora que marca una mayor influencia de las lutitas.

Por otro lado, a la hora de determinar el ambiente de sedimentación, los hopanos H<sub>29</sub> y H<sub>30</sub> deben tenerse en cuenta ya que son los hopanos dominantes (García *et al.*, 1999). La relación suele ser aproximadamente 0,5. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para H<sub>29</sub>/H<sub>30</sub>, observándose para estas muestras una litología siliciclástica (H<sub>29</sub>/H<sub>30</sub> < 1). Otro indicador para tener en cuenta es el que resulta de la relación entre el gamacerano (G<sub>30</sub>) y el hopano H<sub>30</sub> (Tabla 1). El gamacerano se encuentra en concentraciones muy bajas en crudos y su presencia se relaciona a la elevada productividad bacteriana dentro de una columna de agua estratificada por salinidad o temperatura (Sinninghe-Damsté *et al.*, 1995). Se observó que el índice de gamacerano refleja valores en torno al 2% (Tabla 1) para todas las muestras colectadas. La anoxia que permitió la conservación de la materia orgánica y su posterior transformación probablemente se deba a una capa mínima de O<sub>2</sub> creada por la

estratificación de las aguas debido a la alta afluencia de agua dulce en el contexto de un clima húmedo (Pittion y Gouadain, 1992). Por último, la distribución de los hopanos extendidos (homohopanos)  $H_{31}$  a  $H_{35}$  se utiliza con frecuencia para determinar las condiciones de depositación de la materia orgánica (Peters *et al.*, 2005). Si la distribución de  $H_{31}$  a  $H_{35}$  es en forma de escalera en los fragmentogramas  $m/z = 191$ , refleja un potencial redox subóxico que puede relacionarse con ambientes siliciclásticos. Las muestras estudiadas en el yacimiento Del Mosquito cumplen con esa situación (Fig. 5B) (Peters *et al.*, 2005). El petróleo de este yacimiento se generó en la Formación Springhill y por migración horizontal llegó a la Formación Tobífera. Cagnolatti *et al.* (1995) concluye que el petróleo recuperado de la Formación Springhill proviene de una roca siliciclástica conteniendo materia orgánica bacterial/algial y una significativa contribución de material terrestre.

#### Madurez térmica

Uno de los parámetros utilizados para determinar el nivel de madurez térmica de un crudo es el índice de metilfenantreno (Fig. 7) que se basa en la distribución de metilfenantreno (MP) y sus homólogos metilados (Radke *et al.*, 1986). Estos pueden derivar de esteroides y triterpenoides del material biológico de partida, o bien pueden originarse a partir de reacciones de metilación del fenantreno (Killops y Killops, 1993). Los isómeros más estables desde el punto de vista termodinámico son el 2-MP y 3-MP frente al 1-MP y 9-MP (Nabbefeld *et al.*, 2010). Por otro lado, la Reflectancia de Vitrinta Calculada (Rc) constituye la variable más importante al momento de determinar la evolución térmica de un crudo (Escobar *et al.*, 2007). Al realizar un gráfico del índice de metilfenantrenos (IMP) en función de Rc se establecen una serie de puntos sobre una recta que determinan cuanto ha avanzado la transformación del petróleo influenciado por la temperatura del sistema (Radke *et al.*, 1986). En la Figura 7 se observa que las cuatro muestras estudiadas se encuentran en la ventana de generación de crudo ya que se distribuyen entre valores de 0,6 y 1,3 para Rc, siendo esto concordante con lo encontrado por Barredo *et al.*, (2004) para la presente zona de estudio.

Para los hopanos, pueden utilizarse algunas relaciones de diagnóstico que proporcionan una visión más global de la incidencia de este proceso en los crudos. La relación entre el moretano (M) y el hopano de 30 átomos de carbono ( $M_{30}/H_{30}$ ) es un parámetro importante ya que decrece al aumentar la madurez. Todas las muestras tienen valores comprendidos entre 0,05 y 0,15 (Tabla 1) lo que las ubica dentro de la ven-

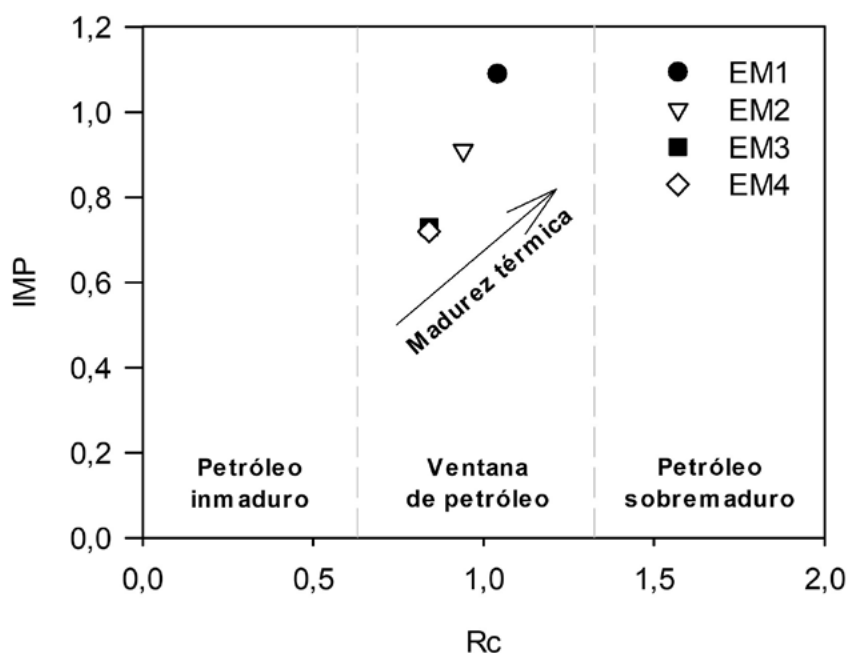


Fig. 7.- Índice de metilfenantreno (IMP) en función de la reflectancia de vitrinta calculada (Rc) para determinar la madurez de las muestras. IMP:  $((3\text{-MP} + 2\text{-MP}) \cdot 1,5 / \text{Ph} + 9\text{-MP} + 1\text{-MP})^1$ , Rc:  $0,55 \cdot \text{IMP} + 0,44^2$ . Ph: fenantreno, 1-MP: 1-metilfenantreno, 2-MP: 2-metilfenantreno, 3-MP: 3-metilfenantreno, 9-MP: 9-metilfenantreno. <sup>1</sup>Radke y Welt (1983); <sup>2</sup>Radke (1988).

tana de generación de crudo (Seifert y Moldowan, 1980). Cabe destacar que Tm ( $C_{27}$  17 $\alpha$ (H)-trisorhopano) y Ts ( $C_{27}$  18 $\alpha$ (H)-22,29,30-trisnorneohopano) son dos hopanos ampliamente utilizados para determinar madurez térmica. Tm es térmicamente más inestable y a medida que la madurez aumenta, este se convierte en Ts por lo que bajos valores de la relación  $Ts_{28}/(Ts_{28} + Tm_{27})$  es indicativo de crudos inmaduros (Seifert y Moldowan, 1978). Todas las muestras presentan valores cercanos de  $Ts_{28}/(Ts_{28} + Tm_{27})$  (Tabla 1), lo que sugiere una madurez similar.

#### Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización del patrón de biomarcadores observado en las cuatro muestras estudiadas del yacimiento Del Mosquito permiten sugerir que todas las muestras se caracterizan por materia orgánica de tipo II-III (mixta). El ambiente de sedimentación es de tipo lacustre para EM2, EM3 y EM4 y marino-lacustre para EM1 con moderada concentración de oxígeno para ambos. La litología de la roca generadora para todas las muestras se asocia a una naturaleza siliciclástica (lutitas) y en cuanto a madurez se puede decir que las mismas se encuentran dentro de la ventana de generación de petróleo. Las diferencias de valores  $P/C_{17}$  y  $F/C_{18}$  entre EM1 y el resto de las muestras (EM2, EM3 y EM4) indicarían que EM1 ha sufrido un proceso de biodegradación.

El presente trabajo es una contribución para incrementar el conocimiento de la naturaleza de los hidrocarburos de la Cuenca Austral, que complementa a los previamente realizados por Cagnolatti *et al.* (1995) y Lagarreta *et al.* (2011). La realización de este tipo de estudios sobre diferentes yacimientos dentro de la Cuenca Austral, no solo



permitiría en el futuro un mayor e integral conocimiento de sus crudos que contribuya a la toma de decisiones respecto de la mejora significativa de los procesos productivos, sino que también facilitaría la realización de una base de datos local de perfiles específicos de estos compuestos.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la contribución financiera de Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Cruz (PI MSUTNSC0007712) y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). También agradecen al Ing. Javier Szewczuk de la compañía Fomicruz Sociedad del Estado por su colaboración en la toma de muestras en el yacimiento Del Mosquito y al Ing. Leandro Almonacid por su colaboración en la confección de la cartografía presentada. Por último, agradecer al Dr. Pedro R. Kress y otro revisor anónimo por la revisión del trabajo.

### Referencias

- Barredo, S., Stinco, L.P., 2010. Geodinámica de las cuencas sedimentarias: su importancia en la localización de sistemas petroleros en Argentina. *Petrotecnia*, 2: 48-68.
- Barredo, S., Stinco, L.P., 2013. A geodynamic view of Oil and Gas resources Associated to the Unconventional Shale Reservoirs of Argentina. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC), *American Association of Petroleum Geologists*, Denver, Colorado, Estados Unidos: ID 1593090.
- Barredo, S., Chemale, F., Marsicano, C., Ávila, J.N., Ottone, E.G., Ramos, V.A., 2004. Estratigrafía de secuencia de tectono y edades de circón U-Pb del Depocentro Rincón Blanco, norte del Cuyo, Rift Argentina. *Gondwana Research*, 21: 624-636.
- Cagnolatti, M., Curia, D., 1990. Secuencias transgresivas de la F. Springhill al sudeste de la provincia de Santa Cruz, Cuenca Austral, Argentina. *III Reunión Argentina de Sedimentología, San Juan, Argentina, Resúmenes*: 72-80.
- Cagnolatti, M.J., Martins, R., Villar, H.J., 1995. La formación Lemaire como probable generadora de hidrocarburos en el área Angostura, Provincia de Tierra del Fuego, Argentina. *XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Buenos Aires, Argentina, Actas I*: 123-129..
- Cortes, J.E., Rincon, J.M., Jaramillo, J.M., Philp, R.P., Allen, J., 2010. Biomarkers and compound-specific stable carbon isotope of n-alkanes in crude oils from Eastern Llanos Basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 29: 198-213.
- Escobar, M., Azuaje, V., Da Silva, A., Esteves, I., Portillo, E., Alciaturi, C., 2007. Aplicación de los biomarcadores en el establecimiento del origen, madurez térmica y procesos de alteración del petróleo: campo Alturitas, Venezuela. *Revista técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, 30: 380-390.
- García, J., Sánchez, J., Guzmán, M., 1999. Esteranos y terpanos como marcadores biológicos en la prospección petrolera. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 43: 1-6.
- Huang, W.Y., Meinschein, W.G., 1976. Sterols as source indicators of organic materials in sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 323-330.
- Hughes, W.B., Holba, A.G., Dzou, L.I.P., 1995. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3581-3598.
- Hunt, J., 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco, Freeman, 743 p.
- Killops, S.D., Killops, V.J., 1993. *An Introduction to Organic Geochemistry*. Longman Scientific & Technical, Essex, UK, 265 p.
- Killops, S.D., Killops, V.J., 2005. *Introduction to Organic Geochemistry*. Second Edition, Blackwell Publishing, UK, 393 p.
- Lagarreta, L., Villar, H., 2011. Geological and Geochemical Keys of the Potential Shale Resources, Argentina Basins. *AAPG Geoscience Technology Workshop, Unconventional Resources: Basics, Challenges, and Opportunities for New Frontier Plays, Buenos Aires, Argentina*. Search and Discovery Article #80196.
- Larcher, A.V., Alexander, R., Kagi, R.I., 1987. Changes in configuration of extended moretanes with increasing sediment maturity. *Organic Geochemistry*, 11: 59-63.
- Leal, B., Freitas, M., Bracho, E., Martínez, M., López, L., 2011. Evaluación de la fase estacionaria en la separación SARA de dos crudos pertenecientes a la Sub-cuenca de Barinas, Venezuela. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 34: 203-211.
- Leytaheuser, D., Schwarzkopf, T., 1986. The pristane/n-heptadecane ratio as an indicator for recognition of hydrocarbon migration effects. *Organic Geochemistry*, 10: 191-197.
- Lo Mónaco, S., López, L., Labastida, E., 1999. Correlación de crudos de la subcuenca de Barinas, Venezuela. *Revista Latinoamericana de Geoquímica Orgánica*, 5: 47-56.
- López, L., Lo Mónaco, S., 2010. Geoquímica de crudos de la Faja Petrolífera del Orinoco, Cuenca Oriental de Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 25 (2): 41-50.
- Mackenzie, A., Brassell, S., Eglinton, G., Maxwell, J., 1982. Chemical fossils: The geological fate of steroids. *Science*, 217: 491-504.
- McKirdy, D.M., Aldridge, A.K., Ypma, P.J., 1983. A geochemical comparison of some crude oils from Pre-Ordovician carbonate rocks. En: *Advances in organic Geochemistry 1981*, (M. Bjorroy, C. Albrecht, C. Cornford, et al., Eds). John Wiley & Sons, New York, 99-107.
- Moldowan, J.M., Seifert, W.K., Gallegos, E.J., 1983. Identification of an extended series of tricyclic terpanes in petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 1531-1534.
- Moldowan, J.M., Seifert, W.K., Gallegos, E.J., 1985. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 69: 1255-1268.
- Moldowan, J.M., Dahl, J., Huizinga, B.J., 1994. The molecular fossil record of oleanane and its relation to angiosperms. *Science*, 265: 768-771.
- Nabbefeld, B., Grice, K., Schimmelmann, A., Summons, R., Troitzsch, U., Twitchett, R., 2010. A comparison of thermal maturity parameters between freely extracted hydrocarbons (Bitumen I) and a second extract (Bitumen II) from within the kerogen matrix of Permian and Triassic sedimentary rocks. *Organic Geochemistry*, 41: 78-87.
- Peters, K.E., Moldowan J.M., 1993. *The Biomarker Guide. Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*. Prentice Hall, New Jersey, 363 p.

- Peters, K.E., Fraser, T.H., Amris, W., Rustanto, B., Hermanto, E., 1999. Geochemistry of crude oils from eastern Indonesia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83: 1927-1942.
- Peters, K., Walters, C., Moldowan, J., 2005. *The Biomarker Guide. Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History*. Cambridge University Press, Cambridge, 471 p.
- Pittion, J.L., Gouadain, J., 1992. Source-rocks and oil generation in the Austral Basin. *XIII World Petroleum Congress, Buenos Aires, 1991, Proceedings*, vol. 2: 30-37.
- Philp, P., 1985. Biological markers in fossil fuel production. *Mass Spectrometric Reviews*, 4: 1-54.
- Philp, R., Oung, J., 1988. Biomarkers: occurrence, utility, and detection. *Analytical Chemistry*, 60: 887-896.
- Rangel, A., Osorno, J., Ramirez, J., De Bedout, J., González, J., Pabón, J., 2017. Geochemical Assessment of the Colombian oils base on bulk petroleum properties and biomarker parameters. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 1291-1309.
- Radke, M., 1988. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils. *Marine and Petroleum Geology*, 5: 224-236.
- Radke, M., Welte D.H., 1983. The Methylphenanthrene Index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons. En: *Advances in Organic Geochemistry 1981*, (M. Bjoroy, C. Albrecht, C. Cornford, Eds). John Wiley and Sons, New York, 504-512.
- Radke, M., Welte, D., Willsch, H., 1986. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type. *Organic Geochemistry*, 10: 51-63.
- Schioma, M., Hinterwimmer, G., Vergani, G., 2018. *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina*. IAPG. 2ª Ed., Argentina, 1006 p.
- Seifert, W., Moldowan, J., 1978. Application of steranes, triterpanes and monoaromatics to the maturation of crude oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 71-95.
- Seifert, W., Moldowan, J., 1980. The effect of thermal stress on source rock quality as measured by hopane stereochemistry. En: *Advances in Organic Geochemistry*, (A. Douglas, J. Maxwell, Eds). Pergamon Press, Oxford, 229-237.
- Shanmugam, G., 1985. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland Basin, Australia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 69: 1241-1254.
- Silvan, P., Datta, G., Singh, R., 2008. Aromatic biomarkers as indicators of source, depositional environment, maturity and secondary migration in the oils of Cambay Basin, India. *Organic Geochemistry*, 39: 1620-1630.
- Sinninghe-Damste, J., Kenig, F., Koster, J., Leeuw, J., 1995. Evidence for gammacerano as an indicator of water column stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1895-1900.
- Stashenko, E., Robles, M., 2014. Extracción selectiva y detección específica de biomarcadores saturados de petróleo. *Scientia Chromatographica*, 6: 251-268.
- Tissot, B., Welte, D., 1984. *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag, New York, 699 p.
- Zhang, H., Yin, X., Zhou, H., Wang, J., Han, L., 2015. Weathering characteristics of crude oils from Dalian oil spill accident, China. *Aqua Procedia*, 3: 238-244.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 4-5-2020

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 24-9-2020

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 5-10-2020



# ANÁLISIS COMPARATIVO DE MENCIONES AL PATRIMONIO PALEONTOLÓGICO Y OTROS TIPOS DE PATRIMONIO EN LOS CURRÍCULOS DE EDUCACIÓN SECUNDARIA EN ESPAÑA (PERIODO 1970-2020)

*Comparative analysis of references to paleontological heritage and other types of heritage in Secondary Education curricula in Spain (1970-2020 period)*

Abel Acedo, Omid Fesharaki\* y Alejandra García-Frank

*Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid. abacedop@gmail.com; \*omidfesh@ucm.es; agfrank@ucm.es*

**Abstract:** *This study addresses the need to include notions about the importance of natural heritage in subjects related to Biology and Geology in Secondary Education. For this, it has been analyzed the explicit presence of words related to paleontological, geological and natural heritage within all the laws implemented since 1970 in the educational curricula at the state level in Spain. The results reflect the scarcity of references to these concepts and point out that they are not always homogeneously treated. Conversely, in all the educational laws, mentions of cultural heritage stand out clearly, both in its historical and artistic denotations. Finally, a thoughtful approach and suggestions are presented as a proposal to discuss the expansion of these concepts and for their greater integration in matters related to natural sciences. These suggestions have meaning in the context of a slow but continuous educational change towards positions favorable to sustainability, in which equitable inclusive education in close contact with nature should be the fundamental pillars to raise awareness of tomorrow's citizens.*

**Keywords:** *geological heritage, natural heritage, sustainability, Universal Design for Learning, High School.*

**Resumen:** *Este estudio incide en la importancia de incluir nociones sobre el patrimonio natural en las asignaturas relacionadas con la Biología y la Geología en Educación Secundaria. Para ello, se ha analizado la presencia de términos relacionados con el patrimonio paleontológico, geológico y natural en los currículos educativos estatales de todas las leyes implementadas desde 1970 en España. Los resultados reflejan que las referencias a dichos conceptos son escasas y no son siempre homogéneas en su tratamiento. Por el contrario, en todas las leyes educativas destacan claramente las menciones al patrimonio cultural, en sus acepciones históricas y artísticas. Finalmente, se presentan una serie de reflexiones y sugerencias a modo de propuesta de ampliación de estos conceptos y de una mayor integración en las materias relacionadas con las ciencias de la naturaleza. Estas sugerencias se hacen en el contexto de un cambio lento pero continuo hacia posiciones favorables a la sostenibilidad, en las que la educación inclusiva, equitativa, y en contacto con la naturaleza deberían ser pilares fundamentales para concienciar a los ciudadanos del mañana.*

**Palabras clave:** *patrimonio geológico, patrimonio natural, sostenibilidad, Diseño Universal para el Aprendizaje, Bachillerato.*



Acedo, A., Fesharaki, O., García-Frank, A., 2020. Análisis comparativo de menciones al patrimonio paleontológico y otros tipos de patrimonio en los currículos de Educación Secundaria en España (periodo 1970-2020). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33 (2): 41-62.

## Introducción

El Sistema Educativo Español ha conocido en las últimas décadas una sucesión de leyes educativas, algunas de las cuales tras varios años de tramitación ni tan siquiera han llegado a entrar en vigor. Toda esta capacidad legislativa para generar nuevas leyes educativas con cada cambio de gobierno, no se ha traducido en mejoras significativas en algunos de los aspectos más criticados de la educación, especialmente si hacemos referencia a la educación en ciencias naturales (escasa presencia en los currículos, escasísima carga lectiva semanal, temarios excesivamente extensos, teóricos, inconexos y a veces descontextualizados y sin aparente relación con la práctica profesional, etc.). No es objetivo de este trabajo analizar todos estos factores y los sucesivos cambios, expuestos ya en multitud de trabajos (Calonge García, 2010; Pascual Trillo, 2017), sino poner en contexto la situación respecto a la Geología, una de las ciencias que cualquiera debiera considerar básica para la comprensión y valoración del medio que nos rodea o, mejor dicho, el medio que nos permite vivir, el Planeta Tierra. De esta ciencia que alberga un amplio número de campos del saber, en este trabajo, nos centraremos en su vertiente patrimonial, es decir, en el patrimonio de tipo paleontológico como parte del patrimonio geológico (Henriques y Pena dos Reis, 2015; Vegas *et al.*, 2019).

No han sido pocas las propuestas que se han hecho

desde instituciones científicas y educativas para mejorar la situación de la Geología en los currículos educativos. La sensación general ha sido que en este sentido se han ido dando pasos hacia delante y hacia detrás con cada nueva ley (Pascual Trillo, 1998; Fesharaki, 2016). Una de las últimas propuestas que ha contado con un respaldo mayoritario de los profesionales de la Geología, ha sido el documento liderado por Emilio Pedrinaci denominado "Alfabetización en Ciencia de la Tierra" (Pedrinaci *et al.*, 2013). En este texto se puede leer que "La propuesta está pensada desde una perspectiva holística, que entiende la Tierra como un sistema en el que se producen interacciones entre sus componentes. Entre ellas se destacan las que tienen lugar entre la humanidad y el planeta". Este documento expone y desarrolla las ideas clave que debería tener cualquier estudiante, y por extensión cualquier ciudadano, para poder considerarse como un ciudadano alfabetizado en estas ciencias y que, por lo tanto, comprende y valora su importancia en la resolución de problemas que afectan a la propia supervivencia de nuestra especie.

De entre las ideas clave (Pedrinaci *et al.*, 2013), en este trabajo nos vamos a apoyar en aquellas que tienen una relación más directa con el origen y la evolución de la vida sobre la Tierra, así como las interacciones de la Biosfera y la Geosfera. Por lo tanto, el mayor énfasis se va a poner en los aspectos relacionados con la Paleontología y el patrimonio paleontológico. Estas ideas tienen una relación directa con

Digne (1991)	Ideas Clave de Pedrinaci <i>et al.</i> (2013)
(3) A lo largo de las eras geológicas ha habido números cambios en la Tierra que han determinado su larga evolución y que ha conducido a la formación del ambiente en el que vivimos actualmente.	(1) La Tierra es un sistema complejo en el que interaccionan las rocas, el agua, el aire y la vida. (3) Los materiales de la Tierra se originan y modifican de forma continua.
(4 y 5) Nuestra historia y la de la Tierra son inseparables, su origen y su historia son los nuestros, su futuro será nuestro futuro. Ahora somos compañeros de la tierra y sus guardianes momentáneos.	(2) El origen de la Tierra va unido al del Sistema Solar y su larga historia está registrada en los materiales que la componen.
(6) La Tierra mantiene la memoria del pasado escrita en sus profundidades y en su superficie, en las rocas y en el paisaje; esta clase de registro puede también ser traducido.	(5) La vida evoluciona e interacciona con la Tierra modificándose mutuamente.
(7) Debemos estar atentos a la necesidad de proteger nuestro patrimonio cultural, la "memoria" del género humano, pero también ha llegado el momento de proteger el patrimonio natural y el ambiente físico, porque el pasado de la Tierra no es menos importante que el del hombre. Es la hora de aprender a conocer este patrimonio ya que el hombre y la Tierra forman un patrimonio común.	(8) La humanidad depende del planeta Tierra para la obtención de sus recursos y debe hacerlo de forma sostenible.
(8) Nosotros y los gobiernos somos solamente custodios de esta herencia. Todos los seres humanos deben comprender que el más pequeño ataque puede mutilar, destruir o producir daños irreversibles. Toda clase de desarrollo debería respetar la singularidad de esta herencia.	(10.6) Los científicos en colaboración con el profesorado pueden seleccionar los conocimientos básicos que favorecen la formación de unos ciudadanos alfabetizados en ciencias de la Tierra. Esta idea deja clara la necesaria interacción entre el mundo profesional y el de la educación.

**Tabla 1.-** Relación entre los puntos de la Declaración Internacional sobre los Derechos de la Memoria de la Tierra de Digne-les-Bains (Digne, 1991) sobre patrimonio geológico y las ideas claves para la enseñanza de las Ciencias de la Tierra propuestas por Pedrinaci *et al.* (2013) en los que se basa este estudio. La numeración entre paréntesis hace referencia a los puntos concretos en los respectivos documentos originales.

algunos de los puntos de la propuesta geoconservacionista de la Carta de Digne (Digne, 1991), donde se define por primera vez a nivel internacional una serie de puntos referidos al patrimonio geológico, y que son los conceptos en que se vertebra este trabajo (Tabla 1).

En relación con estas ideas, y para poner de relieve la importancia que deberían tener estas ciencias para la sostenibilidad, se puede mencionar que la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en su declaración inaugural del Año Internacional del Planeta Tierra afirmaba que “*todas las decisiones sobre la sostenibilidad deberían estar fundamentadas en la riqueza del conocimiento, existente y futuro, proporcionado por las ciencias de la Tierra*” (UNESCO, 2008).

Para poder proceder al análisis que se persigue en este trabajo es necesario contextualizar algunos términos, como el de patrimonio paleontológico. Entre muchas de las definiciones que existen para patrimonio, podría considerarse como patrimonio *sensu lato* aquel elemento o conjunto de elementos a los que se asigna un valor, generalmente por ofrecer algún tipo de beneficio o interés, científico, didáctico o cultural, ya sea real o potencial (Carcavilla *et al.*, 2007). Sin embargo, aunque la existencia de un valor es lo que convierte a un elemento en patrimonio, el tipo de patrimonio depende del elemento en sí, el cual es invariable, no de su mayor o menor valor, o incluso el uso que se le pueda dar (García-Cortés *et al.*, 2019). En la conferencia general de la UNESCO celebrada en París (UNESCO, 1972) se definen dos tipos fundamentales de patrimonio en función de su origen, el natural y el cultural (Fig. 1). Esta reunión tuvo como resultado la aprobación por parte de la UNESCO en el año 1975 de la Convención del Patrimonio Mundial. Actualmente la UNESCO reconoce tres cate-

gorías dentro del Patrimonio Mundial: Patrimonio Cultural, Patrimonio Natural y Bienes Mixtos. Así, según la UNESCO, se considerarían como patrimonio natural los lugares naturales o las zonas naturales estrictamente delimitadas, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la ciencia, de la conservación o de la belleza natural y los sitios mixtos, que son lugares que tienen un valor excepcional por combinar patrimonio natural y patrimonio cultural (UNESCO, 2004).

A nivel estatal, dentro del patrimonio natural, en la ley 42/2007 y su modificación en la Ley 33/2015 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, se define patrimonio geológico como el “conjunto de recursos naturales geológicos que poseen valor científico, cultural y/o educativo, y que permiten conocer, estudiar e interpretar: a) el origen y evolución de la Tierra; b) los procesos que la han modelado; c) los climas y paisajes del pasado y presente; y d) el origen y evolución de la vida”. A este tipo de patrimonio, como al resto, se le asigna un valor, generalmente por ofrecer algún tipo de beneficio o interés, real o potencial, de tipo científico, didáctico o cultural (Morales, 1996; Carcavilla *et al.*, 2007). El patrimonio de tipo paleontológico se incluye así dentro del geológico (por tanto, es parte del patrimonio natural) y está formado, por un lado, por el conjunto de yacimientos conocidos (patrimonio inmueble) y, por otro, por el conjunto de colecciones, de ejemplares, museos y exposiciones (patrimonio mueble) que conforman el material utilizado en investigación, así como para fines didácticos o de difusión social de la Paleontología (Meléndez y Molina, 2001).

Desde una perspectiva histórica, España fue uno de los primeros países del mundo en promulgar leyes para la protección de la naturaleza, con la Ley Gasset (Ley de 7 de di-

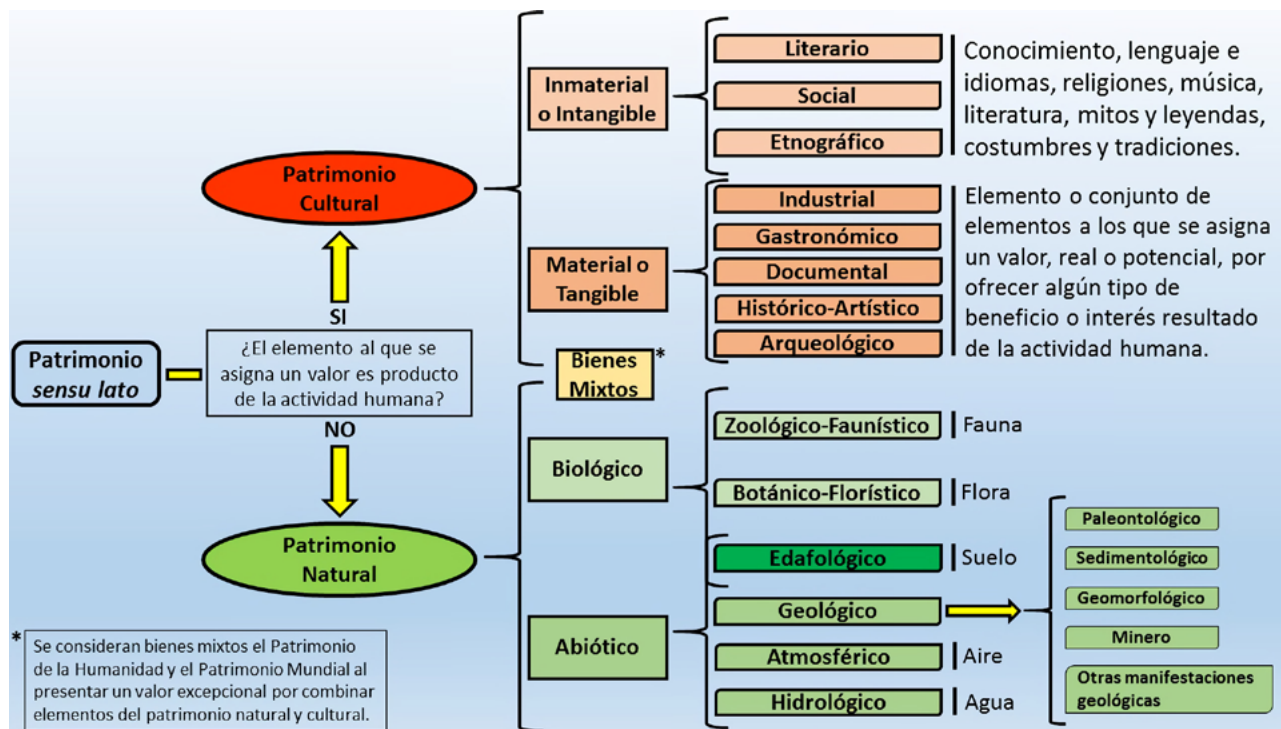


Fig. 1.- Clasificación de los diferentes tipos de patrimonio (confeccionado a partir de varias fuentes: Díez-Herrero y Vegas, 2011; Díaz-Martínez y Díez-Herrero, 2011).

ciembre de 1916, Creación de Parques Nacionales), siendo los Parques Nacionales de la Montaña de Covadonga del Macizo de Peña Santa y el Valle de Ordesa unos de los primeros lugares protegidos en 1920. Conviene recordar que los primeros ejemplos mundiales no europeos fueron promulgados a finales del siglo XIX (el primero fue el parque de Yellowstone en 1872). La Guerra Civil y la posterior dictadura, frenaron este espíritu conservacionista en nuestro país, que hasta la promulgación de las leyes constitucionales no recuperó esta visión. Actualmente se sigue trabajando en ampliar y mejorar la visibilización y la protección de la naturaleza, y ejemplo de ello es el programa, de reciente creación, de los Geoparques Mundiales UNESCO, que son territorios que presentan un patrimonio geológico de relevancia internacional, siendo el eje fundamental de una estrategia de desarrollo territorial sostenible basado en la educación y el turismo. Surgen a principios de la década de los 90 en Europa, siendo Francia, Alemania, Grecia y España los socios fundadores. En el año 2000 se creó la Red de Geoparques Europeos (European Geoparks Network, <http://www.europeangeoparks.org/>) y en 2004 la UNESCO auspició el programa creando la Red Mundial de Geoparques (Global Geoparks Network, <http://globalgeoparksnetwork.org/>; <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/>).

Por otra parte, en lo que respecta a la educación, según Sanz *et al.* (2012) la etapa clave para tratar este tipo de temática en la educación formal es la Educación Secundaria Obligatoria (ESO) ya que en ella se trabajan aspectos como la dinámica (interna y externa) de la Tierra, los materiales geológicos (rocas, minerales y fósiles) y la historia de la Tierra, así como los recursos naturales de origen geológico, sin olvidar su faceta ambiental. Así, en referencia a la didáctica de las ciencias en la ESO y Bachillerato, se han publicado no pocos trabajos que evidencian muchas de las ventajas que supone trabajar en el aula contenidos relacionados con la Paleontología y el patrimonio paleontológico mediante actividades que permiten desarrollar todas las competencias clave reflejadas en los currículos. Así, se pueden mencionar, por ejemplo, estudios como el de Lillo Beviá (1996) acerca de las ideas erróneas del alumnado sobre los conceptos de “fósil” y fosilización”, el de Borrego *et al.* (1996) sobre el uso de la historia de la ciencia en el aula como recurso didáctico para trabajar el concepto de fósil (utilizando también muestras fósiles reales), el de Romero-Nieto *et al.* (2014), centrado en el uso del cine como una herramienta didáctica y motivacional útil para conseguir que el alumnado adquiriera una visión crítica de los contenidos a los que acceden a través de películas de trasfondo paleontológico, o el de Fernández-Martínez y Suárez Andrés (1998), en el que se propone, a través de la gamificación y el trabajo en equipo del alumnado, una actividad centrada en resolver problemas geológicos ya establecidos, o generar otros nuevos, mediante una serie de pasos que simulan la metodología que se sigue en Paleontología. También cabe destacar las aportaciones de Langiano *et al.* (2015) sobre el patrimonio paleontológico, de Pedrinaci y Berjillos (1994) sobre opciones a la hora de abordar el concepto de tiempo geológico, esencial para entender el origen y la evolución de la Tierra y de la vida sobre ésta, o de Alcalá

*et al.* (2010) sobre los talleres didácticos de Paleontología y el interés que suponen como recurso didáctico debido a su carácter multidisciplinar. Es justamente este carácter multi e interdisciplinar lo que permite a la Paleontología y otros campos afines servir como nexos de unión entre la Biología y la Geología, ciencias impartidas conjuntamente en asignaturas de toda la educación secundaria, con la excepción de 2º curso de Bachillerato (Fesharaki *et al.*, 2019). Por otra parte, estudios como el de Vilaseca y Bach (1999) se centran en la importancia de concienciar al alumnado sobre la necesidad de valorar y proteger los yacimientos paleontológicos, y trabajos como el de Castilla *et al.* (2006) exponen las posibilidades didácticas que ofrecen las visitas a áreas de interés paleontológico para cualquier ciudadano y en especial para el alumnado de educación secundaria y personas con diversidad funcional. Otros trabajos inciden en la aplicación de los códigos de buenas prácticas para el alumnado e insisten en la necesidad de la recolección y comercio regulado de los fósiles (p. ej., Delvene *et al.*, 2018).

También hay que considerar las actividades de enseñanza no formal, que según la UNESCO se refiere a toda actividad organizada y duradera que no se sitúa exactamente en el marco de los sistemas educativos formales integrados por las escuelas primarias, los centros de enseñanza secundaria, las universidades y otras instituciones educativas formalmente establecidas. Así, García-Frank *et al.* (2016) mencionan que ligadas a las metodologías de transmisión de conocimiento geológico, la educación no formal constituye un método muy eficaz de llegar a la ciudadanía, y destacan el importante aporte que supone la divulgación científica inclusiva mediante las técnicas del Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA). Esta divulgación se podría enmarcar en lo que se conoce como “Paleontología Social” (Torices *et al.*, 2004). Cuando el Diseño Universal se aplica a la educación permite englobar una gran diversidad de circunstancias individuales, entre ellas las diferentes capacidades, las preferencias para el aprendizaje, los intereses y motivaciones propias, las diferencias culturales y de lenguaje, los niveles socioeconómicos, las variadas identidades sexuales o estructuras familiares presentes en los contextos educativos (Alba-Pastor, 2019). Diversos estudios incluyen propuestas e ideas muy innovadoras y reparan en la importancia de adaptar continuamente las actividades para hacerlas accesibles a toda la ciudadanía, incluido el alumnado con necesidades educativas especiales (Fesharaki *et al.*, 2016). Las actividades realizadas con esta metodología y perspectiva inclusiva mejoran el proceso de aprendizaje de aquellas personas con discapacidad intelectual que presentan dificultades en la adquisición de conceptos, o discapacidad física con escasas posibilidades de acceso a materiales adaptados. Al mismo tiempo, propician el contacto directo con la ciencia y los científicos, aspecto muy valorado por los participantes, y que sirve como elemento motivador, y para propiciar momentos de socialización con personas ajenas a su vida cotidiana, que de otra forma difícilmente se producirían (De la Ossa *et al.*, 2012).

Por todo lo anteriormente mencionado, queda patente el potencial que tiene la paleontología para la docencia al ofrecer múltiples alternativas didácticas (Alcalá *et al.*, 2010;

De la Ossa *et al.*, 2012). Tanto la enseñanza formal como las actividades no formales, y las incluidas dentro de la paleontología social, pueden llevarse a cabo en ambientes participativos, multisensoriales, creativos y estimulantes en los que los alumnos sean capaces de reflexionar de forma lógica sobre la información que están recibiendo y poder adecuar sus actitudes según avanza su aprendizaje y van asimilando nuevos conceptos y adquiriendo nuevas aptitudes (ver Iglesias Álvarez *et al.*, 2015; 2017). Todo ello mejorará la adquisición por parte del alumnado (en el caso de la educación formal y no formal) y de los participantes (en el caso de los talleres para público general) de diferentes conceptos, ideas y experiencias y, en definitiva, de un aprendizaje significativo. Además, un elemento de gran importancia que subyace en todas las ideas planteadas hasta el momento, es que el conocimiento del patrimonio paleontológico, y de forma más extensa el geológico y natural, aún a un nivel elemental sirve para la concienciación de la ciudadanía del mañana de cara a su correcta valoración y, por ende, a una protección eficaz del mismo. Son ejemplos recientes el expuesto por Enniouar *et al.* (2014) en relación con la concienciación ciudadana para la preservación de icnitas de dinosaurios en áreas deprimidas de Marruecos o el descrito por Hellqvist (2019) sobre la importancia que tienen en educación y concienciación ambiental las visitas a yacimientos y minas. En este sentido, Orion y Fortner (2003) subrayan la importancia de un aprendizaje activo e interdisciplinar, aplicando elementos de las Ciencias de la Tierra y de la ciencias ambientales para introducir conceptos como el desarrollo sostenible, mostrando ejemplos positivos de su aplicación en Israel y Chipre.

Teniendo en cuenta los beneficios que pueden aportar la Paleontología y el patrimonio paleontológico a la alfabetización en Ciencias de la Tierra de toda la ciudadanía, y en especial del alumnado, cabe preguntarse qué presencia tienen y hasta qué nivel se desarrollan estas temáticas en los currículos educativos implementados en las últimas décadas en España. Por lo tanto, el principal objetivo de este estudio ha sido la revisión sistemática de las leyes educativas que han desarrollado en las cinco últimas décadas los currículos de la ESO y Bachillerato (o cursos equivalentes en las diferentes leyes) en España, para encontrar así referencias a los diferentes tipos de patrimonio, con especial atención a aquellos relacionados con el de tipo paleontológico. Por otra parte, en vista del interés social y didáctico de la Paleontología y el patrimonio paleontológico, se hacen una serie de sugerencias de mejora e implementación de los currículos para recoger y desarrollar esta temática relacionada con la historia de la Tierra y de la vida y de propuestas dirigidas al profesorado.

## Estado de la cuestión

### *El patrimonio paleontológico*

En la actualidad no cabe duda de que los yacimientos paleontológicos, junto con las colecciones de fósiles y ejemplares alojados en museos, universidades, centros de investigación y recuperación e instituciones públicas, dotan a la comunidad científica, y a la sociedad en general, de una serie de conocimientos que ayudan a entender cómo ha tenido lu-

gar la evolución de la vida y la historia de la Tierra hasta la actualidad. La evidente necesidad social de conservar el patrimonio paleontológico, como parte del geológico, y de desarrollar nuevas estrategias para dar a conocer la relevancia y los beneficios que éste ofrece a la sociedad son aspectos que han cobrado una gran importancia en los últimos años dentro de los ámbitos profesionales enfocados a trabajar con el patrimonio. Este hecho se refleja en el creciente número de artículos científicos (p.ej., Meléndez y Soria, 1997; Alcalá, 1999; Carcavilla, 2009; Díaz-Martínez *et al.*, 2016), congresos (Sesión monográfica de la Sociedad Española de Paleontología en 2005; IV Congreso Mundial de la Naturaleza en 2008; *The IX International ProGEO Symposium on the Conservation of Geological Heritage* en 2018; XIII Reunión Internacional de la Comisión de Patrimonio Geológico de la Sociedad Geológica de España en 2019), monográficos de revistas (volumen 22.1 de 2014 de la revista *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*; el monográfico *Palaeontological Heritage in Spain* de la revista *Geoheritage* en 2018; volumen 94 de la revista *PH* en 2018 sobre patrimonio paleontológico español; monográfico de 2019 de la *Spanish Journal of Paleontology*; etc.), proyectos de investigación dentro de diversas convocatorias (internacionales, nacionales y autonómicas, como por ejemplo, los proyectos de excavación y divulgación científica concedidos a yacimientos paleontológicos como los yacimientos de Cerro de los Batallones, Somosaguas o Las Hoyas), los proyectos de innovación docente (Proyecto Geodivulgar-UCM o ayudas para realizar las Geoyincanas de la Universidad de Alicante, entre otros), o trabajos académicos como trabajos de fin de Grado, de Máster o tesis doctorales (4 entre 2000 y 2010, y 9 entre 2011 y 2020, completamente dedicadas al análisis del patrimonio paleontológico y con acceso abierto a nivel nacional; y más de 50 si se tienen en cuenta trabajos con cobertura parcial de esta temática) que se han realizado en los últimos años con contenidos total o parcialmente relacionados con el patrimonio geológico o el paleontológico.

Sin embargo, la importancia que se está otorgando al patrimonio paleontológico en los ámbitos indicados, y por extensión a la Paleontología y la evolución, no parece que se esté reflejando en el Sistema Educativo español, más concretamente en las materias relacionadas con las Ciencias de la Tierra y la vida en la ESO y Bachillerato. En estas circunstancias no parecen extraños los malos resultados obtenidos en diversos estudios que muestran los escasos niveles de conocimiento del alumnado sobre esta temática (Colomer *et al.*, 1993; Bazán y Vides, 1995; Castilla y de la Iglesia, 2008) que, sin embargo, en lo relacionado con dinosaurios y homínidos ha sido y es un referente en la divulgación e incluso un reclamo en películas o regalos promocionales de diversas marcas comerciales (Romero-Nieto *et al.*, 2014; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2014). En este punto, conviene recordar que en la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español ya se advertía de la transferencia de las competencias en materia de bienes patrimoniales a las Comunidades Autónomas, y que desde entonces serían éstas las responsables de concretar los currículos implementados en las leyes educativas estatales. Por lo tanto, es necesario estudiar cómo se están integrando

a nivel autonómico los conceptos que se analizan en este estudio. En un trabajo actualmente en preparación (Acedo, *com. pers.*) ya se detectan diferencias entre las diferentes comunidades, sin embargo, su desarrollo excede los objetivos del presente artículo.

### Agenda 2030

Otro tema que toca de cerca a la conservación y aprovechamiento de los recursos que ofrece el patrimonio paleontológico es la llamada Agenda 2030 (UNESCO, 2015). Uno de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que se proponen en dicha agenda es el de la educación mundial (ODS4), una educación inclusiva, equitativa y de calidad en la que se promuevan oportunidades de aprendizaje para todas las personas, durante toda la vida. Para alcanzar dicho objetivo se proponen siete metas y tres medios de ejecución. De entre las siete metas cabe destacar la 4.7 por estar más relacionada con la preservación del medio natural y, por tanto, con el tema de estudio en este trabajo. Dicha meta pretende “garantizar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas, mediante la educación para el desarrollo sostenible y la adopción de estilos de vida sostenibles [...]” (ONU, 2015). Como se puede comprobar, y ya se ha comentado en la introducción del presente trabajo, la Geología y, concretamente, la Paleontología y la visita a lugares considerados como patrimonio paleontológico o que contienen elementos de dicho patrimonio en exposición, son instrumentos didácticos y motivadores muy potentes, al mismo tiempo que por sus características permiten una educación sostenible y su disfrute por un público muy amplio, superando en muchos casos las desigualdades generadas en otros ámbitos para personas con diversidad funcional (Henriques *et al.*, 2019). Una educación inclusiva, equitativa y que fomente el desarrollo de sentimientos positivos hacia el medio ambiente ayudaría a la sociedad a conocer mejor, valorar y desarrollar ideas que derivarían en beneficios científicos, educativos y económicos, producto de la conservación del medio natural, incluido el patrimonio paleontológico (Vilaseca y Bach, 1999).

### Percepción de la ciudadanía

España todavía no puede presumir de una completa concienciación social sobre el valor del patrimonio paleontológico, a excepción de ciertos valores con mayor proyección, como los restos de dinosaurios o de homínidos (Romero-Nieto *et al.*, 2014). Motivo de ello es que el patrimonio paleontológico siga estando subordinado al arqueológico en algunos casos, o que se promulguen leyes que no sean apoyadas posteriormente por una administración que lleve a cabo la gestión que debería (García Pimienta, 2018). La comunidad científica, en regiones como Andalucía, ha denunciado el estado de desprotección y desconocimiento del patrimonio paleontológico, y se llevan haciendo esfuerzos desde hace años para tratar de solventar estos problemas (Bernáldez Sánchez, 1998). Por otro lado, sí cabe señalar que a partir de la Ley sobre Patrimonio Histó-

rico Español de 1985 y hasta la ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad (y su revisión en 2015), el desarrollo de una legislación sobre patrimonio paleontológico que afecta y regula su gestión ha repercutido positivamente sobre la sociedad, al generar debate y contribuir a crear una conciencia sobre la necesidad de protegerlo y favorecer su gestión y divulgación (Meléndez y Soria, 1994; 1997). Además, a lo largo de las dos últimas décadas, el concepto de patrimonio paleontológico ha comenzado a incluirse en estudios, programas y actividades enmarcados dentro del campo de la Paleontología Social (Torices *et al.*, 2004), evidenciando su potencial como estrategia de enseñanza a personas con necesidades educativas especiales, y mediante un diseño universal a toda la sociedad (González *et al.*, 2011; Fesharaki *et al.*, 2012; García-Frank *et al.*, 2014, 2016; entre otros muchos). Además, queda claro en los citados trabajos el éxito educativo de las actividades que se proponen y la respuesta positiva por parte de los colectivos a los que van dirigidas, ayudando a ampliar la conciencia social sobre la importancia de la preservación del patrimonio geológico y paleontológico. De hecho, algunos estudios han puesto de relieve que en ocasiones la enseñanza no formal y la informal han sido más efectivas que la enseñanza formal, que tiene sus limitaciones temporales, espaciales, legislativas, etc. (Falk *et al.*, 2007).

### Metodología

Teniendo en cuenta lo expuesto en los apartados anteriores, para poder ahondar en todas las posibilidades que ofrecen el conocimiento y la valoración del patrimonio paleontológico en las aulas de ESO y Bachillerato, el primer paso es realizar un análisis minucioso de los currículos implementados a nivel estatal de los distintos cursos de la educación secundaria en los que se imparten asignaturas relacionadas con la historia de la Tierra y de la vida. De este modo, se llevó a cabo una revisión bajo la óptica de cualquier tipo de referencia genérica al patrimonio geológico (incluyendo el geomorfológico, petrológico, paleontológico, mineralógico, etc.) y específica del tipo paleontológico en todas las leyes educativas desde 1970 a la actualidad, con especial atención a las dos últimas que se han llegado a aplicar, la LOE y la LOMCE. Se ha considerado de mayor importancia la revisión de estas últimas leyes educativas pues coinciden temporalmente con el periodo en el que se ha publicado un mayor número de estudios, tanto científicos como del ámbito de la enseñanza y divulgación de la Geología, enfocados a aspectos del patrimonio, la sostenibilidad o a la enseñanza inclusiva de la Geología y la Paleontología. Para ello en los archivos pdf de cada BOE referente a cada legislación educativa (ver apartado de referencias a las leyes evaluadas) se ha utilizado el buscador para encontrar las palabras clave que contengan “patrimonio” (o sus derivadas como “patrimonial”), así como otras que llevan de forma implícita esa connotación, como Geoparque. Tras la primera búsqueda se añadieron algunos términos de búsqueda que se observaron en las leyes evaluadas, como Parque natural o sostenibilidad (y términos relacionados, como desarrollo sostenible). Finalmente las palabras buscadas han sido: Patrimonio, Patrimonial (tanto en singular como en plural - s/p),



Patrimonio natural, Patrimonio geológico, Patrimonio paleontológico, Parque natural, Parque geológico, Geoparque, Geodiversidad, Diversidad geológica, Monumento natural, Sostenibilidad, Desarrollo sostenible, Geoconservación y Lugar de interés geológico.

Las leyes evaluadas han sido: Ley General de Educación y Financiación de la Reforma Educativa (1970; de aquí en adelante LGE), Ley Orgánica de Ordenación General del Sistema Educativo (1990; LOGSE), Ley Orgánica de Calidad de la Educación (2002; LOCE), Ley Orgánica de Educación (2006; LOE) y Ley Orgánica para la Mejora de la Calidad Educativa (2013; LOMCE). Remitimos al lector al apartado de referencias a la legislación para detalle de los reales decretos revisados.

Una vez finalizada la búsqueda de referencias en las leyes educativas, el segundo paso ha sido la comparación de la importancia que se da en ellas a cada uno de los distintos tipos de patrimonio, teniendo en cuenta las materias en las que se hace alusión a cada tipo, y el número de referencias (directas e indirectas) a cada uno.

## Resultados

Los resultados obtenidos de la búsqueda de información quedan reflejados en las tablas 2, 3, 4 y 5, en las que se indica la ley analizada, los tipos de patrimonio a los que se hace algún tipo de alusión o términos afines, las materias en las que se incluyen esas referencias (solo en aquellas leyes que indican este dato) y los epígrafes concretos donde figuran dentro de cada materia o en las diferentes secciones, capítulos o títulos preliminares de cada ley.

Se han encontrado numerosas menciones y referencias a la palabra “Patrimonial (s/p)” (3 en la LOGSE, 4 en la LOCE, 7 menciones en ESO y Bachillerato en la LOE y hasta 20 referencias en la LOMCE). Sin embargo, se ha optado por no incluir esta palabra en las tablas dado que siempre aparece en contextos alejados del significado que se persigue en este trabajo. Por ejemplo, en la LOE, en la asignatura de Latín se cita para diferenciar entre términos patrimoniales y cultismos, o en Economía de la empresa para referirse a situación patrimonial, financiera y económica de una empresa. En la LOMCE, aparece en contextos similares para las mismas asignaturas, así como en Griego, Cultura Clásica, Música, Historia de España o Fundamentos de Administración y Gestión. En todos estos casos se hace referencia a otras acepciones de este término que en sus inicios estaban ligadas con el conjunto de bienes y derechos ligados a las personas. Históricamente, en primer lugar, el término patrimonio se equiparaba al significado etimológico del derecho romano republicano (la herencia familiar de los ascendentes) y no es hasta fechas recientes que adquiere la acepción que utilizamos en este trabajo (UNESCO, 1972; Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad).

La tabla 2 muestra los resultados de las referencias encontradas para la LGE y la LOGSE. La primera ley no presenta prácticamente menciones al patrimonio, y las escasas referencias se relacionan con tipos incluidos en el patrimonio cultural. Tampoco se han encontrado ninguno de los términos afines del listado detallado en el apartado de metodología. Sí

se menciona en los objetivos de la asignatura de Ciencias Naturales del Bachillerato que ésta debe “contribuir a despertar en los alumnos una conciencia de responsabilidad y respeto por la Naturaleza”, siendo esta una de las pocas menciones en toda la ley que podría tener alguna relación con la protección del patrimonio. En la LOGSE son más numerosas y variadas las referencias, incluyendo tanto tipos de patrimonio incluidos en el cultural, la gran mayoría, como los incluidos en el natural. En este segundo grupo, que son los que interesan para el presente trabajo, aparecen el propio patrimonio natural y el patrimonio medioambiental. Curiosamente, en ninguno de los dos casos se relacionan con materias del ámbito de las ciencias naturales o experimentales, ni tampoco se incluyen en contenidos concretos de las asignaturas en las que aparecen, sino en la introducción o en los objetivos generales de dichas asignaturas. Por el contrario aparece una mención al patrimonio artístico en la asignatura de Ciencias de la Naturaleza. Sí se han podido encontrar algunas menciones que podrían, de forma indirecta, estar relacionadas con el tema de estudio, así en el apartado de introducción de Ciencias de la Naturaleza (ESO) se indica que “junto a la adquisición de conceptos, uso y dominio de procedimientos, debe estimularse el desarrollo de actitudes de curiosidad e interés por todo lo relativo al medio y a su conservación”. También se podría considerar como una mención relacionada la que se hace en el criterio de evaluación nº 8 de la asignatura de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, indicando la importancia de saber si se ha comprendido que la biodiversidad es un legado recibido, fruto de millones de años de evolución que es necesario preservar, como la lengua y la cultura. Aunque no aparecen menciones directas a geodiversidad o geoconservación, de algunas referencias indirectas se podría inferir el interés conservacionista o, al menos, el interés por valorar y cuidar la diversidad del medio. Sin embargo, la práctica totalidad de estas referencias tienen más relación con la parte biótica del medio. Así, se han encontrado referencias a “cambios en los ecosistemas producidos por la acción humana. Acciones de conservación y recuperación del medio natural” en la descripción de Ciencias de la Naturaleza en la ESO, o a la “valoración del medio natural como recurso y elemento importante en la calidad de vida de los grupos humanos, y disposición favorable a su conservación y defensa” en la asignatura de Ciencias Sociales, Geografía e Historia de la ESO. A pesar de que tampoco hay referencias directas a la palabra “sostenibilidad” ésta se infiere de frases que aparecen en Economía (“Adquieren especial importancia los contenidos actitudinales relacionados con [...] la importancia de la conservación del medio natural para la calidad de vida, y de rechazo ante el consumo innecesario”) y otras asignaturas de Bachillerato. Finalmente, aparecen menciones directas al desarrollo sostenible en la asignatura de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente (ver tabla 2). Es importante señalar que estas últimas menciones son tanto en contenidos como en criterios de evaluación. En cuanto al número total de menciones se pueden destacar los siguientes datos obtenidos de la tabla 2: en la LGE el 100% de las menciones son a tipos del patrimonio cultural. En la LOGSE de 39 menciones totales tan solo cinco son a tipos de patrimonio relacionados con el patrimonio natural, representando solo el 12,8%.

Ley	Tipo de patrimonio y términos afines	Curso/Ciclo/Etapa	Materia	Epígrafe y/o contexto	Referencias	Referencias totales
LGE	PC	Todo el sistema educativo nacional	-	Acerca de la incorporación de peculiaridades regionales como uno de los fines de la educación	1	3
	PP	Todo el sistema educativo nacional	-	Acerca de la personalidad jurídica de las universidades, su patrimonio propio y su capacidad para realizar todo género de actos de gestión y disposición respetando la ley	1	
	PA	Enseñanzas Medias	Historia del Arte	La arquitectura del siglo XX. Los problemas y el desarrollo del urbanismo contemporáneo. La conservación del patrimonio artístico	1	
LOGSE	PC	Todo el sistema educativo nacional	-	Acerca de las Comunidades Autónomas con características específicas y, en algunos casos, con lenguas propias que constituyen un patrimonio cultural común	1	13
				Acerca de las capacidades que la educación secundaria obligatoria contribuirá a desarrollar en los alumnos	1	
				Acerca de la posibilidad que proporciona la enseñanza de éste área para apreciar la riqueza y variedad del patrimonio natural y cultural	1	
		ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Acerca de actitudes comunes a toda el área de la materia, como la conservación y valoración del patrimonio, tanto natural y medio-ambiental como artístico, cultural, institucional e histórico	1	
				Objetivos generales (nº 6)	1	
				3. CONTENIDOS: 5. Sociedad y cambio en el tiempo (Actitudes)	1	
				3. CONTENIDOS: 3. Juegos y deportes (Actitudes)	1	
		Educación Física	-	Objetivos generales (nº 2)	1	
				3. CONTENIDOS: 3. Juegos y deportes (Actitudes)	1	
		Educación Plástica y Visual	-	Especificaciones para el cuarto curso. Acerca de la importancia de valorar el significado estético y cultural de aquellas manifestaciones del patrimonio cultural que constituyen la expresión del ser humano dentro de nuestra cultura	1	
				Objetivos generales (nº 3)	1	
				3. CONTENIDOS: 5. La música en el tiempo (Actitudes)	1	
		Música	-	3. CONTENIDOS: 6. Tecnología y sociedad (Actitudes)	1	
	1. INTRODUCCIÓN			1		
	PA	ESO	Ciencias de la Naturaleza	3. CONTENIDOS: 3. Los cambios químicos (Actitudes)	1	
				Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Acerca de actitudes comunes a toda el área de la materia, como la conservación y valoración del patrimonio, tanto natural y medio-ambiental como artístico, cultural, institucional e histórico	1
					Objetivos generales (nº 6)	1
		3. CONTENIDOS: 5. Sociedad y cambio en el tiempo (Actitudes)	1			
		Introducción	1			
		2º Bach	Historia del Arte	Objetivos generales (nº 5)	1	
				CONTENIDOS. 1. El arte como expresión humana en el tiempo y el espacio	1	
	PH	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Acerca de actitudes comunes a toda el área de la materia, como la conservación y valoración del patrimonio, tanto natural y medio-ambiental como artístico, cultural, institucional e histórico	1	
				Objetivos generales (nº 6)	1	
		2º Bach	Historia del Arte	3. CONTENIDOS: 5. Sociedad y cambio en el tiempo (Actitudes)	1	
				Introducción	1	
	PN	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Acerca de la posibilidad que proporciona la enseñanza de éste área para apreciar la riqueza y variedad del patrimonio natural y cultural	1	
				Acerca de actitudes comunes a toda el área de la materia, como la conservación y valoración del patrimonio, tanto natural y medio-ambiental como artístico, cultural, institucional e histórico	1	
Objetivos generales (nº 6)				1		
3. CONTENIDOS: 5. Actividades en el medio natural (Actitudes)				1		
PMA	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Acerca de actitudes comunes a toda el área de la materia, como la conservación y valoración del patrimonio, tanto natural y medio-ambiental como artístico, cultural, institucional e histórico	1	1	
PI	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Acerca de actitudes comunes a toda el área de la materia, como la conservación y valoración del patrimonio, tanto natural y medio-ambiental como artístico, cultural, institucional e histórico	1	1	
PLI	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Objetivos generales (nº 6)	1	1	
PS	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Objetivos generales (nº 6)	1	1	
P	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	3. CONTENIDOS: 1. Medio ambiente y conocimiento geográfico (Actitudes). Valoración y conservación del patrimonio	1	5	
			3. CONTENIDOS: 2. La población y el espacio urbano (Actitudes). Valoración y conservación del patrimonio	1		
			3. CONTENIDOS: 5. Sociedad y cambio en el tiempo (Actitudes). Valoración y conservación del patrimonio	1		
	Lenguas Extranjeras	-	3. CONTENIDOS: 4. Aspectos socioculturales (Conceptos)	1		
			2º Bach	Economía y Organización de Empresas		CONTENIDOS. 3: Estructura y análisis económico-financiero
	2º Bach	Historia				Introducción.
	PE	2º Bach	Economía y Organización de Empresas	Criterios de evaluación (nº 5)		1
Desarrollo Sostenible	2º Bach	Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente	CONTENIDOS. 5: El medio ambiente y el desarrollo sostenible.	2	4	
			Criterios de evaluación (nº 10)	2		

**Tabla 2.-** Tipos de patrimonio a los que hacen referencia las leyes educativas LGE (1970) y LOGSE (1990) según la etapa, la materia y el curso en el que aparecen, así como el número total de referencias a cada tipo. \*PC: Patrimonio Cultural. PP: Patrimonio Propio. PA: Patrimonio Artístico. PH: Patrimonio Histórico. PN: Patrimonio Natural. PMA: Patrimonio Medioambiental. PI: Patrimonio Institucional. PLI: Patrimonio Lingüístico. PS: Patrimonio Social. P: Patrimonio. PCO: Patrimonio Común. PE: Patrimonio Equilibrado.

La tabla 3 recoge los resultados de las menciones al patrimonio en la LOCE. La distribución es similar a la observada en la LOGSE, con muchas más referencias a los tipos relacionados con el patrimonio cultural que al patrimonio natural. Además, en este caso desaparecen las referencias al patrimonio medioambiental y tan solo se referencia el patrimonio natural en los objetivos de una asignatura de Geografía e Historia de la ESO. Se han observado menciones indirectas al patrimonio natural como la que se hace en los objetivos de las asignaturas de Ciencias de la Naturaleza y de

Biología y Geología cuando indican que el alumno debe saber “aplicar los conocimientos adquiridos en las Ciencias de la Naturaleza para disfrutar del medio natural, valorándolo y participando en su conservación y mejora”. Por su parte, en la asignatura de Ciencias de la Tierra y Medioambientales, se indica que estas ciencias son “un medio para aumentar la capacidad de percepción y valoración del entorno y de los problemas relacionados con su explotación por el ser humano”. También se menciona la “conciencia ambiental” en los contenidos sobre medio ambiente, política y sociedad. En

Ley	Tipo de patrimonio y términos afines	Curso/Ciclo/Etapa	Materia	Epígrafe y/o contexto	Referencias	Referencias totales
LOCE	PC	ESO	-	Objetivos de la Educación Secundaria Obligatoria	1	7
			Educación Plástica	Objetivos (nº 2)	1	
			Latín	Introducción	1	
			Música	Introducción	1	
		2º ESO	Educación Física	Contenidos. II. Habilidades específicas (1.7)	1	
				Contenidos. II. Habilidades específicas (3.6)	1	
	2º Bach	Historia del Arte	Criterios de evaluación (nº 6)	1		
	PA	ESO	-	Objetivos de la Educación Secundaria Obligatoria	1	7
			2º ESO	Geografía e Historia	Criterios de evaluación (nº 8)	
		3º ESO	Lenguas Extranjeras (Portugués)	III. Aspectos socioculturales (5)	1	
		2º Bach	Historia del Arte	Introducción	1	
				Introducción	1	
				Objetivos (nº 7)	1	
	Contenidos. 1. Aproximación a la Historia del Arte y a los Lenguajes Artísticos	1				
	PH	2º ESO	Geografía e Historia	Criterios de evaluación (nº 8)	1	2
		3º ESO	Lenguas Extranjeras (Portugués)	III. Aspectos socioculturales (5)	1	
	PM	4º ESO	Música	Criterios de evaluación (nº 8)	1	1
	PN	ESO	Geografía e Historia	Objetivos (nº 10)	1	1
	PL	ESO	Latín	Introducción	1	1
	1º Bach	Sociedad, Cultura y Religión	Introducción	1		
	PJ	ESO	Latín	Introducción	1	1
	PSC	ESO	Sociedad, Cultura y Religión	Objetivos (nº 5)	1	2
				Programas de Iniciación Profesional. Ámbito de Sociedad, Cultura y Religión	Objetivos (nº 3)	
	PCOM	ESO	Ética	Introducción	1	2
		2º Bach	Historia de España	Introducción	1	
	P	ESO	Geografía e Historia	Introducción	1	3
Latín				Objetivos (nº 10)	1	
Cultura Clásica				Criterios de evaluación (nº 9)	1	
PU	1º y 2º Bach	Griego I y II	Objetivos (nº 6)	1	1	
Diversidad Geológica	2º Bach	Geografía	Contenidos. 4. Naturaleza y medio ambiente en España	1	1	
Desarrollo Sostenible	3º ESO	Tecnología	Contenidos. 9. Tecnología y sociedad	1	5	
	4º ESO		Criterios de evaluación (nº 11)	1		
	4º ESO	Física y Química	Opción A. I. Fuerzas y energías (11. La química en la sociedad)	1		
	2º Bach	Ciencias de la Tierra y Medioambientales	Contenidos. III. Medio ambiente, política y sociedad (10. La respuesta del sistema humano)	1		
			Criterios de evaluación (nº 15)	1		

**Tabla 3.-** Tipos de patrimonio a los que hacen referencia las leyes educativas LOCE (2002) según la etapa, la materia y el curso en el que aparecen, así como el número total de referencias a cada tipo. \*PC: Patrimonio Cultural. PA: Patrimonio Artístico. PH: Patrimonio Histórico. PM: Patrimonio Musical. PN: Patrimonio Natural. PL: Patrimonio Literario. PR: Patrimonio Religioso. PJ: Patrimonio Jurídico. PSC: Patrimonio Sociocultural. PCOM: Patrimonio Compartido. P: Patrimonio. PU: Patrimonio Universal.

cuanto a otros términos afines, se han encontrado referencias a “desarrollo sostenible” en varias asignaturas, siendo Ciencias de la Tierra y Medioambientales la única del ámbito de las Ciencias Naturales. Otro término es el de “diversidad geológica”, que aparece por primera vez en una de las leyes evaluadas, aunque tampoco está presente en materias del ámbito de las Ciencias Naturales (ver tabla 3). El término diversidad también aparece en otros bloques y contenidos de la asignatura de Geografía de 2º de Bachillerato, pero siempre con una clara referencia a la parte biótica o paisajística del medio, siendo comunes las menciones a la pérdida de la diversidad en contextos como el de los recursos derivados de la biosfera (forestales, pesqueros, etc.). Probablemente la referencia más cercana a lo que se busca en este trabajo sería la que aparece en esta misma asignatura cuando se señala en el criterio de evaluación nº 3 que el alumno debe “conocer los rasgos generales del medio natural europeo y español, y la diversidad de conjuntos naturales, identificar sus elementos, su dinámica y sus interacciones y atender, especialmente, a la incidencia de la acción humana en el medio ambiente y en el territorio”. Aunque tampoco en este caso queda patente la relación que debería haber entre la biodiversidad o la diversidad de paisajes con respecto a la geodiversidad. En cuanto a la conservación del medio geológico no hay ninguna mención, aunque sí hay múltiples menciones “genéricas” a la conservación de la naturaleza o del medio, como cuando se señala como objetivo en la materia Biología y Geología de ESO “aplicar los conocimientos adquiridos en las Ciencias de la Naturaleza para disfrutar del medio natural, valorándolo y participando en su conservación y mejora” o cuando en la misma se establece como criterio de evaluación “realizar actividades en el medio natural que tengan como finalidad aprender a desenvolverse en él, comprometiéndose a su cuidado y conservación”. Finalmente, la LOCE presenta un total de 30 referencias a patrimonio. De éstas solo una hace referencia al patrimonio natural, suponiendo el 3,3%. Por otra parte y a modo de comparativa entre estas tres primeras leyes, se puede destacar que mientras en la LGE y en la LOCE la mayoría de las menciones aparecen en secciones de objetivos y/o introducción, en la LOGSE se dividen de una forma más equitativa entre la introducción y objetivos y los contenidos y criterios de evaluación.

La tabla 4 recoge los resultados de las menciones al patrimonio en la LOE. Al igual que en las leyes que le preceden, aparecen claramente más menciones a tipos relacionados con el patrimonio cultural que con el natural. En cuanto a su presencia en las diferentes asignaturas, hay que destacar que por primera vez el patrimonio natural aparece mencionado en asignaturas del área de las ciencias naturales (principalmente en Bachillerato). También es destacable que la única mención a patrimonio de la humanidad se haga en la asignatura de Ciencias de la Naturaleza en 3º de la ESO. Por otra parte, en esta ley las secciones donde aparecen las menciones se dividen entre introducción, objetivos, descriptores de las materias, contenidos y criterios de evaluación, aunque se puedan observar algunas diferencias entre materias, al estar siempre relacionadas con Humanidades, no se van a detallar en este trabajo. Además, hay menciones a diversidad geológica, sostenibilidad y desarrollo sostenible.

Mientras que el término “desarrollo sostenible” aparece en varias asignaturas, tanto del ámbito de las ciencias naturales como de las ciencias sociales y la tecnología, los otros dos términos solo aparecen en una asignatura cada una, siendo de nuevo decepcionante el caso de la “diversidad geológica” que aparece mencionada en una asignatura que no pertenece al ámbito de las ciencias naturales (ver tabla 4). La sostenibilidad se menciona dentro del currículo de Bachillerato, en la introducción de la asignatura de Ciencias para el Mundo Contemporáneo indicando que “los contenidos giran alrededor de la información y la comunicación, la necesidad de caminar hacia la sostenibilidad del planeta, la salud como resultado de factores ambientales y responsabilidad personal, los avances de la genética y el origen del universo y de la vida”. También hay menciones en los contenidos y criterios de evaluación de la misma asignatura, como cuando se señala el criterio nº 5 indicando que los alumnos deben saber “establecer relaciones causales con los modelos de desarrollo dominantes, y son capaces de predecir consecuencias y de argumentar sobre la necesidad de aplicar criterios de sostenibilidad y mostrar mayor sensibilidad ciudadana para actuar sobre los problemas ambientales cercanos”. También hay menciones en asignaturas claramente del ámbito de las ciencias naturales como la mención directa en la asignatura de Ciencias de la Tierra y Medioambientales indicando que “[...] abordan las cuestiones medioambientales planteadas a nivel mundial, regional y local. Su estudio promueve un conocimiento riguroso sobre nuestro planeta y una reflexión científica sobre los problemas medioambientales, [...] a la vez que proporciona una visión para encontrar la manera de contribuir a mitigar los riesgos y aprovechar eficazmente los recursos en un contexto de sostenibilidad”. En relación con los términos “geodiversidad” y “geoconservación” hay que señalar que aunque ninguna aparece mencionada como tal, sí hay algunas referencias que permiten inferir su presencia. Así, por ejemplo, con respecto a las competencias a trabajar en la ESO, dentro de la “Competencia en el conocimiento y la interacción con el mundo físico”, se expone que “[...] lleva implícito ser consciente de la influencia que tiene la presencia de las personas en el espacio, su asentamiento, su actividad, las modificaciones que introducen y los paisajes resultantes, así como de la importancia de que todos los seres humanos se beneficien del desarrollo y de que éste procure la conservación de los recursos y la diversidad natural [...]”. También se señala, en los contenidos del bloque 3 del primer curso de la ESO, en la asignatura de Ciencias de la Naturaleza, la diversidad de rocas y minerales. Igualmente se puede mencionar el criterio de evaluación nº 7 del segundo curso de la ESO en esta asignatura que señala como un criterio “saber identificar los componentes bióticos y abióticos de un ecosistema cercano, valorar su diversidad [...]”. Fuera del ámbito de las ciencias naturales también hay algunas alusiones, como cuando se menciona en el primer curso de la ESO, en la asignatura de Ciencias Sociales, Geografía e Historia, un contenido del bloque 2 (La Tierra y los medios naturales) “Caracterización de los principales medios naturales, identificando los componentes básicos del relieve, los climas, las aguas y la vegetación; comprensión de las interacciones que mantienen. Valoración de la diversidad

Ley	Tipo de patrimonio y términos afines	Curso/Ciclo/Etapa	Materia	Epígrafe y/o contexto	Referencias	Referencias totales
LOE	PH	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Objetivo nº 7 de la materia para toda la ESO	1	4
		1º, 2º y 3º ESO	Educación Plástica y Visual	Contenidos del bloque 5 de los cursos primero a tercero	1	
		Bach	Historia de España	Descripción de la materia (Ref. ind.)	1	
		Bach	Historia de la Música y de la Danza	Objetivo nº 6 de la materia	1	
	PC	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO y objetivo nº 7 de ésta para toda la ESO	4 + 1	24
		1º ESO		Contenidos del bloque 1 (Ref. ind.) y criterio de evaluación nº 7		
		ESO	Educación Física	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO	1	
		ESO	Educación Plástica y Visual	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO y contenidos del bloque 5 de los cursos primero a tercero	3	
		ESO	Música	Objetivo nº 4 de la materia para toda la ESO	1	
		4º ESO	Latín	Objetivo nº 8 de la materia Objetivo nº 5 de la materia (Ref. ind.), contenidos del bloque 2 (Ref. ind.) y criterio de evaluación nº 3 (Ref. ind.)	1 + 4	
		ESO	Historia y Cultura de las Religiones	Objetivo nº 4 de la materia para toda la ESO	3	
		1º, 2º y 3º ESO		Criterios de evaluación 5 y 6 de los cursos primero a tercero		
		4º ESO	Alimentación, Nutrición y Salud	Descripción de la materia, contribución a la adquisición de las competencias básicas en la ESO, objetivo nº 5 de la materia y criterio de evaluación nº 9	4	
		Bach	Artes Escénicas	Objetivo nº 10 de la materia	1	
	Bach	Historia de la Música y de la Danza	Objetivo nº 6 de la materia	1		
	PA	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Objetivo nº 7 de la materia para toda la ESO	5	17
		1º y 2º ESO		Contenidos del bloque 1 de los cursos primero y segundo y criterios de evaluación nº 7 y 8 del primer curso		
		4º ESO	Latín	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO, objetivo nº 8 de la misma y contenidos del bloque 4	4	
		1º, 2º y 3º ESO	Historia y Cultura de las Religiones	Criterios de evaluación nº 5 y 6 de los cursos primero a tercero	2	
		4º ESO	Ciencias aplicadas a la Actividad Profesional	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO	1	
		4º ESO	Alimentación, Nutrición y Salud	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO (Ref. ind.)	1	
		Bach	Historia del Arte	Descripción de la materia, objetivo nº 5 de la misma y contenidos del bloque 7	3	
	Bach	Historia de la Música y de la Danza	Objetivo nº 6 de la materia	1		
	PL	ESO	Lengua Castellana y Literatura	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO y objetivo nº 10 de la misma	2	3
		4º ESO	Latín	Contenidos del bloque 4	1	
	PM	1º y 3º ESO	Música	Contenidos del bloque 4 de los cursos primero a tercero	1	2
		Bach	Historia de la Música y de la Danza	Objetivo nº 6 de la materia (Ref. ind.)	1	
	PAR	4º ESO	Latín	Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas en la ESO, contenidos del bloque 4 y criterio de evaluación nº 2	5	7
		Bach	Latín I	Criterio de evaluación nº 7 de la materia (Ref. ind.)	1	
		Bach	Latín II	Contenidos del bloque 4 (Ref. ind.)	1	
PN	ESO	Ciencias Sociales, Geografía e Historia	Objetivo nº 7 de la materia para toda la ESO	1	4	
	1º, 2º y 3º ESO	Educación para la Ciudadanía y los Derechos Humanos	Contenidos del bloque 3 de los cursos primero a tercero	1		
	Bach	Biología y Geología	Objetivo nº 7 de la materia	1		
	Bach	Ciencias de la Tierra y Medioambientales	Contenidos del bloque 4 (Ref. ind.)	1		
PHU	3º ESO	Ciencias de la Naturaleza	Criterio de evaluación nº 12	1	1	
PI	4º de ESO	Latín	Objetivo nº 8 de la materia	1	1	
Diversidad geológica	Bach	Geografía	Contenidos del bloque 3	1	1	
Sostenibilidad	Bach	Ciencias de la Tierra y Medioambientales	Introducción.	2	4	
			Contenidos del bloque 6	1		
			Criterios de evaluación (nº 9)	1		
Desarrollo Sostenible	ESO	Ciencias de la Naturaleza	Introducción	1	12	
			Contribución de la materia a la adquisición de las competencias básicas	1		
			Contenidos del bloque 2	1		
			Criterios de evaluación (nº 9)	2		
	4º ESO	Tecnología	Contenidos del bloque 6	1		
			Contenidos del bloque 2	1		
	4º ESO	Ciencias Aplicadas a la Actividad Profesional	Criterios de evaluación (nº 10)	1		
	4º ESO	Profesional e Iniciativa Emprendedora	Criterios de evaluación (nº 8)	1		
Bach	Ciencias para el Mundo Contemporáneo	Ciencias de la Tierra y Medioambientales	Criterios de evaluación (nº 6)	1		
		Ciencias de la Tierra y Medioambientales	Criterios de evaluación (nº 9)	2		

**Tabla 4.-** Tipos de patrimonio a los que se hace referencia en la LOE (2006) según la etapa, la materia y el curso en el que aparecen. En algunas materias no se concreta el curso debido a que se hace referencia a los dos ciclos de la ESO y/o a todo el Bachillerato. *Ref. ind.* (Referencia indirecta) indica que se hace alusión a un tipo de patrimonio concreto sin que se nombre directamente como tal en el texto de la ley. \*PH: Patrimonio Histórico. PC: Patrimonio Cultural. PA: Patrimonio Artístico. PL: Patrimonio Literario. PM: Patrimonio Musical. PAR: Patrimonio Arqueológico. PN: Patrimonio Natural. PHU: Patrimonio de la Humanidad. PI: Patrimonio Institucional.

como riqueza que hay que conservar”. En lo que respecta a Bachillerato, el objetivo nº 7 de la Biología y Geología es “Integrar la dimensión social y tecnológica de la biología y la geología, comprendiendo las ventajas y problemas que su desarrollo plantea al medio natural, al ser humano y a la sociedad, para contribuir a la conservación y protección del patrimonio natural”. En esta misma materia, dentro de los contenidos a impartir en el bloque 3 (Geodinámica externa e historia de la Tierra), se habla de la “alteración de las rocas y meteorización. Formación del suelo. La importancia de su conservación”, y se incluye como un criterio de evaluación de la asignatura. Finalmente, en cuanto a los resultados comparativos en la LOE, de un total de 63 referencias que contienen la palabra “patrimonio”, solo cinco, contando con la referencia a patrimonio de la humanidad (por aparecer en una asignatura de Ciencias Naturales), tienen relación con el patrimonio natural, lo que supone el 7,9%.

En relación con los datos referenciados en la ley de educación vigente (LOMCE), se vuelve a reproducir el patrón observado en las últimas leyes (Ver tabla 5). Así, solo hay dos menciones a tipos de patrimonio relacionados con el patrimonio natural. Mientras que el propio patrimonio natural solo se referencia en la asignatura de Geografía, la gran novedad es que se referencia por primera vez el patrimonio geológico, y esta mención es en una asignatura del ámbito de las Ciencias Naturales, concretamente en la Geología de 2º curso de Bachillerato. De forma general, es la ley en la que las menciones aparecen más equitativamente representadas entre las diferentes secciones, estando presentes en la introducción, descriptores de materias, contenidos, criterios de evaluación y estándares de aprendizaje. Otra novedad en esta ley es que por primera vez se ha encontrado una mención a parque natural, aunque esta aparece en la materia de Geografía e Historia de primer ciclo de la ESO. Del resto de términos del listado indicado en la metodología, tan solo se han encontrado menciones a “sostenibilidad” y varias menciones a “desarrollo sostenible”, en ambos casos relacionadas con materias del ámbito de las ciencias naturales, y a partir de 4º curso de la ESO. Como ejemplo se pueden reproducir lo que señala el criterio de evaluación 6 del bloque 1 “Observar las manifestaciones de la Geología en el entorno diario e identificar algunas implicaciones en la economía, política, desarrollo sostenible y medio ambiente” y el correspondiente estándar de aprendizaje 6.1 “identifica distintas manifestaciones de la Geología en el entorno diario, conociendo algunos de los usos y aplicaciones de esta ciencia en la economía, política, desarrollo sostenible y en la protección del medio ambiente”. En cuanto a “geodiversidad”, “diversidad geológica” o “geoconservación” no hay ninguna mención directa, aunque se pueden inferir algunas menciones indirectas como la que aparece en la Geografía de 2º de Bachillerato, cuando en los contenidos del bloque 2 se indica “el relieve español, su diversidad geomorfológica”. Por otra parte, hay múltiples menciones a la conservación del medio ambiente en la materia de Biología y Geología en ESO, aunque no aluden específicamente a la parte geológica o abiótica. Por ejemplo, para el primer ciclo de la ESO se indica que “el eje vertebrador de la materia girará en torno a los seres vivos y su interacción con la Tierra, incidiendo

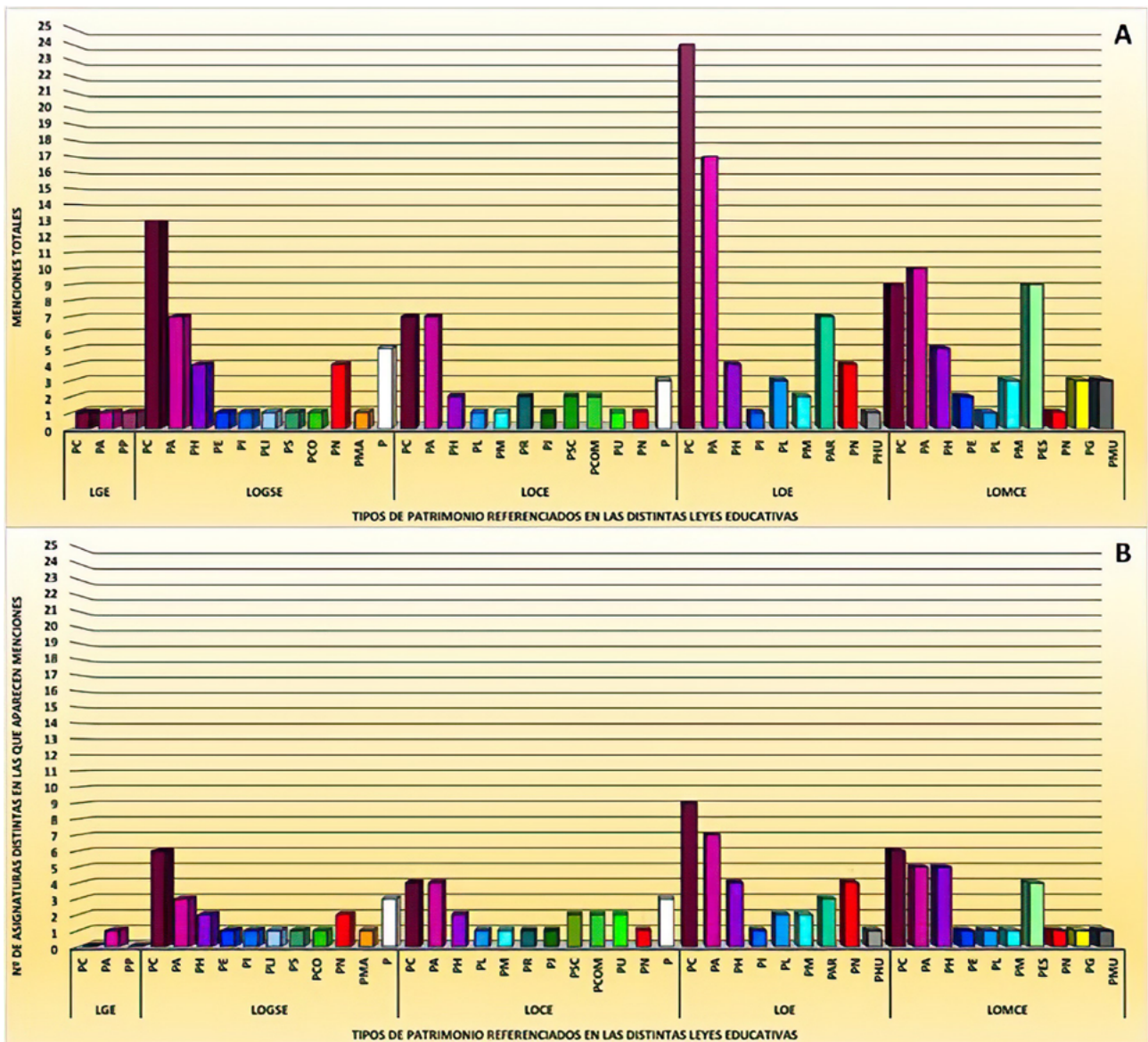
especialmente en la importancia que la conservación del medio ambiente tiene para todos los seres vivos”. También hay alguna mención similar en las asignaturas de la ESO “Ciencias aplicadas a la actividad profesional” y “Valores Éticos”. Finalmente, al analizar los resultados de datos para la LOMCE se obtienen un total de 46 menciones a patrimonio, de las que tan solo cuatro se relación con el patrimonio natural. Esto supone solo el 8,7%. Además cabe destacar que de estas cuatro menciones tres son al patrimonio geológico (el 6,4% del total de referencias).

## Discusión

Para facilitar la comparación visual de la evolución temporal de la presencia de los diferentes tipos de patrimonio en los currículos educativos y la discusión de los datos, las figuras 2a y 2b reflejan la importancia (número de menciones y número de asignaturas en las que aparece mencionado, respectivamente) que se le ha dado a los distintos tipos de patrimonio en cada una de las leyes analizadas. Según los criterios de agrupación mencionados en la introducción de este trabajo para los tres conjuntos generales de patrimonio (Fig. 1), el patrimonio cultural *sensu lato* y sus variantes se presentan en tonalidades de colores fríos (morados, azules y verdes), mientras que el patrimonio natural *sensu lato* y sus variantes se presentan en colores cálidos (tonalidades de rojo, naranja y amarillo), las menciones a patrimonio de la humanidad y patrimonio mundial (ambos considerados bienes mixtos) se muestran en tonos de grises, y las menciones al patrimonio *sensu lato* aparecen en blanco. Finalmente, las menciones a patrimonio universal y a patrimonio español aparecen siempre en contextos relacionados con materias de Humanidades, por lo tanto, aunque podrían *a priori* considerarse como bienes mixtos, se ha optado por considerarlos como parte del patrimonio cultural.

De los resultados obtenidos y reflejados en el apartado anterior se pueden extraer las ideas que se discuten a continuación:

Las referencias a cualquier tipo de patrimonio en la LGE son muy escasas, cuando no inexistentes (Tabla 2, Fig. 2). Esto podría tener, en parte, su explicación en la reducida conciencia política que existía hasta finales de los años 70 del siglo pasado basada, principalmente, en aspectos relacionados con la protección y la divulgación del patrimonio mundial ligado a la declaración de UNESCO (1972), y no demasiado enfocada a una verdadera sostenibilidad en relación con el medio natural. En la década de los ochenta, las primeras iniciativas españolas que tuvieron en cuenta el patrimonio natural, irónicamente aparecen referidas en el Artículo 1 de la aún vigente Ley del Patrimonio Histórico Español 16/1985, donde se recoge que el patrimonio cultural está formado por “los inmuebles y objetos muebles de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico. También forman parte del mismo el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas, así como los sitios naturales, jardines y parques, que tengan valor artístico, histórico y antropológico”. Esta ley ha supuesto históricamente una gran dificultad a la hora de poder gestionar el patrimonio paleontológico,



**Fig. 2.-** a) Comparativa de la evolución temporal de la presencia (número de menciones) de los diferentes tipos de patrimonio en los currículos educativos. b) Comparativa de la evolución temporal de la presencia (número de asignaturas que mencionan cada patrimonio) de los diferentes tipos de patrimonio en los currículos educativos. \*PC: Patrimonio Cultural. PA: Patrimonio Artístico. PP: Patrimonio Propio. PH: Patrimonio Histórico. PE: Patrimonio Equilibrado. PI: Patrimonio Institucional. PLI: Patrimonio Lingüístico. PS: Patrimonio Social. PCO: Patrimonio Compartido. PN: Patrimonio Natural. PMA: Patrimonio Medioambiental. P: Patrimonio. PL: Patrimonio Literario. PM: Patrimonio Musical. PR: Patrimonio Religioso. PJ: Patrimonio Jurídico. PSC: Patrimonio Sociocultural. PCOM: Patrimonio Común. PU: Patrimonio Universal. PAR: Patrimonio Arqueológico. PHU: Patrimonio de la Humanidad. PES: Patrimonio Español. PG: Patrimonio Geológico. PMU: Patrimonio Mundial.

pues es aquí donde aparece por primera vez citado y enmarcado junto a el arqueológico, que es claramente patrimonio cultural. Posteriormente, la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, en su artículo 3, considera patrimonio natural al “conjunto de bienes y recursos de la naturaleza fuente de diversidad biológica y geológica, que tienen un valor relevante medioambiental, paisajístico, científico o cultural”. Por último, la legislación autonómica recoge decenas de figuras de protección distintas, disponiendo así de un marco normativo que tiene relación, aunque de manera menos directa, con la gestión del patrimonio geológico muchas veces mezclando las competencias sobre patrimonio cultural y natural. Por lo tanto, atendiendo a que la legislación sobre

competencias es relativamente reciente, no es extraño que estos temas se empezasen a recoger de una forma más tardía en los currículos educativos debido a la compleja gestión que incluso hoy en día generan a nivel ejecutivo.

Por otra parte, el mayor número de referencias en todas las leyes se corresponden con el patrimonio cultural (13 menciones en la LOGSE, 7 en la LOCE, 24 en la LOE y 9 en la LOMCE) y dentro de éste al artístico (7 menciones en la LOGSE, 7 en la LOCE, 17 en la LOE y 10 en la LOMCE) y al histórico (4 menciones en la LOGSE, 7 en la LOCE, 4 en la LOE y 5 en la LOMCE). Tanto en la LOE (Tabla 4, Fig. 2b) como en la LOMCE (Tabla 5, Fig. 2b) estos tipos de patrimonio aparecen referenciados en varias asignaturas

a lo largo de todos los ciclos de la ESO y Bachillerato, ya sea en la descripción de esas materias, en sus objetivos o su contribución a la adquisición de las competencias básicas en el caso de la LOE, o la descripción de aquéllas, en los contenidos, criterios de evaluación o estándares de aprendizaje evaluables en el caso de la LOMCE. Además, en la LOE

aparecen 7 menciones al patrimonio arqueológico y en la LOMCE hasta 9 menciones al patrimonio español. Este hecho tampoco resulta del todo chocante, dado que, en general, a lo largo del último siglo la atención prestada y las figuras de protección a determinados bienes artísticos y culturales han ido siempre más avanzadas que los referidos a los naturales.

Ley	Tipo de patrimonio y términos afines	Curso/Ciclo/Etapa	Materia	Bloque (Contenidos, estándares de aprendizaje, criterios de evaluación)	Referencias	Referencias totales
LOMCE	PA	4º ESO	Artes escénicas y Danza	Estándar de aprendizaje nº 2.1 del bloque 1	1	10
		4º ESO	Educación Plástica, Visual y Audiovisual	Contenidos del bloque 1	1	
		1º Bach	Volumen	Descripción de la materia	1	
		2º Bach	Historia del Arte	Descripción de la materia, criterios de evaluación nº 5 de los bloques 1, 2, 3 y 4 y contenidos del bloque 6	6	
		2º Bach	Técnicas de Expresión Gráfico-Plástica	Descripción de la materia	1	
	PH	1º ciclo y 4º ESO	Cultura clásica	Descripción de la materia	1	5
		1º Bach	Latín	Criterio de evaluación nº 7 del bloque 5	1	
		1º ciclo ESO	Lengua Castellana y Literatura	Contenidos del bloque 3	1	
		1º ciclo ESO	Educación plástica, visual y audiovisual	Contenidos del bloque 2	1	
		2º Bach	Historia de España	Descripción de la materia	1	
	PC	1º ciclo ESO	Educación plástica, visual y audiovisual	Contenidos del bloque 2	2	9
		4º ESO	visual y audiovisual	Contenidos del bloque 1		
		1º ciclo ESO	Música	Criterio de evaluación nº 5 del bloque 3	1	
		1º ciclo ESO	Lengua Castellana y Literatura	Contenidos del bloque 3	1	
		1º Bach		Criterio de evaluación nº 7 y estándar de aprendizaje nº 7.1 del bloque 3	2	
		2º Bach	Historia de España	Descripción de la materia	1	
		2º Bach	Historia del Arte	Criterio de evaluación nº 7 del bloque 6	1	
	2º Bach	Literatura Universal	Descripción de la materia	1		
	PE	2º Bach	Economía de la empresa	Contenidos del bloque 6 (Ref. ind.) y estándar de aprendizaje nº 1.7 del bloque 6	1 + 1	2
	PMU	2º Bach	Historia del Arte	Criterio de evaluación nº 5 y estándares del aprendizaje nº 5.1 y 7.1 del bloque 6	3	3
	PL	2º Bach	Literatura Universal	Descripción de la materia	1	1
	PM	1º ciclo y 4º ESO	Música	Descripción de la materia y estándares de aprendizaje nº 1.1 y 1.2 del bloque 3	3	3
	PES	1º ciclo y 4º ESO	Cultura Clásica	Criterio de evaluación nº 2 y estándar de aprendizaje nº 2.1 del bloque 4	4	9
		1º ciclo ESO	Música	Estándares de aprendizaje nº 8.2 del bloque 1 y nº 5.1 y 5.2 del bloque 3	3	
		4º ESO	Artes escénicas y Danza	Criterio de evaluación nº 2 del bloque 1	1	
		1º Bach	Latín	Estándar de aprendizaje nº 7.2 del bloque 5	1	
	PN	2º Bach	Geografía	Contenidos del bloque 5	1	1
PG	2º Bach	Geología	Contenidos, criterio de evaluación nº 7 y estándar de aprendizaje nº 7.1 del bloque 10	3	3	
Parque Natural (s/p)	1º ciclo ESO	Geografía e Historia	Estándares de aprendizaje evaluables (nº 4.1) del bloque 2: El espacio humano	1	1	
Sostenibilidad	2º Bach	Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente	Descripción de la materia	1	1	
Desarrollo Sostenible	4º ESO	Ciencias Aplicadas a la Actividad Profesional	Contenidos del bloque 2	1	6	
			Criterio de evaluación nº 10 del bloque 2	1		
			Estándar de aprendizaje nº 10.1 del bloque 2	1		
	2º Bach	Geología	Descripción de la materia	1		
	Criterio de evaluación nº 6 del bloque 1		1			
2º Bach	Geología	Estándar de aprendizaje nº 6.1 del bloque 1	1			

**Tabla 5.-** Tipos de patrimonio a los que se hace referencia en la LOMCE (2013) según la etapa, la materia y el curso en el que aparecen. *Ref. ind.* (Referencia indirecta) indica que se hace alusión a un tipo de patrimonio concreto sin que se nombre directamente como tal en el texto de la ley. \*PA: Patrimonio Artístico. PH: Patrimonio Histórico. PC: Patrimonio Cultural. PE: Patrimonio Equilibrado. PMU: Patrimonio Mundial. PL: Patrimonio Literario. PM: Patrimonio Musical. PES: Patrimonio Español. PN: Patrimonio Natural. PG: Patrimonio Geológico.



Así, las primeras menciones a un patrimonio cultural, histórico o artístico y la protección de éstos como patrimonio de la humanidad datan de los años setenta del siglo pasado. Por otro lado, hay una dicotomía notable en las fechas que tienen que ver con los procesos ligados a la geoconservación. Ya se ha comentado anteriormente que, paradójicamente, España fue uno de los países pioneros en implementar figuras de protección legal de lo que hoy conocemos como patrimonio geológico. Sin embargo, como también se ha mencionado en la introducción de este trabajo, la Guerra Civil y el periodo de dictadura fueron importantes frenos a la legislación y concienciación sobre aspectos de conservación del medio natural, incluido el geológico. Posteriormente, ya avanzada la Democracia se vuelve a legislar sobre esta temática y hay nuevos impulsos desde la ya mencionada Carta de Digne, que fue el primer documento internacional donde aparece el término patrimonio geológico (Digne, 1991).

Centrándonos en el patrimonio natural (4 menciones en la LOGSE, 1 en la LOCE, 4 en la LOE y 1 en la LOMCE), es más que evidente que no se le da la misma importancia que a los mencionados en el párrafo anterior. Los datos porcentuales reflejan que en comparación con el patrimonio cultural y sus variantes, el patrimonio natural nunca supera el 12,8% de menciones (LOGSE) siendo prácticamente nulo en la LGE y en la LOCE. De hecho, la atención que ha recibido no solo ha sido escasa sino también muy poco homogénea. Así, por ejemplo, mientras que en la LOGSE y la LOCE solo aparece en materias del ámbito de las Ciencias Sociales (Tablas 2 y 3), y en la LOMCE únicamente se menciona en los contenidos del bloque 5 de la asignatura de Geografía de 2º de Bachillerato (Tabla 5), en la LOE también se referenciaba en asignaturas como Biología y Geología, y Ciencias de la Tierra y Medioambientales en Bachillerato, además de otras en cursos de la ESO (Tabla 4). Es cierto que en otros países (p. ej., Grecia) la geología está íntimamente ligada a la geografía en sus currículos educativos (Fermeli *et al.*, 2015), y en ese caso se podría justificar que las menciones a los términos buscados aparezcan en materias que incluyen la geografía, pero éste no es el caso de España, donde históricamente la geología ha estado más ligada a las ciencias naturales, impartándose conjuntamente con la biología (salvo en el curso previo al acceso a la universidad), y en ocasiones con una perspectiva colectiva de las ciencias, impartándose conjuntamente con la biología, la física y la química. En este sentido lo más lógico sería que no solo las referencias fuesen más numerosas en asignaturas del ámbito de las ciencias naturales, sino que además estas menciones apareciesen tanto en objetivos como en contenidos y criterios de evaluación, para poder vertebrar mejor los materiales didácticos implementados por las editoriales que preparan estos materiales para la educación secundaria, y para facilitar la propia labor de los docentes de organizar la programación didáctica del aula.

Dentro de las tipologías que se incluyen en el patrimonio natural, en lo concerniente al patrimonio geológico, cabe destacar que solo aparece referenciado en la LOMCE (Tabla 5), aunque únicamente sea en la Geología de 2º de Bachillerato, representa el 6,4% de las menciones totales a algún tipo de patrimonio en esta ley. Además, dicha referencia se hace tanto en los contenidos como en los criterios de evaluación y

estándares de aprendizaje del bloque 10, lo que proporciona más coherencia a cómo se estructuran e interrelacionan dichos bloques. En este sentido, si evaluamos exclusivamente la LOMCE, cabe destacar que este tipo de referencia en contenidos, criterios y estándares que es la que, *a priori*, parece la más lógica, es sin embargo, bastante excepcional. Así, por ejemplo, el patrimonio natural, que aparece referenciado en los contenidos del bloque 5 de Geografía de 2º de Bachillerato, no aparece en los criterios de evaluación ni en los estándares de aprendizaje evaluables (Tabla 5). Este hecho también se observa en el resto de leyes analizadas. Por citar otro ejemplo, en la LOE, hay menciones al patrimonio natural que aparecen únicamente en la descripción de la materia (Biología y Geología de Bachillerato) o en los objetivos de la misma, mientras que en los contenidos están ausentes. Ya destacaron Fesharaki *et al.* (2019) la poca homogeneidad en la presencia de diversos conceptos en los contenidos, estándares y criterios de evaluación en la LOMCE, así como la falta de menciones a la paleontología o a la mineralogía o sus interrelaciones con algunos campos de la biología. Por lo tanto, parece que es un rasgo común a las diferentes temáticas tratadas, al menos en lo que a las Ciencias Naturales (Biología y Geología) se refiere. En este sentido, una enseñanza inter y multidisciplinar es de gran importancia para que el estudiante tenga la percepción del conjunto, de que los problemas reales no se suelen solucionar con la intervención de un solo especialista sino de la interacción de especialistas de diferentes campos del saber. Pero esta generalidad es aún más destacable cuando se hace referencia a aspectos del patrimonio natural, donde es imposible entender la dinámica de pérdida de biodiversidad o degradación del medio sin tener en cuenta la geodiversidad, los procesos geológicos y la propia acción humana. Consecuentemente, lo relativo a la conciencia ambiental, la protección del patrimonio natural y otros aspectos relacionados, se deberían enseñar desde un punto de vista multidisciplinar en el que intervengan la parte biológica, geológica, ambiental, social, económica, etc.

Con respecto al patrimonio paleontológico, no se hace ningún tipo de referencia o mención a él en las asignaturas relacionadas con las ciencias de la Tierra y de la vida (ni en ninguna otra) en ninguno de los currículos. Si bien es cierto que forma parte del patrimonio geológico, y por tanto, también del natural, como acabamos de mostrar, la importancia que se da a éstos en el currículo también es extremadamente escasa en comparación con los tipos de patrimonio incluidos en el cultural. Este hecho es notable, más aún cuando sí existe representación en varias leyes de educación de otros tipos de patrimonio específicos que se incluyen en materias que se imparten únicamente durante un curso (como es el caso del patrimonio equilibrado en Economía de la Empresa, de 2º de Bachillerato en la LOE), o asignaturas que no forman parte de las troncales de ninguna modalidad (como es el caso del patrimonio musical en las asignaturas de Música, tanto de la LOE como de la LOMCE). Por el contrario, Biología y Geología, que en la LOMCE es una de las asignaturas troncales de la modalidad de Ciencias en todos los cursos de la ESO y primer curso de Bachillerato, no incluye referencia alguna al patrimonio paleontológico, ni siquiera al geológico o al natural.

En relación con estas últimas observaciones, a pesar de que es un campo que ha ido adquiriendo una importancia cada vez mayor desde finales del siglo pasado (Alcalá, 1999; Morales, 1996; Morales *et al.*, 2002), desde la LGE (1970) hasta la actual LOMCE, la relevancia que se ha dado al patrimonio paleontológico ha sido nula en las enseñanzas mínimas o currículos estatales para la ESO y Bachillerato. Como se señala en los resultados, aparecen algunas referencias indirectas (más relacionadas con el patrimonio natural que con el paleontológico) cuando se mencionan aspectos como “disfrutar del medio natural, valorándolo y participando en su conservación y mejora” o la “conciencia ambiental”, pero en ningún caso hay un desarrollo que permita aplicar estos aspectos al desarrollo de unos contenidos o a unos estándares de aprendizaje relacionados con la paleontología. Además, es importante resaltar que incluso cuando aparecen referencias al patrimonio natural (o al geológico) son en asignaturas de modalidad u optativas que cursan solo parte de los alumnos (generalmente un porcentaje pequeño de éstos), siendo la excepción las menciones en la asignatura “Educación para la ciudadanía y los derechos humanos” de la LOE, que referencia estos conceptos en varios cursos de la ESO (Tabla 4). Por lo tanto, al terminar la educación obligatoria, solo un mínimo porcentaje de alumnos pueden haber recibido alguna información sobre el patrimonio natural o el geológico, en un contexto relacionado con las Ciencias de la Naturaleza que les permita valorar de forma crítica la importancia de la protección y conservación de estos tipos de patrimonio.

Por otra parte, en la búsqueda del resto de terminología relacionada con el patrimonio se han encontrado muy escasas menciones. Estas menciones, además, son muy poco homogéneas en las diferentes leyes y aparecen y desaparecen según se implementa o deroga cada ley. El único caso cuya tendencia parece indicar que va adquiriendo cierta importancia y su presencia empieza a ser constante en diversas asignaturas e incluso aparece como un eje transversal en los currículos, es la terminología relacionada con el desarrollo sostenible. Pero incluso en este sentido, cuando se profundiza en el desarrollo de las leyes, se observan grandes diferencias en lo relativo a la parte natural, entre la importancia que se proporciona a la parte biótica del ambiente y la que se le da a la parte abiótica (geológica). Así, las referencias a la importancia de la diversidad biológica son muy comunes en las últimas leyes evaluadas, e incluso lo relativo a la diversidad paisajística, mientras que los equivalentes geológicos (geodiversidad o diversidad geológica, geoparque, parque geológico, etc.) no reciben en ningún caso el mismo tratamiento, estando en general ausentes de los currículos. Es imprescindible dar una visión de conjunto al estudiante, y por extensión al ciudadano, sobre la protección del medio. Así, es importante que los currículos, los materiales didácticos, las guías docentes y la propia formación de los futuros profesores de educación secundaria, incluyan una importante presencia de las interacciones que hay entre la parte viva y la inerte o entre la biología y la geología, con la lógica presencia de las interacciones físico-químicas que conllevan estas relaciones. La geodiversidad es el sustento de la biodiversidad, y esto debe quedar muy patente para el estudiante

y para cualquier ciudadano. Por ejemplo, cuando se discute sobre la importancia de proteger la flora o la fauna de un determinado lugar, hay que entender que las condiciones en las que viven estos seres están íntimamente relacionadas con la geología y, por lo tanto, si estas condiciones cambian será difícil o prácticamente imposible mantener la biodiversidad local. Muchas plantas se han adaptado a un tipo concreto de sustrato, ya sea por su quimismo (plantas acidófilas, basófilas, halófitas, etc.) o simplemente por la capacidad que tienen de poder establecerse sobre dicho sustrato (buena aireación, capacidad de circulación del agua, poca resistencia a la profundización de las raíces, etc.). Lo mismo ocurre con la micro y la mesofauna edáfica, que no solo se relacionan con determinados tipos de sustratos, sino que además necesitan establecerse a determinada profundidad en ese sustrato, viéndose claramente afectadas cuando estas condiciones cambian, aunque sea ligeramente (Martín Perea *et al.*, 2019 y citas interiores).

En relación con estos resultados, cabría preguntarse si es posible esperar que un ciudadano, que no ha tenido en su etapa formativa ninguna información sobre estos tipos de patrimonio, sea un ciudadano concienciado de la importancia de su protección y preservación. Esta falta de apelaciones al patrimonio paleontológico, geológico y natural indica que aún se deben llevar a cabo modificaciones curriculares a este respecto, principalmente en las asignaturas relacionadas con las Ciencias de la Tierra y de la vida. Pero no sólo deben realizarse cambios a nivel curricular. Si se tienen en cuenta aspectos tratados en este trabajo, como las ideas clave para la ESO, la educación inclusiva, equitativa y de calidad, propuestas como uno de los objetivos fundamentales de la Agenda 2030 (ODS4), o las apelaciones a una educación para el desarrollo sostenible y para mejorar la capacidad inclusiva del sistema educativo a todos los niveles en la nueva propuesta de ley educativa (LOMLOE), también deberían desarrollarse cambios en materia de recursos y estrategias educativas y, a fin de cuentas, en formación del profesorado. En este sentido, Monteagudo y Oliveros (2016) exponen que “existen las propias limitaciones y problemáticas (ideológicas, epistemológicas y metodológicas) derivadas de la enseñanza del patrimonio, como la visión restrictiva del mismo que docentes, alumnos, materiales didácticos y gestores de patrimonio le otorgan al poner énfasis casi exclusivamente en los elementos monumentales sin dar valor a otras formas de patrimonio que sería lo deseable. A esto se añaden las propias carencias del profesorado que no han tenido una formación inicial y permanente en didáctica patrimonial, que ponga atención en la formación de competencias profesionales de su enseñanza”. De todo lo anterior se puede inferir que son de igual importancia los cambios necesarios a nivel docente (trabajar la temática del patrimonio implementando metodologías más dinámicas e inclusivas) que a nivel legislativo (implica modificar los actuales currículos educativos). Además, la necesidad de generar espacios para una formación continua de los docentes y su capacitación en las especificidades de la didáctica del patrimonio, ya ha sido resaltada por diversos autores (Candrea y Susacasa, 2003; Cuenca, 2003).

## Reflexiones finales y sugerencias de mejora

De acuerdo con los resultados obtenidos, se considera importante añadir referencias al patrimonio natural, tanto geológico como paleontológico en las nuevas leyes de educación, y planteamos algunas sugerencias para que los cambios venideros no se reduzcan a la inclusión de algunos términos en los currículos, sino un cambio amplio y ambicioso en los propios planteamientos didácticos del profesorado en cuanto a la formación que deberían tener sus alumnos y alumnas a este respecto.

### *Respecto al currículo*

En el IV Congreso Mundial de la Naturaleza que tuvo lugar en Barcelona en 2008, la Asamblea General de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) aprobó la moción titulada “Conservación de la geodiversidad y del patrimonio geológico”. La adopción de esta resolución inició una nueva etapa para tratar de poner fin a un olvido injustificable y supuso un primer paso para detener la destrucción del patrimonio geológico o, dicho de otra manera, para evitar que la Tierra continúe perdiendo “su memoria”. Esta resolución se basó en el reconocimiento “del patrimonio geológico como un patrimonio natural con valores culturales, estéticos, de paisaje, económicos y/o intrínsecos que es necesario preservar y transmitir a las futuras generaciones” (Resolución 4.040 de la UICN).

Los legisladores y el profesorado de ciencias deberían tener presente las implicaciones didácticas, sociales y culturales que supone la inclusión en los currículos de ESO y Bachillerato de contenidos, criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables en los que se haga referencia concreta al patrimonio geológico y paleontológico. El patrimonio natural debería presentar el mismo grado de relevancia que el artístico, el histórico o el cultural dentro de dichos currículos, e incluir menciones y referencias al patrimonio paleontológico dentro de las asignaturas relacionadas con las ciencias de la Tierra y de la vida sería fundamental para proporcionarle el valor que merece. Además, trabajar el patrimonio paleontológico en el aula permitiría no sólo cumplir con los objetivos expresamente académicos reflejados en esos currículos, sino que favorecería la formación de personas con un mayor sentido crítico y una mayor concienciación sobre la enorme importancia y necesidad de cuidar y preservar el medio natural, ya que es una ciencia capaz de dar una perspectiva temporal, algo que otras ciencias no pueden reflejar. Diversos estudios han indicado justamente que los tiempos remotos, los eventos catastróficos, las extinciones o los grandes cambios del planeta, son algunos de los temas que más interesan al alumnado de educación secundaria, y que serían, por lo tanto, aspectos cuya inclusión en la enseñanza a través de la geología y la paleontología ampliaría la motivación del alumnado (Trend, 2007). Además, este tipo de eventos o grandes cambios no solo tendrían una función motivadora, sino que serían, en muchos casos, desencadenantes del interés y la curiosidad por saber cómo son y cómo serán los cambios ambientales actuales y futuros (Fermeli *et al.*,

2015), siendo este un buen punto de partida para la concienciación en la importancia de un desarrollo sostenible y la conservación del medio.

La Ley Orgánica de modificación de la LOE (LOMLOE), que fue aprobada en el Consejo de Ministros y publicada por el Boletín Oficial de las Cortes en febrero de 2019 y, en la actual legislatura, en marzo de 2020, presenta una única referencia al patrimonio en el artículo 23, centrado en los objetivos de la ESO y donde se menciona “Conocer, valorar y respetar los aspectos básicos de la cultura y la historia propias y de los demás, así como el patrimonio artístico y cultural”. Sin embargo, hay que tener en cuenta que uno de los cinco ejes transversales que se han determinado para ayudar a alcanzar los objetivos principales es el de la educación para el desarrollo sostenible. Por tanto, sería aún más lógico esperar que, en próximas modificaciones a esta nueva ley, se hagan más referencias directas al patrimonio natural, geológico y paleontológico en los objetivos, contenidos y/o criterios de evaluación específicos de las asignaturas relacionadas con las ciencias de la vida y de la Tierra. Además, sería imperativo dotar de una mayor interrelación a la parte biótica y abiótica del medio, de forma que el alumnado entendiese que la geodiversidad y la biodiversidad deben comprenderse con un enfoque holístico.

Otro aspecto que debería ser revisado de cara a próximas modificaciones de la LOMLOE, es el hecho de que el patrimonio paleontológico y el patrimonio arqueológico son distintos tipos de patrimonio, por lo que no se deben tratar de la misma forma (Díaz-Martínez *et al.*, 2016; Fernández-Martínez, 2018). A nivel estatal, el patrimonio paleontológico es parte del patrimonio natural, mientras que el arqueológico está regulado como parte del patrimonio cultural (Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad). Sin embargo, a nivel de comunidades autónomas, que son las que tienen transferidas estas competencias, la legislación que regula el patrimonio paleontológico puede ser muy variable (Delvene *et al.*, 2018). Es importante que el profesorado y el alumnado tengan claras estas diferencias ya desde los primeros cursos de la ESO, por lo que debería quedar reflejado también en la ley. De esta forma, los futuros profesionales poseerán las capacidades para legislar de forma correcta y se evitarán algunos de los problemas que existen en la actualidad, como es el caso de ambigüedad de las leyes que hacen referencia a la protección y conservación del patrimonio paleontológico, que no puede ser tratado de forma igual al patrimonio arqueológico (Alcalá, 1999; Morales, 1999; Vegas *et al.*, 2018).

### *Respecto a la labor docente y de divulgación*

Como ya se ha comentado y teniendo en cuenta las propuestas de la Agenda 2030, es preciso incluir en los currículos educativos competencias que incentiven la adquisición de valores éticos en favor de la sostenibilidad social y ambiental. Para abordar el problema no solo desde la perspectiva del currículo sino desde varios frentes, resultaría esencial que los centros educativos impulsasen el desarrollo de experiencias que favorezcan el conocimiento y el contacto directo del alumnado con el entorno natural, fomentando su

implicación en la búsqueda de soluciones a los problemas locales. En este sentido, los contenidos relacionados con el patrimonio paleontológico, geológico y natural resultan idóneos para organizar cualquier tipo de salida de campo, ya sea en las proximidades del entorno educativo, visitas a museos o centros de interpretación, rutas geológicas urbanas o visitas a yacimientos paleontológicos. Algunos ejemplos exitosos de la aplicación lúdico-educativa de estas ciencias son el conjunto paleontológico de Teruel-Dinópolis, el museo del Jurásico de Asturias, las actividades en los yacimientos de Atapuerca y el museo asociado a la evolución humana en Burgos o las actividades en el centro de interpretación y en el Geoparque de la Costa Vasca.

Muchos yacimientos paleontológicos tienen jornadas de puertas abiertas y actividades de divulgación para el público general, e incluso algunos yacimientos son pioneros en la enseñanza informal a través de salidas programadas de alumnos a las áreas paleontológicas. Este es el caso de los yacimientos de Somosaguas, que no solo son una cantera de formación de estudiantes universitarios en actividades formales, sino que a lo largo del año reciben a cientos de alumnos de todas las edades y cursos que realizan actividades relacionadas con la geología, la paleontología y el medio ambiente (Castilla *et al.*, 2006, Fesharaki *et al.*, 2012), e incluso por medio de las nuevas tecnologías es posible realizar visitas sin la necesidad de guías (Cárdaba *et al.*, 2018). Tal y como señalan Fesharaki *et al.* (2012), estas visitas no solo han supuesto un aumento constante del interés de los ciudadanos por esta temática y su conocimiento, sino que son una de las actividades que están sirviendo en el “reclutamiento” de futuros estudiantes para los Grados de Geología y ciencias afines.

Desde un punto de vista didáctico, las salidas al campo, siempre que estén bien planteadas, permiten al alumnado trabajar de forma práctica en la resolución de problemas geológicos o medioambientales reales, mejorando, según diversos estudios, la capacidad de trabajo en equipo, la construcción de una visión interdisciplinar de las ciencias para resolver problemas reales y siendo una vía efectiva para la enseñanza de la sostenibilidad (Orion y Fortner, 2003; Stokes y Boyle, 2009). A pesar de estos beneficios demostrados de las salidas de campo, algunos autores indican que no se puede simplificar la relación entre salidas de campo o visitas a lugares con interés patrimonial, con un cambio inmediato de actitudes del alumnado en la temática de la conservación o la sostenibilidad (Sandell y Öhman, 2013), por lo que es necesario que no sean un “paréntesis” en la organización que hace el docente, sino que deben servir como un eje vertebrador de parte o la totalidad de materias relacionadas con esta temática, de forma que también permitiesen valorar al alumnado la complejidad de las soluciones a los problemas reales y la multitud de campos del saber y de profesionales que tienen que intervenir en la solución.

En el artículo 24.3 de la LOMLOE se plantea la posibilidad de que se pueda configurar, como materia optativa, un estudio monográfico o un proyecto de colaboración con un servicio a la comunidad en alguno de los tres primeros cursos de la ESO. Como se indica en dicho artículo, ese tipo de proyectos están normalmente relacionados con la educa-

ción ambiental y buscan concienciar sobre la importancia de conservar el medio ambiente, animando a que el propio alumnado desarrolle medidas en su entorno reciclando, ahorrando energía y recursos como el agua, o informándose y formándose sobre todo lo relacionado con el cambio climático. En este caso, la vulnerabilidad y el riesgo de degradación (ya sea natural o antrópico) que sufren en la actualidad muchos yacimientos, harían que el patrimonio paleontológico inmueble sea un aspecto muy a tener en cuenta para plantear e implementar ese tipo de proyectos durante la ESO, o como proyectos de investigación algo más desarrollados en Bachillerato. Es interesante que el alumnado pueda tener una visión aplicada de la geología y la paleontología; en este sentido, en propuestas como los proyectos mencionados se deberían visibilizar que las actuales leyes de patrimonio exigen la presencia de especialistas (en este caso paleontólogos) a pie de obra, para hacer el seguimiento de las mismas con el objetivo de la protección del patrimonio, siendo éste una salida laboral para parte de los estudiantes universitarios de esta rama de las ciencias. Otra salida laboral en auge y relacionada con esta temática es el emprendimiento en empresas de ocio geológico (geoturismo) que necesitan especialistas en enseñanza, divulgación y gestión científica en geoparques, rutas naturales y geológicas, etc.

Además, la geología, la paleontología y campos afines, proporcionan tanto conceptos e ideas (como la fosilización, la evolución o el tiempo geológico) como objetos tangibles (fósiles, rocas, sedimentos, minerales, etc.), ofreciendo una amplia gama de posibilidades didácticas a los docentes en la enseñanza formal de estas ciencias. El hecho de poder salir de la rigidez del aula y participar en actividades de laboratorio, visitas guiadas o salidas de campo, permite crear un ambiente estimulante, distendido y participativo en el que los alumnos sean capaces de reflexionar de forma lógica sobre la información que están recibiendo, llevar a la práctica nuevos conceptos que estén asimilando y recibir una continua retroalimentación por parte del profesorado (Orion, 1989; Orion y Hofstein, 1994; Stokes y Boyle, 2009). En este sentido, algunas de las experiencias descritas en la bibliografía muestran resultados esperanzadores en lo que a la motivación y al aprendizaje de estas ciencias se refiere. Por ejemplo, los trabajos de Castilla *et al.* (2006), Salas-Herrera *et al.* (2019) o Sanz-Pérez *et al.* (2020), muestran diferentes posibilidades para trabajar conceptos, aptitudes y actitudes a partir de experiencias referidas a la visita a yacimientos paleontológicos y a actividades de gamificación relacionadas con la historia de la Tierra y la vida, respectivamente.

Esta última reflexión no solo es aplicable a la educación formal, sino que es una de las vías más exploradas en los últimos años para la enseñanza no formal y la divulgación de estas ciencias (Alcalá *et al.*, 2010; Fesharaki, 2016). En este sentido, resulta esencial la utilización de recursos didácticos atractivos que permitan la transmisión de conocimiento de una manera eficaz, así como el empleo de materiales de bajo coste y de fácil accesibilidad (Iglesias Álvarez *et al.*, 2015). Del mismo modo, debe incentivarse el diseño universal e inclusivo de las actividades, es decir, que tanto la propia actividad como los materiales didácti-

cos empleados en ella sean aptos para cualquier persona independientemente de sus capacidades, y que solo necesiten de una pequeña adaptación del nivel de las explicaciones (Fesharaki *et al.*, 2016). Además, las actividades multisensoriales o que se realizan con las posibilidades que proporciona el propio campo (el aula natural para geólogos y paleontólogos) mejoran el proceso de aprendizaje de aquellas personas con discapacidad cognitiva que presentan dificultades en la adquisición de conceptos (ver ejemplos en De la Ossa *et al.*, 2012). No menos importante es intentar que las actividades propuestas tengan un significativo carácter interdisciplinar, más aún cuando se trate de aspectos relativos a la Paleontología, que presenta nexos muy claros entre la Biología y la Geología (Fesharaki *et al.*, 2019).

Finalmente, aprovechando el potencial probado de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs), un método que podría favorecer un aumento del interés del alumnado por los contenidos geológicos y paleontológicos sería que ellos mismos pusieran en práctica distintas técnicas de divulgación (previamente propuestas por el docente) a través de nuevas estrategias y vehículos, como puede ser Internet (Blogs, redes sociales, Youtube, etc.). Es bien sabido que las redes sociales representan actualmente el medio de información y comunicación más utilizado en el mundo. Haciendo uso de ellas, los alumnos de una clase podrían informar, por ejemplo, de la geología que existe en los alrededores del centro educativo o de la localidad en la que se encuentra, de si existe algún geositio, geoparque o lugar de interés geológico cercano, o si hay algún yacimiento paleontológico o, incluso, si existe algún tipo de peligro que amenace dicha geología o los yacimientos que puedan existir. Este tipo de actividades, además, podrían aumentar su sentimiento de identidad regional, dando importancia al patrimonio natural que les rodea, conservándolo y divulgándolo por medio de las redes sociales. La efectividad de actividades fuera del aula o con métodos y materiales diferentes a los usados de forma habitual por el docente ya ha sido probada por múltiples estudios (Moral Pérez, 1999; Melgar y Donolo, 2011). El objetivo final no solo sería el aprendizaje de conceptos relacionados con estos campos de la ciencia sino que aún más importante sería aumentar su interés, su participación y, en definitiva, su grado de concienciación y de respeto sobre el patrimonio paleontológico y el medio natural en general.

## Conclusiones

En este trabajo se ha analizado la presencia de términos relacionados con el patrimonio paleontológico como parte del geológico, y éste del natural, en la legislación sobre educación a nivel estatal promulgada desde 1970. Los resultados indican que, de forma general, la presencia de aspectos relacionados con cualquier tipo de patrimonio es muy escaso en las leyes anteriores a la LOE. Sin embargo, a pesar del aumento de menciones en los currículos educativos y de la importancia real que se está dando en España al patrimonio cultural (incluyendo el artístico y el histórico) no ocurre lo mismo con el patrimonio natural (que incluye el geológico y el paleontológico).

La presencia, cada vez mayor, de los conceptos de sostenibilidad ambiental, educación inclusiva o la protección de los diferentes tipos de patrimonio, en revistas científicas, congresos, trabajos académicos o como objetivos de proyectos de investigación o innovación educativa, parecería indicar un desarrollo amplio de estas temáticas en los currículos educativos. Sin embargo, los currículos propuestos para la educación secundaria en las últimas leyes de educación (LOE y LOMCE) en España presentan un desarrollo muy dispar y sesgado de éstos. Del presente análisis se puede destacar que los principales tipos de patrimonio recogidos en estas leyes son los referidos al patrimonio histórico, cultural y artístico, mientras que son muy escasas las referencias al patrimonio natural, y prácticamente inexistentes las referencias al patrimonio geológico o paleontológico.

Como punto final queremos hacer una llamada a la importancia de la formación educativa de calidad en la temática del patrimonio natural, concretamente del patrimonio geológico y paleontológico, que debe estar convenientemente legislada, para poder introducir al alumnado en estos aspectos patrimoniales tan ligados con temas que muestran mucho interés en la sociedad (Agenda 2030 y movimientos conservacionistas de la naturaleza en relación con el Cambio Climático). Para poder formar bien a los ciudadanos necesitamos una base legal sobre las temáticas patrimoniales en la que los profesionales sepan claramente hacer su trabajo, tanto los ejecutores (paleontólogos trabajando en yacimientos) como los formadores (profesorado y científicos). En este punto, y aunque la legislación patrimonial actual siga conteniendo ambigüedades en lo referente a los objetivos y valores que acoge el patrimonio paleontológico, se puede concluir que al menos contempla las definiciones básicas. Sin embargo, no se puede concluir lo mismo en relación con la legislación educativa, ya que ni siquiera recoge esta terminología básica. Así pues, resulta esencial comenzar a concienciar a todas las partes implicadas sobre la necesidad de trabajar en una formación académica de calidad en lo que al patrimonio natural se refiere.

## Agradecimientos

Los autores queremos agradecer las sugerencias y comentarios de las doctoras Juana Vegas y Eloisa Bernáldez, así como de la editora Nieves López-González, que han permitido mejorar sustancialmente la versión preliminar del presente artículo.

## Referencias

- Alba-Pastor, C., 2019. Diseño universal para el aprendizaje: un modelo teórico-práctico para una educación inclusiva de calidad. *Participación Educativa*, 9: 55-66.
- Alcalá, L., 1999. Reflexiones acerca de la protección del patrimonio paleontológico. *Coloquios de Paleontología*, 50: 45-51.
- Alcalá, L., González, A., Luque, L., 2010. Los talleres paleontológicos como recurso didáctico interactivo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18(1): 119-124.
- Bazán, C.A. y Vides, M.E., 1995. Evaluación de preconceptos de Geología en alumnos ingresantes en la universidad. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 3(3): 164-168.

- Bernáldez Sánchez, E., 1998. Encontré un fósil y no supe qué hacer con él. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 24: 64-67.
- Borrego, M.J., García, R., Guede, B., Menéndez, E., Pacheco, F., 1996. La utilización de la historia de la ciencia para trabajar problemas relacionados con los fósiles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 4(1): 46-52.
- Calonge García, A., 2010. La geología que emociona: ¿qué geología enseñamos, qué geología necesitamos y qué geología divulgamos? *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18(2): 141-149.
- Candrea, A., Susacasa, S., 2003. El valor del Patrimonio en el currículo de la formación docente. En: *El patrimonio y la Didáctica de las Ciencias Sociales* (E. Ballesteros, C. Fernández, J. A. Molina y P. Moreno, Coords). Asociación Universitaria de Profesores de Didáctica de las Ciencias Sociales-Universidad de Castilla La Mancha, 41-50.
- Carcavilla, L., 2009. Perspectivas en el estudio del patrimonio geológico en España. En: *Actas de las II Jornadas de Investigadores en Formación de Ciencias de la Tierra* (Herrero-Barrero, T., Jiménez Madrid, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Chamizo-Borreguero, M., Álvarez-Areces, E., Eds). IGME, Madrid, p. 8.
- Carcavilla, L., López Martínez, J., Durán, J.J., 2007. Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Instituto Geológico y Minero de España. *Serie Cuadernos del Museo Geominero*, 7: 360p.
- Cárdaba, J.A., Presumido, M., Fesharaki, O., Martín-Perea, D.M. y Prieto, I., 2018. Dissemination of the paleontological heritage through the use of new technologies: the example of the Somosaguas site (Madrid, Spain). En: *INTED2018 Proceedings* (L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres, Eds). Valencia, 488-496.
- Castilla, G., de la Iglesia, A., 2008. ¿Qué saben de Paleontología los estudiantes universitarios? *Paleontológica Nova*, 8: 165-173.
- Castilla, G., Fesharaki, O., Hernández-Fernández, M., Montesinos, R., Cuevas, J., López, N., 2006. Experiencias educativas en el yacimiento paleontológico de Somosaguas (Pozuelo de Alarcón, Madrid). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 14(3): 265-270.
- Colomer, M., Durán, H., Gold, G., 1993. Conocimientos de Geología en los estudiantes de magisterio de la especialidad de Educación Primaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 3(1): 175-179.
- Cuenca, J.M., 2003. Análisis de concepciones sobre la enseñanza del patrimonio en la educación obligatoria. *Enseñanza de las Ciencias Sociales*, 2: 37-45.
- De la Ossa, L., Tejedor-Navarro, N., Fesharaki, O., 2012. Experiencias durante la construcción de un diorama del Mioceno de Somosaguas por parte de alumnos con necesidades educativas especiales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20: 290-296.
- Delvene, G., Vegas, J., Jiménez, R., Rábano, I., Menéndez, S., 2018. From the field to the museum: analysis of groups-purposes-locations in relation to Spain's moveable palaeontological heritage. *Geoheritage*, 10: 451-462.
- Díaz-Martínez, E., Vegas, J., Carcavilla, L., García-Cortés, A., 2016. Base conceptual, estado de la cuestión y perspectivas de la gestión y conservación del patrimonio paleontológico. *Cuadernos del Museo Geominero*, 20: 159-163.
- Díaz-Martínez, E., Díez-Herrero, A., 2011. Los elementos biológicos y culturales de interés geológico: un patrimonio a conservar. En: *Avances y retos en la conservación del Patrimonio Geológico en España*. Sociedad Geológica de España (Fernández-Martínez, E., Castaño de Luis, R., Eds.). Universidad de León, 85-90.
- Díez-Herrero, A., Vegas, J., 2011. De roca a roca: Descubre el patrimonio geológico de la ciudad de Segovia. Ayuntamiento de Segovia, Concejalía de Turismo, 95 pp.
- Digne, 1991. Declaration of the Rights of the Memory of the Earth. En: *I International Symposium. Declaration of the Rights of the Memory of the Earth*. Digne-les-Bains, France [http://www.progeo.ngo/downloads/DIGNE\\_DECLARATION.pdf](http://www.progeo.ngo/downloads/DIGNE_DECLARATION.pdf) [Consultado 29/07/2020]
- Enniouar, A., Lagnaoui, A., Habib, A., 2014. A middle Jurassic Sauropod tracksite in the Argana Basin, Western High Atlas, Morocco: an example of palaeoichnological heritage for sustainable geotourism. *Proceedings of the Geologists Association*, 125:114-119.
- Falk, J.H., Storksdieck, M., Dierking, L.D., 2007. Investigating public interest and understanding: evidence for the importance of free-choice learning. *Public Understanding of Science*, 16: 455-469.
- Fermeli, G., Meléndez Hevia, G., Koutsouveli, A., Dermitzakis, M., Calonge, A., Steininger, F., D'Arpa, C., Di Patti, C., 2015. Geoscience teaching and student interest in secondary schools-preliminary results from an interest research in Greece, Spain and Italy. *Geoheritage*, 7: 13-24.
- Fernández-Martínez, E., 2018. Fósiles y yacimientos paleontológicos: un patrimonio en la encrucijada. *Revista PH*, 94: 270-272.
- Fernández-Martínez, E.M., Suárez-Andrés, J.L., 1998. Pon un fósil en tu vida ¡y sácale partido! (propuesta de recurso para el aprovechamiento didáctico de los fósiles). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 6(2): 138-144.
- Fesharaki O., 2016. Análisis paleoambiental y paleoclimático de los yacimientos de Somosaguas y Húmera (Mioceno Medio, Madrid): sedimentología, petrología, mineralogía y aplicación a divulgación e innovación educativa. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 366 p.
- Fesharaki, O., García-Frank, A., Iglesias Álvarez, N., Gómez-Heras, M., Martín-Perea, D., Rico, R., 2016. Diseño Universal y materiales multisensoriales en las actividades de divulgación de Geodivulgar con la Asociación Ciencia sin Barreras. *Geo-Temas*, 16(1): 729-732.
- Fesharaki, O., Taboada-Trujols, I., Sánchez-Pastor, N., 2019. Biominerales del cuerpo humano, propuesta interdisciplinar para la biología y geología de bachillerato. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32(1): 63-76.
- Fesharaki, O., Torices, A., García Yelo, B.A., Tejedor-Navarro, N., De la Ossa, L., Hernández Fernández, M., 2012. The Somosaguas Palaeontology Project: Anenvision of Nieves López Martínez for linking science and society. *Spanish Journal of Paleontology*, 27: 83-92.
- García-Cortés, A., Vegas, J., Carcavilla L., Díaz-Martínez E., 2019. Bases conceptuales y metodología del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 978-84-9138-092-4. 106 pp.
- García-Frank, A., Gómez-Heras, M., Fesharaki, O., Iglesias Álvarez, N., Gonzalo-Parra, L., 2016. Science without Barriers: towards the take-off of Social Palaeontology. *Palaeontological Association Newsletter*, 91: 50-55.
- García-Frank, A., Gómez-Heras, M., Gonzalo Parra, L., Canales Fernández, M.L., Muñoz García, M.B., González-Acebrón, L., García Hernández, R., Hontecillas, D., Iglesias Álvarez, N., Salazar Ramírez, R.W., Fesharaki, O., Navalpotro, T., Reviejo, M., Rodrigo Sanz, A., del Moral, B., Sarmiento, G.N., Ureta, S., 2014. Ready-to serve Geology! Portable kits for scientific divulgation to people with functional diversity. En: *ICERI 2014*

- Proceedings* (L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres, Eds). IATED Academy, Sevilla (España), 4666-4672.
- García Pimienta, J.C., 2018. Reflexión sobre la consideración del patrimonio paleontológico. *Revista PH*, 94: 265-266.
- González, E., Pino, M., Recabarren, O., Canales, P., Salvadores, L., Chávez, M., Bustos, C., Ramos, P., Busquets, T., Vásquez, F., Navarro, X., 2011. Paleontología Social: una experiencia educativa sobre ciencia, patrimonio e identidad. *Calidad en la Educación*, 34: 231-245.
- Hellqvist, M., 2019. Teaching sustainability in Geoscience field education at Falun Mine World Heritage site in Sweden. *Geoheritage*, 11: 1785-1798.
- Henriques, M.H., Canales, M.L., García-Frank, A., Gómez-Heras, M., 2019. Accessible Geoparks in Iberia: a challenge to promote geotourism and education for sustainable development. *Geoheritage*, 11: 471-484.
- Henriques, M.H., Pena dos Reis, R., 2015. Framing the palaeontological heritage within the geological heritage: An integrative vision. *Geoheritage*, 7: 249-259.
- Iglesias Álvarez, N., Fesharaki, O., García-Frank, A., González Acebrón, L., Rico, R., Salazar Ramírez, R.W., Sacristán, S., Martín Perea, D., Hontecillas, D., García Hernández, R., Gómez-Heras, M., Sarmiento, G.N., Muñoz García, M.B., Ureta Gil, M.S., Canales Fernández, M.L., del Moral, B., 2015. Dejando huella: divulgación paleontológica para personas con diversidad funcional. En: *Current Trends in Paleontology and Evolution. XIII Encuentro de Jóvenes Investigadores en Paleontología* (L. Domingo et al., Eds). Cercedilla, Madrid, 154-162.
- Iglesias Álvarez, N., García-Frank, A., Fesharaki, O., 2017. Ideas y reflexiones para una divulgación científica efectiva. *BRSEHN Sección Aula, Museos y Colecciones*, 4: 29-41.
- Langiano, M.C., Merlo, J.F., Ormazabal, P., Madrid, P., 2015. Arqueología, Paleontología y Educación. *Revista del Museo de Antropología*, 8(2): 227-238.
- Lillo Beviá, J., 1996. Ideas de los alumnos y obstáculos epistemológicos en la construcción de los conceptos fósil y fosilización. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 3(3): 149-153.
- Martín Perea, D., Fesharaki, O., Domingo, M.S., Gamboa, S., Hernández Fernández, M., 2019. *Messor barbarus* ants as soil bioturbators: implications for granulometry, mineralogical composition and fossil remains extraction in Somosaguas site (Madrid basin, Spain). *Catena*, 172: 664-677.
- Meléndez, G., Molina, A., 2001. El patrimonio paleontológico en España: una aproximación somera. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 9(2): 160-172.
- Meléndez, G., Soria, M., 1994. The legal framework and scientific procedure for the protection of palaeontological sites in Spain: Recovery of some special sites affected by human activity in Aragón (Eastern Spain). En: *Geological and Landscape conservation* (O'Halloran et al., Eds). Geological Society, London, 329-334.
- Meléndez, G., Soria, M., 1997. Problemática actual de la legislación sobre patrimonio paleontológico en España. Medidas y soluciones. *Zubia*, 15: 113-120.
- Melgar, M.F., Donolo, D.S., 2011. Salir del aula... Aprender de otros contextos: patrimonio natural, museos e Internet. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 8(3): 323-333.
- Monteagudo, J., Oliveros, C., 2016. La didáctica del Patrimonio en las aulas. Un análisis de las prácticas docentes. *Revista UNES. Universidad, Escuela y Sociedad*, 1: 64-79.
- Moral Pérez, M.E., 1999. Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Creatividad y Educación. *Educar*, 25: 33-52.
- Morales, J., 1996. El patrimonio paleontológico. Bases para su definición, estado actual y perspectivas futuras. En: *El Patrimonio Geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización* (Cendrero, A., Ed). Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, 39-51.
- Morales, J., 1999. La interpretación del patrimonio natural y cultural: todo un camino por recorrer. *Revista PH*, 25: 150-157.
- Morales, J., Gómez, E., Azanza, B., 2002. El patrimonio paleontológico español: marco legal, titularidad, gestión y conservación. En: *I Jornadas sobre el patrimonio de la provincia de Teruel* (Meléndez, G., Peñalver, E., Coords). Instituto de Estudios Turolenses, Diputación de Teruel, 53-62.
- ONU, 2015. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>. Último acceso: 7 de agosto de 2020.
- Orion, N., 1989. Development of a high-school geology course based on field trips. *Journal of Geosciences Education*, 37: 13-17.
- Orion, N., Fortner, R.W., 2003. Mediterranean models for integrating environmental education and earth science through Earth System Education. *Mediterranean Journal of Educational Studies*, 8: 97-111.
- Orion, N., Hofstein, A., 1994. Factors that influence learning during a scientific field trip in a natural environment. *Journal of Research in Science Teaching*, 31: 1097-1119.
- Pascual Trillo, J.A., 1998. Por unas ciencias ambientales y unas ciencias de la Tierra: reflexiones críticas y propuestas para un debate. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(2): 341-351.
- Pascual Trillo, J.A., 2017. Necesitamos la Geología también en Bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25(3): 274-284.
- Pedrinaci, E., Berjillos, P., 1994. El concepto de tiempo geológico: orientaciones para su tratamiento en la educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2(1): 240-251.
- Pedrinaci, E., Alcalde, S., Alfaro, P., Almodóvar, G.R., Barrera, J.L., Belmonte, Á., Brusi, D., Calonge, A., Cardona, V., Crespo-Blanc, A., Feixas, J.C., Fernández-Martínez, E.M., González-Díez, A., Jiménez-Millán, J., Quintanilla, L., Rábano, I., Rebollo, L., Rodrigo, A., Roquero, E., 2013. Alfabetización en Ciencias de la Tierra. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 21(2): 117-129.
- Rodríguez Pérez, E., Romero-Nieto, D., Fesharaki, O., 2014. La imagen del geólogo en el cine: científicos locos vs. atractivos aventureros. *Tierra & Tecnología*, 45: 51-60.
- Romero-Nieto, D., Fesharaki, O., García Yelo, B.A., 2014. Películas de trasfondo paleontológico: análisis científico y propuestas didácticas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 22(2): 167-176.
- Salas-Herrera, J., Rodríguez-Castro, I., Cervilla-Muros, M.A., Vitón, I., Acedo, A., García-Frank, A., Fesharaki, O., 2019. Aplicaciones de las Escape Rooms en la difusión de la paleontología: consideraciones iniciales. *Zubia*, 31: 139-144.
- Sandell, K., Öhman, J., 2013. An educational tool for outdoor education and environmental concern. *Journal of Adventure Education and Outdoor Learning*, 13: 36-55.
- Sanz, J., Zamalloa, T., Echevarría, I., Maguregi, G., Fernández, D., 2012. Geodiversidad y patrimonio geológico en la educación: análisis diagnóstico para su integración efectiva en la educación secundaria del País Vasco. En: *Comunicaciones del XVII Simposio sobre Enseñanza de la Geología* (Aguasanta, M.S., Cantano, M., Almodóvar, G.R., Eds). Universidad de Huelva, 237-242.
- Sanz-Pérez, D., Cambroner, I., García-Cobeña, J., Peco, V.G., Nebreda, S.M., Ozkaya de Juanas, S., Fesharaki, O., García-Frank, A., 2020. "Evolutionary": divulgación y enseñanza de la paleontología mediante la gamificación. *Enseñanza de las*

- Ciencias de la Tierra*, 28(1): 125-136.
- Stokes, A., Boyle, A.P., 2009. The undergraduate geoscience fieldwork experience: influencing factors and implications for learning. *The Geological Society of America, Special Paper*, 461: 291-311.
- Torices, A., Bolea, B., Cuevas, J., 2004. Paleontología Social. En: *Libro de Resúmenes del II Encuentro de Jóvenes Investigadores en Paleontología*. Macastre (Valencia), 46-47.
- Trend, R., 2007. Individual, situational and topic interest in geosciences among 11- and 12-year-old children. *Research Papers in Education*, 20(3): 271-302.
- UNESCO, 1972. *Convención sobre la protección del Patrimonio Mundial, cultural y natural*, aprobada en la 17 Conferencia General, París, 16 de noviembre de 1972, WHC-2001/WS/2 <http://whc.unesco.org/en/conventiontext>
- UNESCO, 2004. *La UNESCO y el patrimonio Mundial*. Recuperado de: <http://www.unescoetxea.org/dokumentuak/UNESCOPatrimonio.pdf>.
- UNESCO, 2008. Declaración presentada en el Acto Mundial de Inauguración del Año Internacional del Planeta Tierra (AIPT). París, 12-13 febrero. <http://www.yearofpla-netearth.org/>. Último acceso: 15 de julio de 2020
- UNESCO, 2015. Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Septiembre 2015. Recuperado de: <http://www.unesco.org/new/es/santiago/education-2030/>. Último acceso: 7 de agosto de 2020
- Vegas, J., Delvene, G., Menéndez, S., Rábano, I., García-Cortés, A., Díaz-Martínez, E., Jiménez, R., 2018. El patrimonio paleontológico en España: una necesidad de consenso sobre su gestión y marco legal. *Revista PH*, 94: 326-329.
- Vegas, J., Delvene, G., Menéndez, S., Cabrera, A., García-Cortés, A., Díaz-Martínez, E., Carcavilla L., Rábano I., 2019. Metodología y estado actual del patrimonio paleontológico en el Inventario Español de Lugares de Interés Geológico. *Spanish Journal of Palaeontology*, 34(1): 79-96.
- Vilaseca, A., Bach, J., 1999. La evaluación de actitudes en el Trabajo de Campo en relación a la conservación de los Yacimientos Paleontológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 7(1): 47-54.
- Referencias a la legislación**
- Se incluyen todas las leyes mencionadas y el marco normativo analizado en este trabajo.
- Ley de 7 de diciembre de 1916, de Parques Nacionales de España. «Gaceta de Madrid» núm. 343, de 8 de diciembre de 1916, página 575. <https://www.boe.es/datos/pdfs/BOE//1916/343/A00575-00575.pdf>
- Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. BOE 155.
- Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. BOE 299.
- Ley 33/2015, de 21 de septiembre del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. BOE 227.
- Ley 14/1970, de 4 de agosto, General de Educación y Financiamiento de la Reforma Educativa. (LGE)  
Publicado en: «BOE» núm. 187, de 6 de agosto de 1970  
Con las siguientes leyes complementarias y modificaciones:  
\* Orden de 22 de marzo de 1975 por la que se desarrolla el Decreto 160/1973, de 23 de enero, que aprueba el Plan de Estudios del Bachillerato, y se regula, el Curso de Orientación Universitaria.  
Publicado en: «BOE» núm. 93, de 18 de abril de 1975
- \* Resolución de las Direcciones Generales de Enseñanzas Medias y de Universidades por la que se establecen los contenidos y orientaciones metodológicas del Curso de Orientación Universitaria y se dictan instrucciones sobre el mismo.  
Publicado en: «BOE» núm. 65, de 17 de marzo de 1978
- Ley Orgánica 1/1990, de 3 de octubre, de Ordenación General del Sistema Educativo (LOGSE).  
Publicado en: «BOE» núm. 238, de 4 de octubre de 1990  
Con las siguientes leyes complementarias y modificaciones:  
\* Real Decreto 1345/1991, de 6 de septiembre, por el que se establece el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria.  
Publicado en: «BOE» núm. 220, de 13 de septiembre de 1991  
\* Real Decreto 1179/1992, de 2 de octubre, por el que se establece el currículo del Bachillerato.  
Publicado en: «BOE» núm. 253, de 21 de octubre de 1992
- Ley Orgánica 10/2002, de 23 de diciembre, de Calidad de la Educación (LOCE).  
Publicado en: «BOE» núm. 307, de 24 de diciembre de 2002  
Con las siguientes leyes complementarias y modificaciones:  
\* Real Decreto 116/2004, de 23 de enero, por el que se desarrolla la ordenación y se establece el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria.  
Publicado en: «BOE» núm. 35, de 10 febrero 2004  
\* Real Decreto 117/2004, de 23 de enero, por el que se desarrolla la ordenación y se establece el currículo del Bachillerato.  
Publicado en: «BOE» núm. 42, de 18 febrero 2004
- Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación (LOE).  
Publicado en: «BOE» núm. 106, de 4 de mayo de 2006  
Con las siguientes leyes complementarias:  
\* Real Decreto 1631/2006, de 29 de diciembre, por el que se establecen las enseñanzas mínimas correspondientes a la Educación Secundaria Obligatoria.  
Publicado en: «BOE» núm. 5, de 5 de enero de 2007  
\* Real Decreto 1467/2007, de 2 de noviembre, por el que se establece la estructura del bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas.  
Publicado en: «BOE» núm. 266, de 6 de noviembre de 2007
- Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa (LOMCE).  
Publicado en: «BOE» núm. 295, de 10 de diciembre de 2013  
Con las siguientes leyes complementarias:  
\* Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato.  
Publicado en: «BOE» núm. 3, de 3 de enero de 2015  
\* Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato.  
Publicado en: «BOE» núm. 3, de 03 de enero de 2015
- Proyecto de Ley Orgánica de Modificación de la Ley Orgánica de Educación (LOMLOE), aprobado en el Consejo de Ministros del 15 de febrero de 2019 y publicado por el Boletín Oficial de las Cortes el 22 de febrero de 2019 y, en la actual legislatura, el 13 de marzo de 2020. Consultado el 2 de agosto de 2020 en: <https://www.educacionyfp.gob.es/dam/jcr:8c7d3863-aaa7-4bbd-91b2-4d05bcb80286/apl-lomloe-web2020-03-03.pdf>
- MANUSCRITO RECIBIDO EL: 07-09-2020  
RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 24-10-2020  
ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 25-10-2020





## COMENTARIO AL ARTÍCULO “EL COMPLEJO OLISTOSTRÓMICO DEL MIOCENO DE LA CUENCA DEL RÍO GUADALQUIVIR (SO DE ESPAÑA)” de Martínez del Olmo, W. (2019): *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2): 3-16

Fernando Pérez-Valera<sup>1</sup>, Mario Sánchez-Gómez<sup>2</sup> y Alberto Pérez-López<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante. San Vicente del Raspeig, s/n, Alicante, fperez@ua.es*

<sup>2</sup>*Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas s/n, Jaén. msgomez@ujaen.es*

<sup>3</sup>*Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Avda Fuentenueva s/n. Granada. aperezl@ugr.es*

<sup>4</sup>*Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, Armilla*

Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-López, A., 2020. Comentario al artículo “El complejo olistostrómico del Mioceno de la Cuenca del Río Guadalquivir (SO de España)” de Martínez del Olmo, W. (2019): *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2): 3-16. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33 (2): 63-68.

Martínez del Olmo (2019) realiza en este artículo una revisión sobre la estructuración y evolución sedimentaria de la Cuenca del Guadalquivir durante el Mioceno superior, partiendo de una exhaustiva recopilación bibliográfica y, sobre todo, del análisis e interpretación de los diversos y dispares datos sísmicos disponibles de las campañas de exploración de hidrocarburos, los cuales presentan una distribución muy desigual, con procesados y calidades muy diferentes. A pesar de que existe unanimidad en considerar la Cuenca del Guadalquivir como la cuenca de antepaís de la Cordillera Bética, ésta sigue siendo un lugar de controversias geológicas, con hipótesis muy dispares sobre su formación y evolución geológica (e. g., Perconig, 1960-62; Roldán, 1995; Flinch *et al.*, 1996; Berástegui *et al.*, 1998; Rodríguez-Fernández *et al.*, 2013; Pérez-Valera *et al.*, 2017; Flinch y Soto, 2017; Martínez del Olmo, 2018, 2019; Pedrera *et al.*, 2020). Es por esta razón por lo que un trabajo de este tipo es encomiable, al intentar poner orden de una forma comprensible sobre una heterogénea colección de fuentes de información.

El trabajo de Martínez del Olmo (2019) presenta como objetivo formal, de manera principal, la descripción geológica de la Cuenca del Guadalquivir en el sentido más amplio, y para ello asume sin discusión la hipótesis generalmente admitida del emplazamiento sedimentario de grandes deslizamientos gravitacionales de materiales de

procedencia subbética en el margen sur de la Cuenca del Guadalquivir (Unidad Olistostrómica o simplemente “olistostroma”). Como aportación novedosa, define la existencia de tres fases de formación del “olistostroma” durante el Mioceno superior, deducidas de la información sísmica. La existencia de olistostromas en el Guadalquivir es un lugar común basado en la solución cartográfica dada a amplios sectores de la cuenca, donde la complejidad intrínseca de los materiales (abundancia de brechas, evaporitas y materiales arcillosos junto con bloques dispersos de carbonatos) y las malas condiciones de afloramiento, pueden inducir a una simplificación de las relaciones geométricas de las unidades geológicas y, por tanto, del resultado cartográfico. Además, la idea del “olistostroma” se ha seguido sin criticismo en la interpretación de las líneas sísmicas, apoyadas o no por sondeos que, en cualquier caso, y como afirma el propio Martínez del Olmo (2019), proporcionan datos poco precisos para definir su naturaleza. A pesar de ello, Martínez del Olmo (2019) describe con mucho detalle la estratigrafía y estructura del relleno de toda la Cuenca del Guadalquivir, y centra la discusión del trabajo principalmente en la incertidumbre existente en los procesos relacionados con el emplazamiento del “olistostroma”. De hecho, admite que “persisten dudas razonables sobre las causas que produjeron los deslizamientos olistostrómicos, su zona de origen, la velocidad de traslación y la corre-

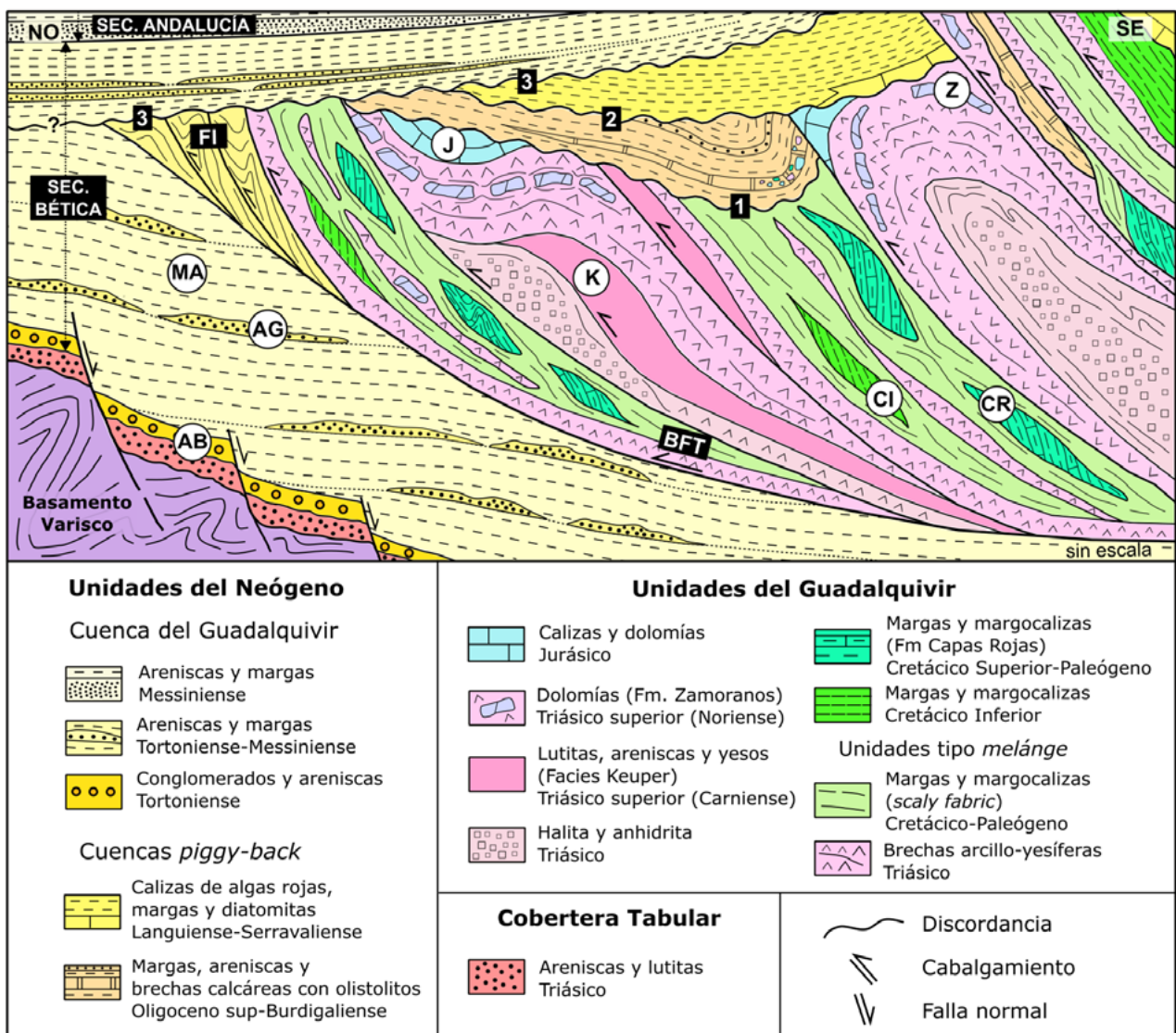


lación con sus afloramientos meridionales” y concluye el artículo indicando que sería necesaria “una revisión geológica de los afloramientos” que “podría ayudar a resolver muchas de las dudas planteadas” en su trabajo.

Tras estas afirmaciones es sorprendente que en la revisión bibliográfica del artículo objeto de este comentario, no se haya mencionado ni discutido la publicación de un exhaustivo trabajo de campo en una amplia zona de la Cuenca del Guadalquivir (sector 4: Alto Guadalquivir de Martínez del Olmo, 2019), donde precisamente se correlacionan las observaciones geológicas de los afloramientos con la información de las líneas sísmicas (Pérez-Valera *et al.*, 2017). En este trabajo se aportan datos estratigráficos, estructurales y geofísicos de este sector del Alto Guadalquivir, que son coherentes con la existencia de un prisma de acreción de carácter transpresivo y una fuerte compo-

nente transcurrente, que denominan Complejo Acrecional del Guadalquivir. En dicha publicación también se discute ampliamente la existencia de depósitos gravitacionales de tipo olistostrómico, que no serían compatibles con el nuevo marco estratigráfico y estructural propuesto. Este enfoque alternativo a la hipótesis olistostrómica, permite dar explicación a muchos de los problemas que Martínez del Olmo (2019) plantea razonablemente en su trabajo, a la vez que explora una vía alternativa que puede mejorar el conocimiento sobre este sector clave en el orógeno Bético-Rifeño.

En el margen sur de la Cuenca del Guadalquivir, coincidiendo con el dominio donde se localiza el “olistostroma en afloramiento” (Martínez del Olmo, 2019), se encuentran unas unidades geológicas con edades comprendidas entre el Triásico y el Paleógeno, con una estratigrafía afín a las



**Fig. 1.-** Modelo conceptual de relaciones entre las Unidades del Guadalquivir y las unidades del relleno autóctono de la Cuenca del Guadalquivir, basado en datos de campo, perfiles de sísmica de reflexión y sondeos. Sin escala. Modificado de Pérez-Valera *et al.*, (2017). Estratigrafía y nomenclatura de las unidades autóctonas de la cuenca del Guadalquivir según Riaza y Martínez del Olmo (1996), representadas por la Secuencia Bética completa y la parte inferior de la Secuencia Andaluza. BFT: *Betic Floor Thrust*, FI: *Frontal Imbricates*, K: Grupo Keuper de Jaén, Z: Fm Zamoranos, J: Jurásico, CI: Cretácico Inferior, CR: Fm Capas Rojas, AB: Arenas de Base, AG: Arenas del Guadalquivir, MA: Margas Azules. 1, 2 y 3: discontinuidades.

unidades subbéticas y denominadas de muy diversas formas: Manto de Carmona, (Perconig, 1960-62); Complejo Subbético Frontal (Baena, 1973); Unidades del Guadalquivir (García-Rossell, 1972); Manto de Antequera-Osuna (Cruz-Sanjulián, 1974); Complejo Tectosedimentario del Guadalquivir (Bourgeois, 1978); Unidad Olistostromática (Roldán y García-Cortés, 1988; Roldán, 1995; Rodríguez-Fernández *et al.*, 2013); Complejo Olistostromático Subbético (Pérez-López y Sanz de Galdeano, 1994); Complejo Olistostromático del Guadalquivir (Vera y Martín-Algarra, 2004); Olistostroma (Martínez del Olmo y Martín, 2016; Martínez del Olmo, 2019). El alto grado de deformación y heterogeneidad que muestran y la presencia de cuerpos brechoides, tanto evaporíticos como arcillosos, hace difícil, en ocasiones, su diferenciación individual a escala de afloramiento, por lo que Pérez-Valera *et al.*, (2017) prefieren denominarlas genéricamente como Unidades del Guadalquivir, siguiendo la nomenclatura de García-Rossell (1972), que excluye cualquier adjetivo de connotación genética. Junto con las Unidades del Guadalquivir, dos secuencias neógenas de cuencas *piggy-back* (Oligoceno sup.-Burdigaliense y Langhiense?-Serravaliense) desarrolladas sobre las Unidades del Guadalquivir y diferenciables cartográficamente, se encuentran implicadas en la estructuración de este sector (Pérez-Valera *et al.*, 2013, 2017) (Fig. 1). Las Unidades del Guadalquivir, aunque afloran mal en amplios sectores, pueden examinarse con detalle en los numerosos barrancos y cárcavas que se están produciendo en la cuenca (Fernández *et al.*, 2020), mostrando una absoluta ausencia de facies y características propias de elementos resedimentados en una cuenca profunda, como por ejemplo: depósitos clásticos organizados o caóticos sobre sedimentos autóctonos de cuenca, avalanchas y caídas de bloques, *slumps*, brechas intraformacionales, deslizamientos coherentes o incoherentes, etc., (e. g., Hoedemaker, 1973, Festa *et al.*, 2015), sí visibles en las secuencias de cuencas *piggy-back*, particularmente en la inferior (Oligoceno sup.-Burdigaliense) (Fig. 1). Por el contrario, en las Unidades del Guadalquivir, el rasgo más notable es la presencia de grandes bloques y sucesiones de unidades mesozoicas y cenozoicas de afinidad subbética reconocibles (Fig. 1) que se encuentran junto con unidades altamente deformadas en zonas de cizalla dúctil-frágiles (de tipo *mélange* en el sentido descriptivo del término, Festa *et al.*, 2012) que muestran un catálogo completo de estructuras de deformación a escala mesoscópica (Fig. 1). Estas unidades de tipo *mélange* varían entre brechas cataclásticas generadas sobre litologías frágiles (margas y margocalizas del Cretácico Superior-Paleógeno) y tectonitas-S y -L sobre evaporitas dúctiles pertenecientes al Triásico, incluyendo términos intermedios como cataclasitas foliadas. Los indicadores cinemáticos son muy frecuentes y patentes en los materiales yesíferos del Triásico (pliegues en vaina, lineación de estiramiento, fibras de yeso en planos, fábricas plano-lineares) los cuales desarrollan una foliación cuyo origen tectónico es evidenciado por el boudinage de niveles competentes (carbonatos o areniscas) a micro y mesoescala, que además presentan sombras de presión con crecimiento de fibras de yeso. Estas mismas estructuras han sido descritas

en diversos sectores de la Cordillera Bética, desde diapiros (Rondeel y van der Gaag, 1986; De Ruig, 1996; Pérez-Valera, 2005); hasta zonas de falla de salto en dirección (De Smet, 1984; Sanz de Galdeano *et al.*, 2006; Pérez-Valera *et al.*, 2010, 2011) o cinturones de pliegues y cabalgamientos (Pedrera *et al.*, 2012; García *et al.*, 2016a).

A partir del estudio sistemático de las fábricas tectónicas, realizado en 53 estaciones de medición en una amplia región del Alto Guadalquivir (Pérez-Valera *et al.*, 2017), se ha deducido, para las Unidades del Guadalquivir, la existencia de dominios estructurales con presencia de estructuras arqueadas de cabalgamientos N-S a NNE-SSW, limitados por amplias zonas de transferencia dextras WNW-ESE, cuya cinemática es consistente con el movimiento de todo el conjunto hacia el WNW (290°) en un contexto transpresivo altamente oblicuo. La integración de estos datos de superficie con la información procedente de la sísmica permite interpretar que las Unidades del Guadalquivir, junto con las secuencias neógenas, forman un prisma acrecional en el frente de deformación de la Cordillera Bética con la Cuenca del Guadalquivir (Complejo Acrecional del Guadalquivir), con avance hacia el WNW sobre un cabalgamiento basal (*Betic Floor Thrust* de Guézou *et al.*, 1991), y cuyo emplazamiento final tiene lugar en el Tortoniense (Pérez-Valera *et al.*, 2017) (Fig. 1). En este contexto parece difícil integrar la existencia de un "olistostroma" como unidad sedimentaria que forme parte del relleno de la Cuenca del Guadalquivir, dentro de la Secuencia Bética (Martínez del Olmo, 2019).

Respecto al análisis e interpretación de los perfiles sísmicos presentados por Martínez del Olmo (2019), llama la atención que una mayoría de ellos indican que las superficies basales de los supuestos deslizamientos buzcan hacia el sureste, esto es, hacia la Cordillera Bética, de forma contraria a la que cabría suponer si fueran deslizamientos gravitacionales. En el resto de los perfiles, las propias hipérbolas del procesado impiden ver con claridad la superficie basal o bien ésta es subparalela a las unidades inferiores. Para explicar esta inclinación, Martínez del Olmo (2019) propone un basculamiento de las cizallas basales de los deslizamientos con posterioridad al proceso gravitacional, lo que podría conducir a la "confusión con cabalgamientos tardíos". También lo atribuye, directamente, a la existencia de cabalgamientos "post-olistostroma", aun cuando no llegaran a afectar a las unidades gravitacionales (cabalgamientos ciegos según Motis y Martínez del Olmo, 2012). Sin embargo, una solución viable, más sencilla y que concuerda con estas observaciones, sería considerar estos cuerpos buzantes hacia la cordillera, que son ciertamente anómalos en un contexto de deslizamientos gravitacionales, como pertenecientes a una unidad tectónica frontal que se desplaza sobre un cabalgamiento basal, formando un complejo acrecional de unidades subbéticas, como se interpreta en Flinch *et al.* (1996), Berástegui *et al.*, (1998) o Pérez-Valera *et al.* (2017). En este punto, la existencia de "un mínimo de tres episodios de deslizamiento gravitacional" que propone Martínez del Olmo (2019), que se interpreta a partir de líneas sísmicas de calidad heterogénea y sin control de sondeos, es difícilmente justificable, habida cuenta de los

propios problemas que el autor plantea, como por ejemplo: la existencia de “distintos patrones de apilamiento” sin explicación, las diferencias en la longitud o espesor alcanzado por cada fase de deslizamiento según los sectores, o la desaparición de esa diferenciación en el Alto Guadalquivir donde, según el autor, existiría “una última y más compleja masa olistostromática”. Además, autores como Berástegui *et al.* (1998) interpretan como imbricaciones tectónicas frontales las “interdigitaciones” entre los “episodios de deslizamiento” que describe Martínez del Olmo (2019) sobre el mismo perfil sísmico (S81-60).

Resumiendo, al considerar la existencia de un prisma de acreción en lugar de un depósito sedimentario de origen gravitacional, algunos puntos de la discusión que plantea Martínez del Olmo (2019) podrían tener respuesta, mientras que otros tendrían que reconsiderarse. En concreto, la “exacta definición de superficies basales” (punto 3), la existencia de “cizallas basales que cortan a las unidades olistostromáticas” (punto 6) o la “no deformación del Mioceno inmediato al frente de los deslizamientos” (punto 7) se explican fácilmente con la interpretación de un sistema acrecional tectónico, cuyo avance se produce a partir de un cabalgamiento basal del cual parten los demás cabalgamientos, en un sistema clásico de prisma acrecional (p. ej., Davis *et al.*, 1983; Gutscher *et al.*, 1998). En cuanto a la existencia de “cabalgamientos ciegos” en el Alto Guadalquivir (punto 8), hay que destacar que, sin descartar la posibilidad de que existan, la presencia de cabalgamientos en superficie es manifiesta y relativamente abundante en el sector, pudiendo ser, incluso, caracterizados mediante criterios cinemáticos (Pérez-Valera *et al.*, 2017; Sánchez-Gómez y Pérez-Valera, 2018). Por otro lado, la discusión acerca de la “datación de los sedimentos miocenos entre o bajo las masas olistostromáticas” (punto 1), el “acontecimiento desestabilizador del proceso olistostromático” (punto 2) o la “velocidad de traslación de los olistostromas” (punto 4), tendría que replantearse si se considera que no existen tales y que el proceso es esencialmente tectónico. Sobre estas últimas cuestiones, Pérez-Valera *et al.* (2017) ofrecen una interpretación sobre el Complejo Acrecional del Guadalquivir que daría respuesta al origen, mecanismo y edad del emplazamiento de las Unidades del Guadalquivir, acorde con los nuevos datos estratigráficos, tectónicos y geofísicos aportados.

Finalmente, aunque el estudio principal referido en este comentario se ha realizado en la comarca del Alto Guadalquivir (Pérez-Valera *et al.*, 2017), existen evidencias geológicas de que las Unidades del Guadalquivir mantienen características similares en afloramiento a lo largo de todo el curso del actual Guadalquivir (Pedrera *et al.*, 2012; García *et al.*, 2016b), aunque con una cinemática menos oblicua, sobre todo en la parte más frontal del Arco de Gibraltar. En relación con el dominio equivalente a las Unidades del Guadalquivir *offshore*, existe una amplia bibliografía donde se describe la existencia de un complejo de acreción tectónico en el Golfo de Cádiz junto con procesos de deslizamientos gravitacionales y “olistostromas” (*Giant Chaotic Body*, Torelli *et al.*, 1997; Gràcia *et al.*, 2003; *Horseshoe Gravitational Unit*, Iribarren *et al.*, 2007; “*Torto-*

*nian olistostrome*”, Gutscher *et al.*, 2009), desarrollados en su parte más occidental y lejana al frente de deformación (*Horseshoe Abyssal Plain*). Sin embargo, la mayoría de autores distinguen un prisma acrecional tectónico en el frente del Arco de Gibraltar, visible en las líneas sísmicas y denominado también de diferentes formas (*Guadalquivir Allochthon*: Flinch *et al.*, 1996; Daudet *et al.*, 2020; *Guadalquivir Allochthonous Unit*: Berástegui *et al.*, 1998; Gràcia *et al.*, 2003; *Allochthonous Unit of Gulf of Cádiz*, Medialdea *et al.*, 2004; *Gulf of Cádiz Accretionary Wedge*: Gutscher *et al.*, 2002; 2009; Iribarren *et al.*, 2007; *Gulf of Cádiz Imbricate Wedge*: Ramos *et al.*, 2017). En conclusión, parece razonable que el complejo de acreción presente en el Golfo de Cádiz sea el equivalente *offshore* del Complejo Acrecional del Guadalquivir descrito por Pérez-Valera *et al.* (2017), conectando con la parte aflorante de las Unidades del Guadalquivir.

Por tanto, y teniendo en cuenta todas las consideraciones descritas anteriormente, el trabajo escrito por Martínez del Olmo (2019), aun cuando supone un importante esfuerzo en sintetizar e interpretar gran cantidad de datos sísmicos y bibliográficos de la Cuenca del Guadalquivir, parte de una premisa (“hipótesis olistostromática”) que no es discutida ni contrastada, sino simplemente admitida, a pesar de que puede llegar a plantear más incógnitas que certezas para el propio autor. No obstante, el modelo expuesto por Martínez del Olmo (2019) aborda cuestiones clave para el conocimiento de la Cuenca del Guadalquivir, cuyas lagunas quedarían prácticamente resueltas si se admite la naturaleza esencialmente tectónica de las unidades que se distinguen en las líneas sísmicas, interpretadas como olistostromáticas. La lectura de su trabajo considerando la premisa de la existencia de un “complejo acrecional tectónico”, contribuiría a mejorar la comprensión de la arquitectura del relleno sedimentario y de la evolución tectónica de la Cuenca del Guadalquivir.

## Agradecimientos

La presente investigación está financiada por el proyecto PGC2018-100914-B-I00. Los autores agradecen los comentarios de Juan Carlos Balanyá y un revisor anónimo, que han mejorado sustancialmente el manuscrito.

## Referencias

- Baena, J., 1973. *Mapa Geológico de España 1:50 000, hoja n° 910 (Caravaca de la Cruz)*. Ministerio Industria. IGME. Madrid.
- Berástegui, X., Banks, C. J., Puig, C., Taberner, C., Waltham, D., Fernández, M., 1998. Lateral diapiric emplacement of Triassic evaporites at the southern margin of the Guadalquivir Basin, Spain. En: *Cenozoic Foreland Basins of Western Europe*, (A. Mascle, C. Puigdefàbregas, H.P. Luterbacher, M. Fernández, Eds). Geological Society, London, Special Publication, 134: 49–68.
- Bourgeois, J., 1978, La transversale de Ronda, Cordillères Bétiqques, Espagne, Données géologiques pour un modèle d'évolution de l'Arc de Gibraltar. Tesis Doctoral, Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie, 3e série, 30: 445 p

- Cruz-Sanjulián, J., 1974. Estudio geológico del sector Cañete la Real, Teba, Osuna. Tesis doctoral, Univ. de Granada: 431 p.
- Daudet, M., Mouthereau, F., Bricchau, S., Crespo-Blanc, A., Gautheron, C., Angrand, P., 2020. Tectono-stratigraphic and thermal evolution of the western Betic flysch: implications for the geodynamics of South Iberian margin and Alboran Domain. *Tectonics*, e2020TC006093.
- Davis, D., Suppe, J., Dahlen, F. A., 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88 (B2): 1153–1172.
- De Ruig, M. J., 1996. Extensional diapirism in the eastern Prebetic foldbelt, southeastern Spain. AAPG Memoir 65.
- De Smet, M. E. M., 1984. Wrenching in the external zone of the Betic Cordilleras, southern Spain. *Tectonophysics*, 107 (1-2): 57-79.
- Fernández, T., Pérez-García, J. L., Gómez-López, J. M., Cardenal, J., Calero, J., Sánchez-Gómez, M., Tovar-Pescador, J. (2020). Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves by means of digital elevation models obtained with aerial photogrammetric and lidar data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4): 260.
- Festa, A., Dilek, Y., Pini, G. A., Codegone, G., Ogata, K., 2012. Mechanisms and processes of stratal disruption and mixing in the development of mélanges and broken formations: Redefining and classifying mélanges. *Tectonophysics*, 568-569: 7-24
- Festa, A., Ogata K., Pini G. A., Dilek Y., Codegone, G., 2015. Late Oligocene-early Miocene olistostromes (sedimentary mélanges) as tectono-stratigraphic constraints to the geodynamic evolution of the exhumed Ligurian accretionary complex (Northern Apennines, NW Italy). *International Geology Review*, 57(5–8): 540–562
- Flinch, J.F., Bally, A.W., Wu, S., 1996. Emplacement of a passive margin evaporitic allochthon in the Betic Cordillera in Spain. *Geology*, 24: 67-70.
- Flinch, J. F., Soto, J. I., 2017. Allochthonous Triassic and Salt Tectonic Processes in the Betic-Rif Orogenic Arc. En: *Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins*: 417-446.
- García, R., Jiménez Bonilla, A., Díaz Azpiroz, M., Pérez-Valera, F., Balanyá, J. C., Expósito, I., 2016a. Kinematics and geomorphology of the Algodonales-Badolatosa shear zone at the fold-and-thrust belt of the western Subbetics. *Geotemas*, 16 (2): 557-560.
- García, R., Jiménez Bonilla, A., Díaz Azpiroz, M., Rodríguez-Rodríguez, M., Pérez-Valera, F., 2016b. Structural controls on the development of the drainage system in the Triassic gypsum-rich formations of the western Subbetics (El Pontón stream, Badolatosa, Sevilla). *Geotemas*, 16 (2): 89-92.
- García-Rossell, L., 1972. Estudio geológico de la transversal Úbeda-Huelma y sectores adyacentes. Cordilleras Béticas (Provincia de Jaén). Tesis Doctoral, Univ. Granada: 550 p.
- Gràcia, E., Danobeitia, J., Vergés, J., Bartolomé, R., Córdoba, D., 2003. Crustal architecture and tectonic evolution of the Gulf of Cadiz (SW Iberian margin) at the convergence of the Eurasian and African plates. *Tectonics*, 22(4), 1033-1057.
- Guézou, J. C., Frizon De Lamotte, D., Coulon, M., Morel, J. L., 1991. Structure and kinematics of the Prebetic nappe complex (southern Spain): Definition of a “Betic Floor Thrust” and implications in the Betic-Rif orocline. *Annales Tectonicae*, 5(1): 32–48.
- Gutscher, M. A., Kukowski, N., Malavieille, J., Lallemand, S., 1998. Episodic imbricate thrusting and underthrusting: Analog experiments and mechanical analysis applied to the Alaskan accretionary wedge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B5): 10161-10176.
- Gutscher, M. A., Malod, J., Rehault, J.-P., Contrucci, I., Klingelhoefer, F., Mendes-Victor, L., Spakman, W., 2002. Evidence for active subduction beneath Gibraltar. *Geology*, 30: 1071-1074.
- Gutscher, M. A., Dominguez, S., Westbrook, G. K., Leroy, P., 2009. Deep structure, recent deformation and analog modeling of the Gulf of Cadiz accretionary wedge: Implications for the 1755 Lisbon earthquake. *Tectonophysics*, 475(1): 85–97.
- Hoedemaker, Ph.J., 1973. Olistostromes and other delapsional deposits, and their occurrence in the region of Moratalla (Province of Murcia, Spain). *Scripta Geologica*, 19: 1-197.
- Iribarren, L., Vergés, J., Camurri, F., Fulla, J., Fernandez, M., 2007. The structure of the Atlantic–Mediterranean transition zone from the Alboran Sea to the Horseshoe Abyssal Plain (Iberia–Africa plate boundary). *Marine Geology*, 243(1-4): 97-119.
- Martínez del Olmo, W., 2018. Modalidades y fases de deformación de la Cordillera Bética y su entorno próximo (España): problemas no resueltos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 31 (1): 49-66.
- Martínez del Olmo, W., 2019. El complejo olistostromático del Mioceno de la Cuenca del Río Guadalquivir (SO de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2): 3-16.
- Martínez del Olmo, W., Martín, D., 2016. El Neógeno de la cuenca Guadalquivir-Cádiz (Sur de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29 (1): 35-58.
- Medialdea, T., Vegas, R., Somoza, L., Vázquez, J. T., Maldonado, A., Díaz del Río, V., Maestro, A., Córdoba, D., Fernández-Puga, M. C., 2004. Structure and evolution of the “Olistostrome” complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cádiz (eastern Central Atlantic): Evidence from two long seismic cross-sections. *Marine Geology*, 209 (1–4): 173–198.
- Motis, K., Martínez del Olmo, W., 2012. Los cabalgamientos ciegos del Alto Guadalquivir (Provincia de Jaén). *Geotemas*, 14: 1-4.
- Pedreira, A., Marín-Lechado, C., Martos-Rosillo, S., Roldán, F. J., 2012. Curved fold-and-thrust accretion during the extrusion of a synorogenic viscous allochthonous sheet: The Estepa Range (External Zones, Western Betic Cordillera, Spain). *Tectonics*, 31, doi:10.1029/2012TC003119
- Pedreira, A., Ruiz-Constán, A., García-Senz, J., Azor, A., Marín-Lechado, C., Ayala, C., Díaz de Neira, J. A., Rodríguez-Fernández, L. R., 2020. Evolution of the South-Iberian paleomargin: From hyperextension to continental subduction. *Journal of Structural Geology*: 138.
- Perconig, E., 1960-1962. Sur la constitution géologique de l'Andalousie occidentale en particulier du bassin du Guadalquivir, Espagne méridionale. En: *Livre à la mémoire du Prof. P. Fallot*, Société Géologique de France, 1: 229-256.
- Pérez-López, A., Sanz de Galdeano, C., 1994. Tectónica de los materiales triásicos en el sector central de la Zona Subbética (Cordillera Bética). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 7 (1): 141-153.
- Pérez-Valera, F., 2005. *Estratigrafía y tectónica del Triásico Sudibérico en el sector oriental de la Cordillera Bética*, Tesis Doctoral, Univ. de Granada: 301 p.
- Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-Valera, L. A., Pérez-López, A., 2010. Deformación en yesos del Triásico en el sector oriental de la Falla de Socovos (sureste de España). *Geogaceta*. 48: 211-214.
- Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-Valera, L. A., 2011. From salt diapirs to strike-slip tectonic push-up structures: outcropping examples from the Triassic evaporites of the Betic Cordillera (southeast Spain), *MAPG-AAPG 2nd International convention, conference and exhibition*, Marrakech, abstract book.

- Pérez-Valera, F., Pérez-Valera, L. A., Sánchez-Gómez, M., Serrano Lozano, F., García-García, F., Pérez-Valera, J. A., 2013. Early-middle Miocene piggyback basins in the north Betic front (South of Spain). En: *VRCONS Congress Abstract Book* (M. Abad, T. Izquierdo, F. Ruiz, eds): 43
- Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-López, A., Pérez-Valera, L. A., 2017. An evaporite-bearing accretionary complex in the northern front of the Betic-Rif orogen. *Tectonics*, 36, doi:10.1002/2016TC004414
- Ramos, A., Fernández, O., Terrinha, P., Muñoz, J. A., 2017. Neogene to recent contraction and basin inversion along the Nubia-Iberia boundary in SW Iberia. *Tectonics*, 36: 257–286.
- Riaza, C., Martínez del Olmo, W., 1996. Depositional model of the Guadalquivir-Gulf of Cadiz Tertiary basin. En: *Tertiary basins of Spain, the stratigraphic record of crustal kinematics*, (P. Friend, C. Dabrio, Eds). Cambridge University: 330- 338.
- Rodríguez-Fernández, J., Roldán, F.J., Azañón, J.M., García-Cortés, A., 2013. El colapso gravitacional del frente orogénico alpino en el Dominio Subbético durante el Mioceno medio-superior: El Complejo Extensional Subbético. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (3): 477-504.
- Roldán, F.J., 1995. Evolución neógena de la Cuenca del Guadalquivir. Tesis Doctoral, Univ. Granada: 259 p.
- Roldán, F.J., García Cortés, A., 1988. Implicaciones de materiales triásicos en la Depresión del Guadalquivir, Cordilleras Béticas (Provincias de Córdoba y Jaén). *II Congreso Geológico de España, Granada, Comunicaciones*, 1: 189-192.
- Rondeel, H. E., van der Gaag, P. A., 1986. A two-stage diapiric event in the eastern Prebetic. *Estudios Geológicos*, 42 (2-3): 117-126.
- Sánchez-Gómez, M., Pérez-Valera, F., 2018. Evidencias de tectónica reciente (Pleistoceno Superior) en el límite de la Cordillera Bética con la Cuenca del Guadalquivir (provincia de Jaén). En: *Tercera reunión ibérica sobre fallas activas y paleosismología* (C. Canora, F. Martín, E. Masana, R. Pérez y M. Ortuño, Eds.), Alicante (España): 107-110.
- Sanz de Galdeano, C., Galindo-Zaldívar, J., López-Garrido, A. C., Alfaro, P., Pérez-Valera, F., Pérez-López, A., García-Tortosa, F. J., 2006. La falla de Tíscar: su significado en la terminación sudoeste del arco Prebético. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (3-4): 271-280.
- Torelli, L., Sartori, R., Zitellini, N., 1997. The giant chaotic body in the Atlantic Ocean off Gibraltar: new results from a deep seismic reflection survey. *Marine and Petroleum Geology*, 14(2): 125-138.
- Vera, J.A., Martín-Algarra, A., 2004. Cordillera Bética y Baleares. Divisiones mayores y nomenclatura. En: *Geología de España*, (J.A. Vera, Ed). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero, Madrid: 348-350.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 21-07-2020

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 28-09-2020

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 05-10-2020



# RESPUESTA AL COMENTARIO SOBRE EL ARTÍCULO «EL COMPLEJO OLISTOSTRÓMICO DEL MIOCENO DE LA CUENCA DEL RÍO GUADALQUIVIR (SO DE ESPAÑA)» de Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M. y Pérez-López, A.

Wenceslao Martínez del Olmo

*Oil and Gas Capital. s. l., Ángel Muñoz, 3, 28043 Madrid. wmartinez@oilandgascapital.com*

Martínez del Olmo, W., 2020. Respuesta al Comentario sobre el artículo “El complejo olistostrómico del Mioceno de la Cuenca del Río Guadalquivir (SO de España)” de Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M. y Pérez-López, A. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33 (2): 69-72.

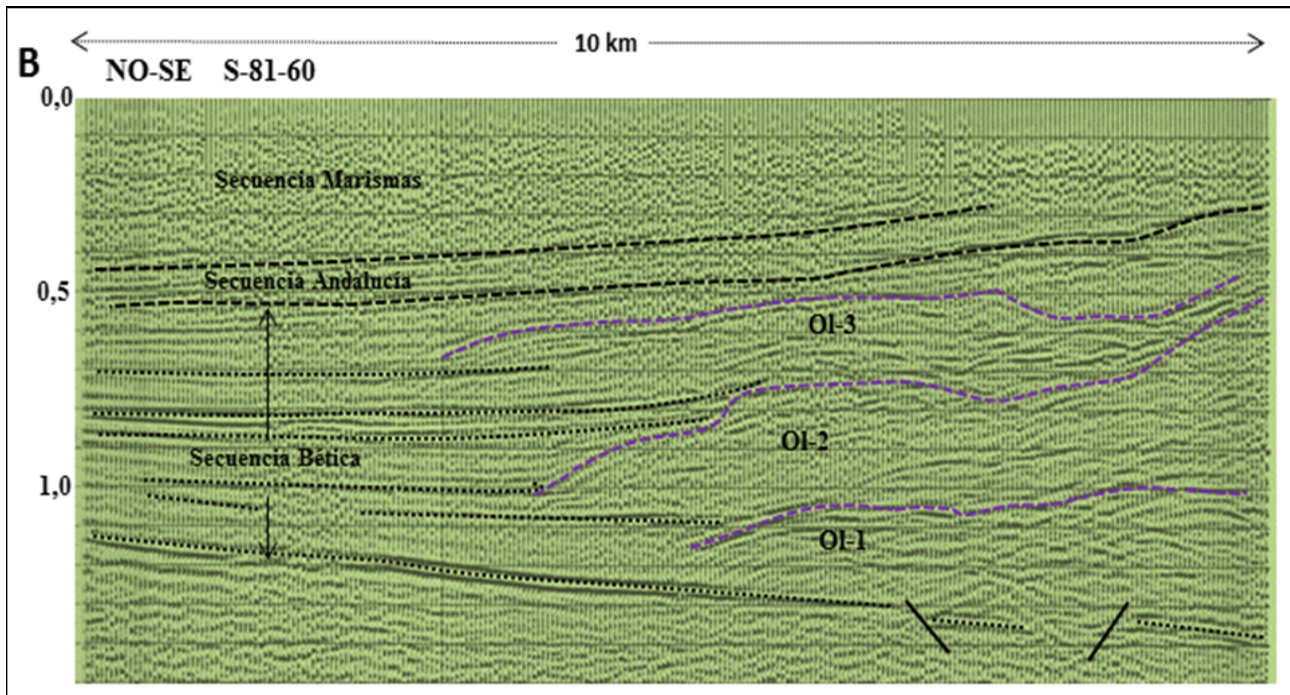
Después de leer detenidamente el trabajo de Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M. y Pérez-López, A., aceptado para su publicación en el volumen 33(2) de la Revista de la Sociedad Geológica de España, tengo que confesar que tal trabajo puede resumirse en la no aceptación de la existencia de unidades olistostrómicas en la cuenca miocena del Río Guadalquivir, ya que se interpreta que las unidades calificadas como olistostromas en numerosos trabajos previos (Perconig, 1962; García-Rosell, 1972; Martínez del Olmo *et al.*, 1984; Suárez Alba *et al.*, 1989; ITGE, 1990; Roldan, 1995; Riaza y Martínez del Olmo, 1996; Martínez del Olmo *et al.*, 1998; Vera, 2000, 2004; Ledesma, 2000; Martínez del Olmo, 1996 a, b, 2003, 2004, 2018, 2019; Vera y Martín-Algarra, 2004; Martínez del Olmo *et al.*, 2005; Motis y Martínez del Olmo, 2012; Martínez del Olmo y Motis, 2012; Rodríguez-Fernández *et al.*, 2013; Martínez del Olmo y Martín, 2016; Torelli *et al.*, 1997) se corresponden con sucesivos cabalgamientos hacia el NO (Guadalquivir) y OSO (Golfo de Cádiz) que conforman un prisma tectónico (*accretionary prism*). El comentario de Pérez-Valera *et al.* (2020), al contrario que el trabajo de Martínez del Olmo (2019), presenta una figura sin el apoyo de líneas sísmicas y de sondeos, que tal y como expresan, es un esquema conceptual del complejo olistostrómico. Este esquema, está basado en la interpretación de complejos, a veces caóticos, afloramientos de materiales del meridional y adyacente Dominio Subbético. Esta hipótesis, no contrastada, que cuestiona la existencia del Complejo Olistostrómico del Guadalquivir, que es así adjetivado en el libro de Geología de España (2004) o como simplemente olistostroma en muchos de los trabajos arriba indicados,

obliga a una réplica, porque suprimir o minusvalorar los procesos gravitatorios ocurridos en las cuencas miocenas extendidas entre el Golfo de Cádiz y el Golfo de Valencia (Martínez del Olmo, 1996 a, b) significa una sustancial propuesta de modificación al conocimiento de la Geología de España.

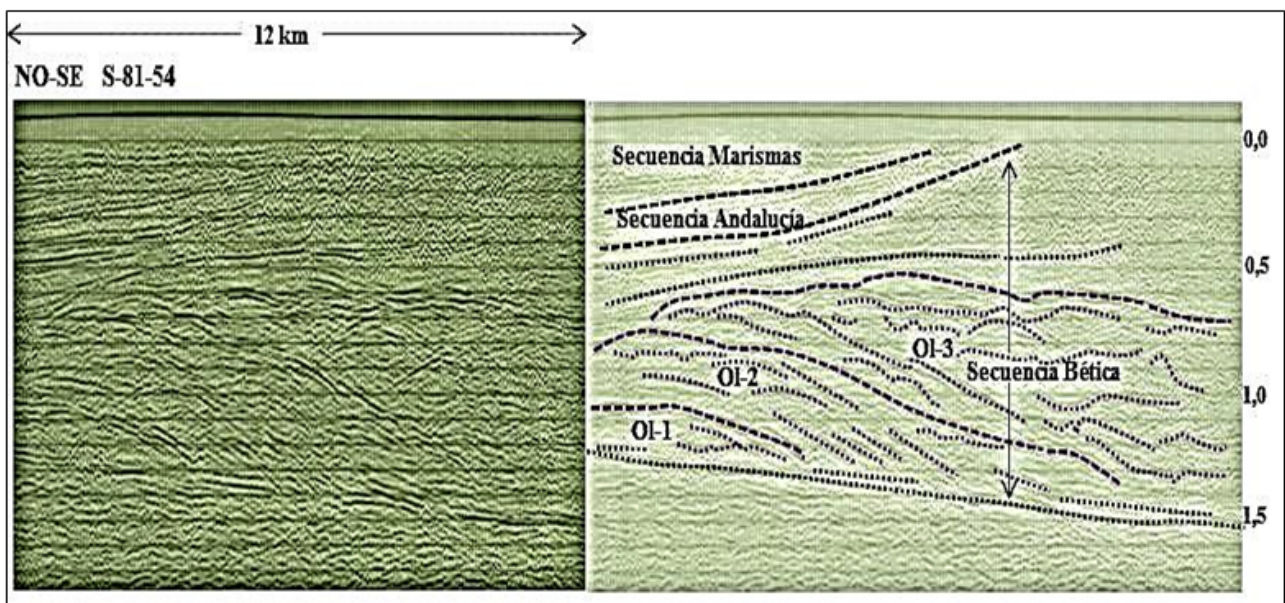
Tras esta breve introducción-resumen, que expresa la contradicción existente entre numerosos trabajos previos que no dudan de un Complejo Olistostrómico deslizado desde el S-SE al Mioceno del Guadalquivir, dedicaré los párrafos siguientes a clarificar aquellos motivos que Pérez-Valera *et al.* (2020) consideran que soportan firmemente su interpretación, motivos que pueden resumirse en: 1. Ascenso estructural desde el S-SE de las superficies basales de los deslizamientos olistostrómicos. 2. La existencia de depósitos gravitacionales, no compatibles con el marco estructural propuesto en el Alto Guadalquivir con: a) indicadores cinemáticos en el Triásico, el Paleógeno y el Cretácico, b) estructuras arqueadas o cabalgamientos, en un contexto transpresivo altamente oblicuo, y c) la extensión al Golfo de Cádiz del prisma de acreción propuesto.

El ascenso estructural no siempre es evidente en las líneas sísmicas (véanse las figuras 1 y 2, extraídas de Martínez del Olmo, 2019) en las que sería imposible atribuir a fallas inversas los deslizamientos gravitatorios a un fondo de cuenca de edad Tortonense, que contiene las turbiditas de la Formación Arenas del Guadalquivir de la Secuencia Bética. De otra parte, atribuir este ascenso a un prisma tectónico es equivalente a expresar la existencia de una zona de subducción intra-continental cuyo ángulo y geometría, de él derivada, desconocemos, y olvidar-suprimir el *tilting*





**Fig. 1.-** Deslizamientos olistostrómicos OL-1, OL-2 y OL-3 en una configuración progradante. Eje vertical con tiempo doble en segundos.



**Fig. 2.-** Deslizamientos olistostrómicos OL-1, OL-2 y OL-3 en una configuración retrogradante. Eje vertical con tiempo doble en segundos.

de más de 1.500-2.500 m de subsidencia diferencial que respectivamente puede estimarse para las transversales NO-SE y NE-SO. Subsidencia continua y aún activa de toda la cuenca, atribuida a la última de las 9 fases de deformación de las Béticas (Martínez del Olmo, 2018). Al mismo tiempo, sorprende como toda la atención de Pérez-Valera *et al.* (2020) se fija en la base y no en el techo de las masas gravitacionales, que siempre se observan descendentes hacia el NO. Dispositivo obligado por su procedencia de uno o varios altos estructurales con inestables taludes localizados en el Subbético. También sorprende que las líneas

sísmicas sean capaces de visualizar los muy delgados (4 a 8 m) niveles con arenas turbidíticas y no permitan apreciar las salbandas y trazas de las postuladas fallas inversas.

Las líneas sísmicas enseñan un dispositivo progradante, agradante y retrogradante de los individuales cuerpos deslizados (OL-1 a OL-3) de Martínez del Olmo (2018) lo que lleva a un mal encaje con un prisma tectónico que debería ser siempre ascendente-retrogradacional. Porque si no es así, se entiende que habría unidades fuera de secuencia, que no han sido descritas en Pérez-Valera *et al.* (2017). No dudo de la existencia en el Alto Guadalquivir



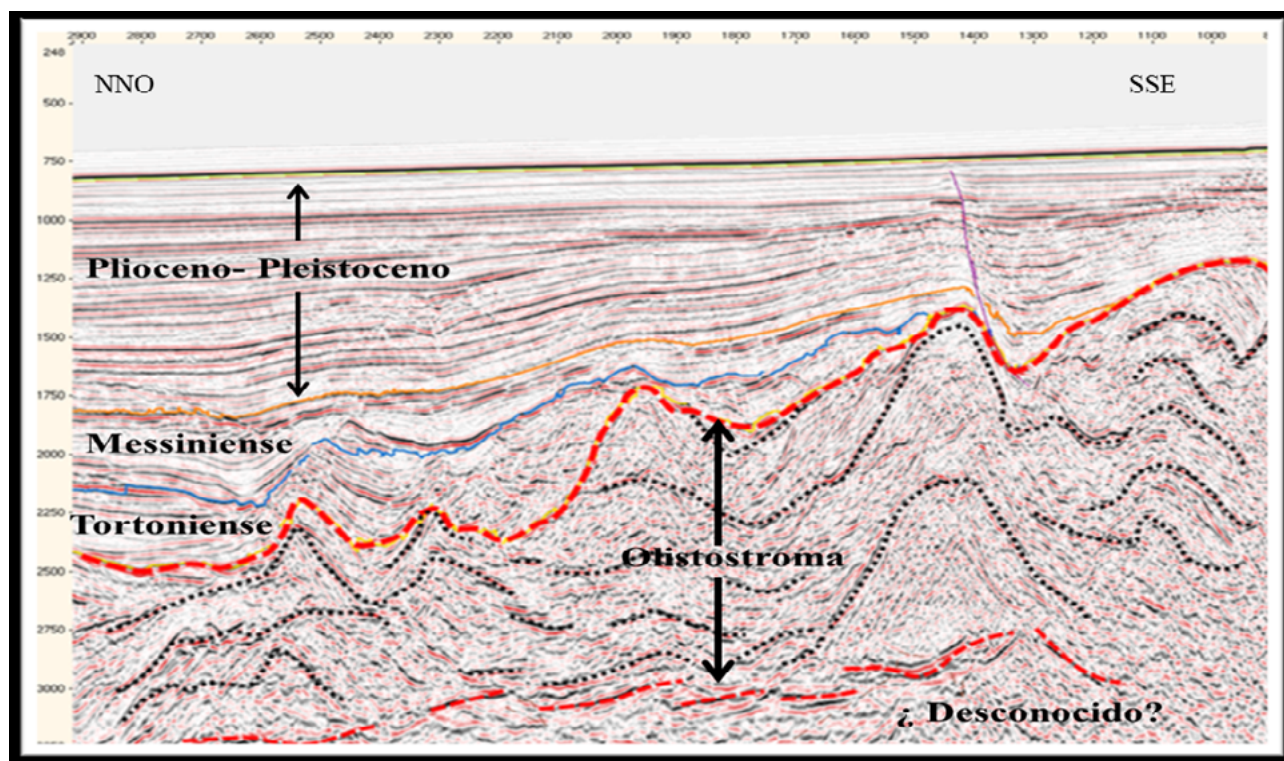
de olistostromas, cabalgamientos en superficie y ciegos, que Pérez-Valera *et al.* (2017) describen con indicadores cinemáticos en el Triásico, Cretácico y Paleógeno, lo que no implica que estos indicadores y sus fábricas no sean heredados y transportadas desde su patria de origen, que debe ser atribuida al Subbético, que por cierto, también es calificado como Subbético Olistostrómico en Vera y Martín-Algarra (2004).

Las líneas sísmicas del Alto Guadalquivir muestran numerosos cabalgamientos ciegos (Motis y Martínez del Olmo, 2012) que nacen de una superficie basal del Mesozoico Prebético y que pueden progresar hasta la base de los olistostromas deslizados en el Tortoniense, en cuyo seno se pierden las trazas de las profundas fallas inversas. Este sistema, parcialmente visible en las líneas sísmicas, si podría atribuirse al postulado prisma tectónico de Pérez-Valera *et al.* (2017) pero dado que los antifórmas que los cabalgamientos generan, están cubiertos por el olistostroma superficial OL-3, y que es muy difícil estimar si este es cortado por los cabalgamientos o su deformación es un simple efecto de una tardía compactación diferencial, la incertidumbre del prisma tectónico persiste, y llama la atención que ahora se aluda a la heterogénea calidad de las líneas sísmicas y la ausencia de sondeos, cuando en su Figura 1, ello es ciertamente evidente. Es decir, más valen pocas líneas sísmicas, que ninguna. Caso muy diferente al descrito en el prisma tectónico del Este de Cuba y en el talud norte del Banco Le Danois en las aguas profundas del Mar Cantábrico, ejemplos donde las líneas sísmicas permiten distinguir los olistostromas de los cabalgamientos que los cortan, en estos dos espectaculares frentes mixtos (Martínez del Olmo *et*

*al.*, 2005; Martínez del Olmo, 2003). Es decir, olistostromas y cabalgamientos no son incompatibles en los frentes tectónicos alpinos.

Cuando se traslada y continúa el prisma de acreción al Golfo de Cádiz se está aceptando una subsidencia diferencial que con anterioridad se especificó como dubitativa, para así hacer recaer dudas sobre la inclinación hacia el S-SE de las trazas asignadas a cabalgamientos, y sorprende que tanto en el sector del Alto Guadalquivir, como en el septentrional del Golfo de Cádiz, se recurra, en un caso a cita bibliográfica redactada sin el concurso de líneas sísmicas (García-Rosell, 1972), y a otra (Medialdea *et al.*, 2004) en la que sobre una transversal de 500 km, se describen tres cinturones de facies que responden tanto a procesos gravitacionales como a tectónicos, lo que proporciona una difícil mezcla de facies (Festa *et al.*, 2012). Es así como se reconoce la existencia de una masa olistostrómica que, más tarde, fue deformada por una contracción NE-SO ocurrida en el Mioceno Superior, que como no, aún continúa activa. La neta separación de unas y otras causas o procesos, gravitacionales y tectónicos (prisma de acreción) es difícil, porque ni en las campañas sísmicas en 2D y 3D recientemente disparadas, es posible interpretar sistemas coherentes de fallas dentro del espeso olistostroma del Golfo de Cádiz, del que como ejemplo se adjunta la Figura 3.

Finalmente, indicar que me alegra haber promovido este contraste de opiniones sobre un tema que, sin duda, contribuye al conocimiento de la Geología de España, pues solo de la discusión geológica puede nacer la verdad, ya que es de esperar que esta estimulara nuevos trabajos dedicados al tema que nos ocupa.



**Fig. 3.-** Línea sísmica en PSTM (45 km de longitud) mostrando el complejo olistostrómico bajo el Tortoniense y el Messiniense turbidítico. La imagen muestra geometrías debidas al diapirismo de las sales y arcillas subcompactadas que contiene, y parece difícil o imposible seguir la traza de las fallas inversas del aludido prisma de acreción tectónica. Tiempo doble en milisegundos.

## Agradecimientos

A la editora Nieves López-González por anticiparme los comentarios de Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M. y Pérez-López, A., y darme un poco de tiempo para incluir las respuestas en el mismo volumen de la RSGE. Al revisor anónimo, al que he tratado de responder a sus observaciones clave y a la precedente editora Beatriz Bádenas por sugerirme cambiar el título original del Frente de los olistostromas a simplemente los olistostromas, porque así se abrió una mayor horquilla para el tema en discusión.

## Referencias

- Festa, A., Dilek, Y., Pini, G. A., Codegone, G., Ogata, K., 2012. Mechanisms and processes of stratal disruption and mixing in the development of mélanges and broken formations: Redefining and classifying mélanges. *Tectonophysics*, 568-569: 7-24.
- García-Rosell, E., 1972. Estudio geológico de la transversal Úbeda-Huelva y sectores adyacentes. Cordilleras Béticas (Provincia de Jaén). Tesis Doctoral. Universidad de Granada: 550 p.
- ITGE, 1990. Guadalquivir-Golfo de Cádiz. En: *documentos sobre la Geología del subsuelo de España. I*, 28 p.
- Ledesma, S., 2000. *Astrobiocronología y estratigrafía de alta resolución del Neógeno de la Cuenca Guadalquivir-Golfo de Cádiz*. Tesis Universidad de Salamanca. 464 p.
- Martínez del Olmo, W., García Mallo, J., Leret Verdú, G., Serrano, A. y Suárez, J., 1984. Modelo tectosedimentario del Bajo Guadalquivir. *I Congreso Geológico de España. Segovia. 1: 199-213*.
- Martínez del Olmo, W., Martínez Cabañas, W., Malagón, J., Hernández, E., Klimowitz, J., Serrano, A., 1988. Transversales de Huelva, Sevilla y Córdoba a partir de algunos pozos profundos: olistostromas y cabalgamientos (Cordillera Bética, SO. de España). En *Libro Homenaje a José Ramírez del Pozo. Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo. Madrid: 189-197*.
- Martínez del Olmo, W., 1996a. *Secuencias de depósito y estructuración diapírica en el Prebético Oriental e Ibérico de Valencia desde sondeos y líneas sísmicas*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Madrid, 439 p.
- Martínez del Olmo, W., 1996b. Depositional Sequences in the Gulf of Valencia Tertiary basin. En: *Tertiary basins of Spain, the stratigraphic record of crustal kinematics. P. Friend and C. Dabrio (eds) Cambridge University. 55-67*.
- Martínez del Olmo, W., 2003. El olistostroma del Banco Le Danois como análogo del olistostroma de la Cordillera Bética. *V Congreso Grupo Español del Terciario. Granada*.
- Martínez del Olmo, W., 2004. La exploración de hidrocarburos en el terciario de España. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (3): 411-426.
- Martínez del Olmo, W., Soriano, S., Torrecusa, S. y Riaza, C., 2005. Evolución tectónica y sedimentaria del NO de Cuba. *Iª Convención cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana*. 25 p.
- Martínez del Olmo, W., García Mojonero, C., y Torrecusa, S., 2005. The Guadalquivir and Gulf of Cadiz gas basin. *25 Aniversario Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo. W. Martínez del Olmo (Ed): 105-121*.
- Martínez del Olmo, W y Motis, K., 2012. El Banco Le Danois desde la campaña sísmica CS-01 (Mar Cantábrico, España) *VIII Congreso Geológico de España. Oviedo: 4p*.
- Martínez del Olmo, W. y Martín, D., 2016. El Neógeno de la cuenca Guadalquivir-Cádiz (Sur de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*. 29 (1): 35-58.
- Martínez del Olmo, W., 2018. Modalidades y fases de deformación de la Cordillera Bética y su entorno próximo (España): problemas no resueltos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 31 (1): 49-66.
- Martínez del Olmo, W., 2019. El complejo olistostromático del Mioceno de la Cuenca del Río Guadalquivir (SO de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2): 3-16.
- Medialdea, T., Vegas, R., Somoza, L., Vázquez, J. T., Maldonado, A., Díaz del Río, V., Maestro, A., Córdoba, D., Fernández-Puga, M. C., 2004. Structure and evolution of the "Olistostrome" complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cádiz (eastern Central Atlantic): Evidence from two long seismic cross-sections. *Marine Geology*, 209 (1-4): 173-198.
- Motis, K. y Martínez del Olmo, W., 2012. Los Cabalgamientos ciegos del Alto Guadalquivir (Provincia de Jaén). *VIII Congreso Geológico de España. Geotemas, 14:1-4*.
- Perconig, E., 1962. Sur la constitution géologique de l'Andalousie occidentale en particulier du bassin du Guadalquivir, Espagne méridionale. En: *Livre à le mémoire du Prof. P. Fallot, Société Géologique de France*, 1: 229-256.
- Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-López, A. (2020). Comentario al artículo "El complejo olistostromático del Mioceno de la Cuenca del Río Guadalquivir (SO de España)" de Martínez del Olmo, W. (2019): *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32: 3-16. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33 (2): 63-68.
- Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M., Pérez-López, A., Pérez-Valera, L.A., 2017. An evaporite-bearing accretionary complex in the northern front of the Betic-Rif orogen. *Tectonics*, 36, doi:10.1002/2016TC004414.
- Rodríguez-Fernández, J., Roldán, F.J., Azañón, J.M., García-Cortés, A., 2013. El colapso gravitacional del frente orogénico alpino en el Dominio Subbético durante el Mioceno medio superior: El Complejo Extensional Subbético. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (3): 477-504.
- Roldán, F.J. (1995): Evolución neógena de la Cuenca del Guadalquivir. Tesis Universidad de Granada. 295 p.
- Riaza, C. y Martínez del Olmo, W., 1996. Depositional model of the Guadalquivir-Gulf of Cadiz Tertiary basin. En: *Tertiary basins of Spain, the stratigraphic record of crustal kinematics. P. Friend and C. Dabrio (Eds). Cambridge University. 330-338*.
- Suárez Alba, J., Martínez del Olmo, W., Serrano Oñate, A. y Leret Verdú, G., 1989. Estructura del sistema turbidítico de la Formación Arenas del Guadalquivir. En: *Libro homenaje a R. Soler y José. Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo. Madrid. 123-132*
- Torelli, L., Sartori, R., Zitellini, N., 1997. The giant chaotic body in the Atlantic Ocean off Gibraltar: new results from a deep seismic reflection survey. *Marine and Petroleum Geology*, 14(2):125-138.
- Vera, J. A., 2000. El Terciario de la Cordillera Bética: Estado actual de conocimientos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (1-2): 345-373.
- Vera, J.A., (ed) 2004. *Geología de España*. Sociedad Geológica de España, Instituto Geológico y Minero de España. 884p.
- Vera, J. A., 2004. Cordillera Bética y Baleares. En: *Geología de España* (J. A. Vera, Ed), Sociedad Geológica de España (SGE) e Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, 347-464.
- Vera, J. A. y Martín-Algarra, A., 2004. Cordillera Bética y Baleares. Divisiones mayores y nomenclatura. En: *Geología de España*, (J. A. Vera, Ed). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero, Madrid: 348-350.

MANUSCRITO RECIBIDO EL: 12-10-2020

RECIBIDA LA REVISIÓN EL: 03-11-2020

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL: 04-11-2020

## REVISORES DEL VOLUMEN 33, NÚMEROS 1 Y 2 (AÑO 2020)

### *REVIEWERS OF VOLUME 33, ISSUES 1 AND 2 (2020 YEAR)*

La Revista de la Sociedad Geológica de España agradece a los revisores que han participado en los dos números que componen el volumen 33 su esfuerzo y dedicación en la revisión de los manuscritos encomendados. Su trabajo ha mejorado indudablemente la calidad de la Revista.

Aurell, M. (*Universidad de Zaragoza*)  
 Balanyá Roure, J.C. (*Universidad Pablo de Olavide*)  
 Bardají, T. (*Universidad de Alcalá*)  
 Bernáldez Sánchez, E. (*Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*)  
 de Santisteban, C. (*Universitat de València*)  
 Kress, P.R. (*YPF, Argentina*)  
 Menéndez Duarte, R. (*Universidad de Oviedo*)  
 Moreno-Azanza, M. (*Universidade Nova de Lisboa, Portugal*)  
 Vegas Salamanca, J. (*Instituto Geológico y Minero de España*)

Y 16 revisores anónimos pertenecientes a las siguientes instituciones:

*CONICET-Mendoza (Argentina)*  
*Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Zaragoza*  
*STATOIL, Brasil*  
*Universidad Central de Venezuela (Venezuela)*  
*Universidad Complutense de Madrid*  
*Universidad de Alicante*  
*Universidad de Castilla-La Mancha*  
*Universidad de Granada*  
*Universidad de Huelva*  
*Universidad de La Laguna*  
*Universidad de Salamanca*  
*Universidad de Zaragoza*  
*Universidad Nacional a Distancia (Centro Calatayud, Zaragoza)*  
*Universidad Nacional Autónoma de Nuevo México (México)*  
*Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (Argentina)*  
*Universidad Nacional de San Luis (Argentina)*

**AUTORES DEL VOLUMEN 33, NÚMEROS 1 Y 2 (AÑO 2020)**

***AUTHORS OF VOLUME 33, ISSUES 1 AND 2 (2020 YEAR)***

Acedo, A. (*Universidad Complutense de Madrid*)  
 Acuña, A.J. (*Universidad Tecnológica Nacional, Santa Cruz, Argentina*)  
 Alonso, V. (*Universidad de Oviedo*)  
 Aquilano, R. (*Universidad Nacional de Rosario, Argentina*)  
 Aznar, M. (*Universidade de Cabo Verde, Cabo Verde*)  
 Bauluz, B. (*Universidad de Zaragoza*)  
 Canudo, J.I. (*Universidad de Zaragoza*)  
 Casal, G.A. (*Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina*)  
 Castanera, D. (*Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont, Universitat Autònoma de Barcelona*)  
 Fesharaki, O. (*Universidad Complutense de Madrid*)  
 García-Frank, A. (*Universidad Complutense de Madrid*)  
 Garcia-Lozano, C. (*Universitat de Girona*)  
 Gelabert, B. (*Universitat de les Illes Balears*)  
 Jurado, C. (*Universidad de Zaragoza*)  
 Konstantinidis, M. (*York University, Canadá*)  
 Lalla, E.A. (*York University, Canadá*)  
 Lopez-Reyes, G. (*Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología, Valladolid*)  
 Martínez del Olmo, W. (*Oil and Gas Capital S.L., Madrid*)  
 Martínez Gallego, J. (*Paterna, Valencia*)  
 Martínez-Frías, J. (*Instituto de Geociencias CSIC-UCM, Madrid*)  
 Martín-Prieto, J.Á. (*Universitat de les Illes Balears*)  
 Medina, J. (*Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología, Valladolid*)  
 Nillni, A.M. (*Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina*)  
 Pérez-López, A. (*IACT-CSIC-Universidad de Granada*)  
 Pérez-Valera, F. (*Universidad de Alicante*)  
 Rodríguez-Perea, A. (*Universitat de les Illes Balears*)  
 Roig-Munar, F.X. (*Investigador independiente y consultor ambiental, Menorca*)  
 Rull, F. (*Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología, Valladolid*)  
 Sagripanti, G.L. (*Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina*)  
 Sánchez-Gómez, M. (*Universidad de Jaén*)  
 Sanz-Arranz, A. (*Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología, Valladolid*)  
 Tomas, G.J. (*CONICET y Universidad Tecnológica Nacional, Santa Cruz, Argentina*)  
 Vargas, W. (*YPF-CONICET, Buenos Aires, Argentina*)  
 Veneranda, M. (*Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología, Valladolid*)  
 Vilaplana, J.M. (*Universitat de Barcelona*)  
 Villalba, D. (*Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina*)

# NORMAS DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

La Revista de la Sociedad Geológica de España (RSGE) es una publicación semestral de la Sociedad Geológica de España que da cabida a trabajos de investigación científica, en español o en inglés, en relación con cualquier área de las Ciencias de la Tierra. Los trabajos de geología de la Península Ibérica y áreas próximas son particularmente bienvenidos. Los trabajos deberán ser originales, es decir, no publicados (o aceptados) en otra revista, sea íntegramente o por partes y/o en otro idioma. Todos los artículos son revisados al menos por 2 especialistas y por miembros del Comité Editorial.

## PREPARACIÓN DEL MANUSCRITO

### Organización del texto

El texto se elaborará siguiendo la Plantilla RSGE (formato DOC), disponible en <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge>. El texto seguirá este orden: 1) Título en español e inglés; 2) Nombre y apellido/s del/los autor/es; 3) Dirección postal y electrónica completa del/los autor/es; 4) Resumen en español e inglés, de 200 palabras para el idioma del manuscrito, de 400 en el segundo idioma; 5) Palabras clave (3 a 5, en español y en inglés); 6) Título corto para el encabezamiento, en el idioma del manuscrito; 7) Texto principal. Los encabezamientos del texto principal se ordenarán jerárquicamente en 3 tipos, sin numeración alguna: **Apartado**, *Subapartado de primer orden* y *Subapartado de segundo orden*, con punto y seguido el texto. En el texto, se incluirán solo citas de trabajos publicados o en prensa, con el apellido de autor/es y año de publicación y en orden cronológico (e.g., Pérez, 2004; Mateos y Jiménez, 2007; Teixell *et al.*, 2007). Las figuras y tablas se indicarán de forma correlativa (e.g., Fig. 1, Fig. 2, Tabla 1, Tabla 2...etc.); 8) Agradecimientos; 9) Referencias. Deberán ir ordenadas alfabéticamente por el nombre de autor/es y cronológicamente en el caso de mismo/s autor/es, de acuerdo con los ejemplos indicados abajo; y 10) Pies de figuras y tablas.

- Arce Durante, J.M., Fernández Tomas, J., Monteserín López, V., 1977. *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 24 (Mondoñedo)*. IGME, Madrid.
- Díaz Martínez, E., 1988. El Cretácico Inferior del sector de Jubera (norte de la Sierra de Los Cameros, La Rioja). *II Congreso Geológico de España, Comunicaciones*, 1: 67-70.
- Lobo, F.J., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L., Díaz del Río, V., 2001. The sedimentary record of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (Southwest Spain). *Marine Geology*, 178: 171-195.
- Ortega Gironés, E., Gil Iburguchi, J.I., 1983. La Unidad de Malpica-Tuy. En: *Libro jubilar, J.M. Ríos. Geología de España, Tomo I*, (J. Comba, Ed). IGME, Madrid, 430-440.
- Parra, J., 2001. Análisis paleoambiental de los sistemas continentales y el vulcanismo asociado del Neógeno del Valle del Cajón en los Andes Occidentales (Catamarca, República Argentina). Tesis Doctoral, Univ. Huelva, 272 p.
- Woodroffe, C.D., 2002. *Coasts*. Cambridge University Press, New York, 623 p.

### Figuras y tablas

Para el diseño de tablas y figuras (incluyendo dibujos y fotografías) se tendrá en cuenta el tamaño de caja de la revista (248 x 170 mm). Las figuras y tablas pueden ocupar la anchura de una columna (82 mm) o de una página (170 mm). Las tablas irán en formato DOC. El tamaño de letra deberá ser como mínimo de 7 ptos. y la anchura de línea oscilará entre 0,3 y 1,5 ptos. Las partes de una figura se denotarán con letras mayúsculas (A, B, C, etc.). Los dibujos deben tener una buena calidad en cuanto a tramas, tonos de grises y leyendas. Las fotografías deben ser claramente visibles, tener contraste suficiente y acabado brillante, y deben contener escalas u objetos que sirvan de referencia.

### Extensión del manuscrito

Como norma general, la extensión del manuscrito, incluyendo texto y espacio equivalente de figuras y tablas, no podrá exceder 20 páginas. Una página de la Plantilla RSGE (en fuente Times New Roman 10, a espacio simple) equivale a unas 1000 palabras aproximadamente.

## ENVÍO Y REVISIÓN DEL MANUSCRITO

El manuscrito será enviado electrónicamente a la Editora Principal (Nieves López González) a través de la plataforma de Envío de Artículos en <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge> en 2 documentos: 1) el texto en formato DOC (*i.e.*, Plantilla RSGE) y 2) las figuras y tablas en un documento PDF y numeradas correlativamente. A la hora de preparar estos documentos, hay que tener en cuenta que la plataforma tiene una capacidad máxima de envío de 9 Mb. E/los autor/es deberá/n proporcionar el nombre, institución y correo electrónico de 5 posibles revisores (ver Plantilla RSGE). Existe la posibilidad de vetar revisores, siempre que esté debidamente justificado.

La Editora Principal valorará la adecuación del manuscrito a las normas de publicación. Si el trabajo se ajusta a las normas, este será enviado para su revisión a 2 revisores y, en caso de discrepancia entre ellos, se remitirá a un tercer revisor. Teniendo en cuenta la opinión de los revisores, la Editora Principal decidirá si el trabajo se acepta como está, con modificaciones menores, con modificaciones mayores, o es rechazado. En caso de que sea aceptado con modificaciones, el manuscrito inicial será corregido por el/los autor/es, siguiendo las observaciones de los revisores. La nueva versión del documento será enviada a la Editora Principal, quien valorará la necesidad de una segunda revisión o, en su caso, lo aceptará definitivamente.

## MANUSCRITO ACEPTADO

Una vez aceptado el manuscrito, se enviará por correo electrónico a la Editora Principal ([nieves.lopez@ieo.es](mailto:nieves.lopez@ieo.es)) la versión final de las tablas (en formato DOC) y de las figuras (en formato JPG, TIFF o EPS), en archivos individuales. Si se usa el formato TIFF y la figura solo contiene dibujos de líneas, la resolución deberá ser de 600 ppp. Si la figura tiene trama de grises o es en color, la resolución deberá ser de 300 ppp.

El/los autores recibirá/n: 1) las pruebas de imprenta para la corrección de erratas, sin que se acepten modificaciones del texto original; y 2) el documento de Transferencia del *Copyright* a la Sociedad Geológica de España.

Para resolver cualquier duda pueden contactar con la Editora Principal por correo electrónico: [nieves.lopez@ieo.es](mailto:nieves.lopez@ieo.es).

## PUBLICATION RULES OF THE JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF SPAIN

The Journal of the Geological Society of Spain (RSGE) is a biannual publication of the Geological Society of Spain. This journal publishes original research contributions in Spanish or English that cover all Earth Science topics, in particular those concerning the Iberian Peninsula and surrounding areas. The submitted papers must be original research papers that have not been published (totally or partially) elsewhere, in any language. All the papers are reviewed by a minimum of 2 referees and by the Editorial Board.

### MANUSCRIPT PREPARATION

#### *Text organization*

The text is to be formatted using the RSGE Template (DOC format), which is available in <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge/>. It should be organized as follow: 1) Title (in English and Spanish); 2) Name and surnames of author/s; 3) Full postal and electronic addresses of author/s; 4) Abstract in Spanish and English, not exceeding 200 words in the language of the main text, and no more than 400 words in the second language; 5) Keywords (3 to 5, in Spanish and English); 6) Short title to use as header, in the language of the main text; 7) Main text. Headings should be hierarchically sorted into 3 types without any numbering: **Section**, *First-order subsection* and *Second order subsection*, with dot and followed by the text. In the main text, cite only published or in press publications. Any cited publications should be referred to the author's surname/s and year of publication, arranged chronologically (e.g., Pérez, 2004; Mateos and Jiménez, 2007; Teixell et al., 2007). The figures and tables must be sequential (e.g., Fig. 1, Fig. 2, Table 1, Table 2...etc.); 8) Acknowledgements; 9) References. The list of references should be arranged alphabetically by authors' surnames, and chronologically per author/s, as in the examples below; and 10) Figure and table captions.

- Arce Durante, J.M., Fernández Tomas, J., Monteserín López, V., 1977. *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 24 (Mondoñedo)*. IGME, Madrid.
- Díaz Martínez, E., 1988. El Cretácico Inferior del sector de Jubera (norte de la Sierra de Los Cameros, La Rioja). *II Congreso Geológico de España, Comunicaciones*, 1: 67-70.
- Lobo, F.J., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L., Díaz del Río, V., 2001. The sedimentary record of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (Southwest Spain). *Marine Geology*, 178: 171-195.
- Ortega Gironés, E., Gil Ibarguchi, J.I., 1983. La Unidad de Malpica-Tuy. In: *Libro jubilar, J.M. Ríos. Geología de España, Tomo I*, (J. Comba, Ed). IGME, Madrid, 430-440.
- Parra, J., 2001. Análisis paleoambiental de los sistemas continentales y el vulcanismo asociado del Neógeno del Valle del Cajón en los Andes Occidentales (Catamarca, República Argentina). Doctoral Thesis, Univ. Huelva, 272 p.
- Woodroffe, C.D., 2002. *Coasts*. Cambridge University Press, New York, 623 p.

#### *Figures and tables*

The page size of the journal, 248 x 170 mm, should be considered when preparing figures (both drawings and photographs) and tables. The figures and tables can occupy either one column (82 mm width) or the whole width of the page (170 mm width). Lettering should be a minimum of 7 pt. Line widths should range from 0.3 to 1.5 pt. Tables shall be in DOC format. Figure parts should be denoted by uppercase letters (A, B, C, etc.). Line drawings must be of good quality in terms of patterns, grey tones and legends. Photographs should be clear, have good contrast and a glossy aspect, and employ some indication of scale.

#### *Manuscript length*

As a general rule, manuscripts must not exceed 20 pages, including text and the equivalent space for figures and tables. One single-spaced RSGE Template page, written with font Times New Roman 10, contains approximately 1000 words.

### MANUSCRIPT SUBMISSION AND REVISION

Manuscripts should be submitted electronically through <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge/> to the Editor-in-chief (Nieves López González) in 2 separated files: 1) the text document (*i.e.*, RSGE Template) and 2) the figures and tables in a PDF document and numbered sequentially. The maximum fill size of these two documents should be 9 Mb. The author/s should provide the names, addresses and emails of 5 suggested reviewers (see RSGE Template). When justified, opposed reviewers can be named.

The Editor-in-chief evaluates the manuscript to ensure that it follows the requirements of the journal. If the manuscript receives a positive evaluation, it will be sent for review to 2 referees. Given conflicting reviews, the Editor-in-chief may send the manuscript to a third referee. Once revised, the Editor-in-chief will decide if the manuscript can be accepted as it is, with minor revisions, with major revisions, or rejected. If minor or major revisions are required, the author/s will be asked to modify the original manuscript following the reviewers' suggestions. The new version of the manuscript will be sent to the Editor-in-chief, who will assess whether there is a need for additional revisions or if the manuscript is acceptable for publication.

### ACCEPTED MANUSCRIPT

Once the manuscript is accepted, the author/s will send by email to the Editor-in-chief ([nieves.lopez@ieo.es](mailto:nieves.lopez@ieo.es)), the final version of the tables and figures in separated files. Tables must be in DOC format and figure files must be provided as JPG, TIFF or EPS files. For TIFF format figures containing only lines drawings, a resolution of 600 dpi is required. For greyscale or colour figures, a resolution of 300 dpi is sufficient.

Author/s will receive: 1) the print proofs, to be checked for typesetting/editing; and 2) the Copyright Transfer to the Geological Society of Spain.

Questions should be directed to the Editor-in-chief by email: [nieves.lopez@ieo.es](mailto:nieves.lopez@ieo.es).

# SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

La **Sociedad Geológica de España** fue fundada en 1985 y tiene como fines la promoción, fomento y difusión del conocimiento, progreso y aplicaciones de la Geología, el asesoramiento en materia científica y educativa a las Instituciones y Entidades que lo requieran, y la representación de los intereses científicos de la comunidad geológica de España a nivel internacional. Sus miembros tienen derecho a participar en todas las actividades organizadas por la Sociedad, a optar a ocupar cualquiera de sus cargos directivos y a recibir gratuitamente las publicaciones periódicas de la Sociedad: Geogaceta y Revista de la Sociedad Geológica de España.

## JUNTA DE GOBIERNO

---

- (Presidente)* **Juan Antonio Morales González**  
Departamento de Ciencias de la Tierra  
Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva  
Campus del Carmen, Avda. de las Fuerzas Armadas s/n, 21071 Huelva (España)  
Tel: +34 959 219 815; e-mail: jmorales@dgeo.uhu.es
- (Secretario)* **Miguel Gómez Heras**  
Departamento de Geología y Geoquímica  
Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid  
C/ Francisco Tomás y Valiente 7 (Módulo 06-406), 28049 Madrid (España)  
Tel: +34 914 975 407; e-mail: miguel.gomezheras@uam.es
- (Tesorera)* **María del Carmen Cabrera Santana**  
Departamento de Física, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,  
35017 Las Palmas de Gran Canaria (España)  
Tel: +34 928 454 478; e-mail: mcarmen.cabrera@ulpgc.es
- (Vicepresidenta)* **Ana Ruiz Constán**
- (Vicesecretario)* **Pedro Huerta Hurtado**
- (Secretario 2º)* **José Eugenio Ortiz Menéndez**
- (Vocales)* **Álvaro Jiménez Berrocoso**  
**Ángel Salazar Rincón**  
**Davinia Díez-Canseco**  
**Francisco Manuel Alonso Chaves**  
**Manuel Díaz Azpiroz**  
**Pilar Mata Campo**

## SEDE ADMINISTRATIVA

---

Sociedad Geológica de España:  
Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca, (España)  
<http://www.sociedadgeologica.org>

**Suscripciones:** Toda la correspondencia debe ser dirigida a la Sede Administrativa de la Sociedad. El precio de la suscripción anual es de 67 € para España y Portugal y 76 € para el resto del mundo.

# REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Volumen 33, Número 2, (2020)

- CELIA JURADO, BLANCA BAULUZ, DIEGO CASTANERA Y JOSÉ IGNACIO CANUDO  
Paleohistología y permineralización de dos saurópodos del ciclo jurásico en la subcuenca de galve (Teruel, España) / *Paleohistology and permineralization of two sauropods of the Jurassic cycle in the Galve subbasin (Teruel, Spain)* ..... 3
- FRANCESC XAVIER ROIG-MUNAR, JOSÉ ÁNGEL MARTÍN-PRieto, ANTONIO RODRÍGUEZ-PEREA, BERNADÍ GELABERT, JOAN MANUEL VILAPLANA Y CARLA GARCIA-LOZANO  
Revisión de los depósitos de tsunamis, bloques y tsunamitas, en las costas del Mediterráneo occidental / *Review of tsunami deposits, blocks and tsunamites on the coasts of the western Mediterranean* ..... 17
- GERMÁN J. TOMAS, WALTER VARGAS Y ADRIÁN J. ACUÑA  
Evaluación geoquímica por biomarcadores del yacimiento del Mosquito de la Cuenca Austral de la Patagonia Argentina) / *Geochemical evaluation by biomarkers of Del Mosquito reservoir in the Austral Basin of Argentine Patagonia* ..... 31
- ABEL ACEDO, OMID FESHARAKI Y ALEJANDRA GARCÍA-FRANK  
Análisis comparativo de menciones al patrimonio paleontológico y otros tipos de patrimonio en los currículos de Educación Secundaria en España (periodo 1970-2020) / *Comparative analysis of references to paleontological heritage and other types of heritage in Secondary Education curricula in Spain (1970-2020 period)* ..... 41
- FERNANDO PÉREZ-VALERA, MARIO SÁNCHEZ-GÓMEZ Y ALBERTO PÉREZ-LÓPEZ  
Comentario al artículo "El complejo olistostrómico del mioceno de la cuenca del río Guadalquivir (SO de España)" de Martínez del Olmo, W. (2019): *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (2): 3-16 ..... 63
- WENCESLAO MARTÍNEZ DEL OLMO  
Respuesta al comentario sobre el artículo «El complejo olistostrómico del mioceno de la cuenca del río Guadalquivir (SO de España)» de Pérez-Valera, F., Sánchez-Gómez, M. Y Pérez-López, A. .... 69