



## PROPUESTA DE LUGARES DE INTERÉS GEOLÓGICO ASOCIADOS A BLOQUES Y CORDONES DE ORIGEN TSUNAMÍTICO EN LA COSTA SE DE MENORCA (BALEARES)

*Proposed Geosites for tsunamitic blocks and ridges in the SE coast of Menorca (Balears)*

Francesc Xavier Roig-Munar<sup>1\*</sup>, Roger Mata Lleonard<sup>1</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>2</sup>, José Ángel Martín-Prieto<sup>1,2</sup>, Joan Manel Vilaplana<sup>3</sup> y Bernadí Gelabert Ferrer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> QU4TRE, consultoria ambiental C/ Carritxaret 18-6, es Migjorn Gran, 07749 Menorca.

\* Corresponding author: xiscoroig@gmail.com

<sup>2</sup> Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa, km 7,5, Palma de Mallorca

<sup>3</sup> Grup RISKINAT; Dpto. de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà; Facultat de Ciències de la Terra; Universitat de Barcelona; Martí i Franquès s/n 08028 Barcelona

**Abstract:** *The SE coast of Minorca is the section where the tsunamis from Algeria have been impacted. As a result of their impact, they have left behind isolated boulders and strings of boulders of metric size with sedimentary characteristics typical of tsunami flows. The morphology, morphometry, orientation and imbrication of these boulder fields constitute a characteristic geomorphological feature of the impact of the tsunami on the rocky coastline of the Balearic Islands. Due to their high scientific interest two sites are proposed as Geosites on the island of Minorca, because they have high scientific, tourist and educational interest as representative examples of tsunami boulders on the rocky coastlines of the western Mediterranean.*

**Key-words:** *Geosites, tsunamis, boulders, Minorca.*

**Resumen:** *La costa SE de Menorca es el tramo donde han impactado los tsunamis procedentes de Argelia, dejando como testimonio de su impacto bloques aislados y cordones de bloques de dimensión métrica, con unas características sedimentarias propias de flujos de tsunami. La morfología, morfometría, orientación e imbricación de estos campos de bloques constituyen un rasgo geomorfológico característico del impacto de tsunami en la costa rocosa de las islas Baleares. Por su elevado interés científico se proponen dos emplazamientos como Lugar de Interés Geológico en la isla de Menorca, ya que presentan elevado interés científico, turístico y didáctico como ejemplos representativos de bloques de tsunamis en las costas rocosas del mediterráneo occidental.*

**Palabras clave:** *Lugares de Interés Geológico, tsunamis, bloques, Menorca.*

Roig-Munar, F.X., Mata Lleonard, R., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M. y Gelabert Ferrer, B. (2017): Propuesta de Lugares de Interés Geológico asociados a bloques y cordones de origen tsunamítico en la costa SE de Menorca (Balears). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1): 31-40.

Los ejemplos documentados de bloques desplazados por tsunamis históricos son numerosos en el Mediterráneo (Scicchitano *et al.*, 2007; Maouche *et al.*, 2009; Goto *et al.*, 2009; Furlani *et al.*, 2014; Roig-Munar *et al.*, 2014; Biolchi *et al.*, 2015; Roig-Munar, 2016). Diversos bloques aislados y acumulaciones de bloques en forma de cordones asociados a costas rocosas han sido interpretados como restos de los tsunamis registrados a lo largo de los últimos siglos (Kelletat y

Schellmann, 2002, Kelletat *et al.*, 2005, Mastronuzzi *et al.*, 2007; Maouche *et al.*, 2009; Pignatelli *et al.*, 2009; Roig-Munar *et al.*, 2015). Se trata de bloques de orden métrico que fueron arrancados del borde del acantilado o de la playa y transportados tierra adentro, presentando unas características geomorfológicas como su orientación e imbricación que permiten diferenciarlos de otros ambientes sedimentarios (Browne, 2011; Weiss, 2012; Scheffers y Kinis, 2014; Roig-



Munar, 2016). Estos depósitos se localizan en plataformas litorales con escasos procesos erosivos y sedimentarios que permiten su conservación (Roig-Munar *et al.*, 2015).

En las islas Baleares estos bloques se encuentran mayoritariamente sobre terrazas rocosas litorales del SE de las islas, algunos situados por encima del oleaje máximo registrado y a grandes distancias de la cornisa del acantilado, descartándose relieves que puedan explicar su emplazamiento por caídas gravitacionales o bien erosiones diferenciales. Ocasionalmente los bloques de tsunami sobre acantilados bajos y cercanos a la línea de costa han sido retrabajados por el oleaje, sin que estos pierdan su características morfológicas de estratificación, imbricación y orientación propias de eventos de tsunamis (Browne, 2011; Scheffers y Kinis, 2014; Roig-Munar, 2016). La presencia de bloques en las costas rocosas de las islas Baleares ha sido estudiada por Bartel y Kelletat (2003), Kelletat *et al.* (2005) y por Scheffers y Kelletat (2003) en algunas áreas de Mallorca, relacionando su presencia en la plataformas con procesos mixtos de oleaje y tsunamis y estableciendo ecuaciones simples para discernir los bloques desplazados por un proceso u otro. Posteriormente Gómez-Pujol y Roig-Munar (2013) realizaron una primera aproximación del origen de los bloques en la costa S de Menorca. Roig-Munar *et al.* (2014, 2015) analizaron bloques en las costas de Menorca y Mallorca, para ampliarlo al resto de las costas de las islas Baleares (Roig-Munar, 2016), aplicando diferentes ecuaciones para distinguir entre los bloques asociados a las tormentas y los bloques asociados a tsunamis (Nott, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009; Barbano *et al.*, 2010; Engel y May, 2012; Roig-Munar *et al.*, 2015), y la relación de estos últimos con trayectorias de tsunamis provenientes del N de África.

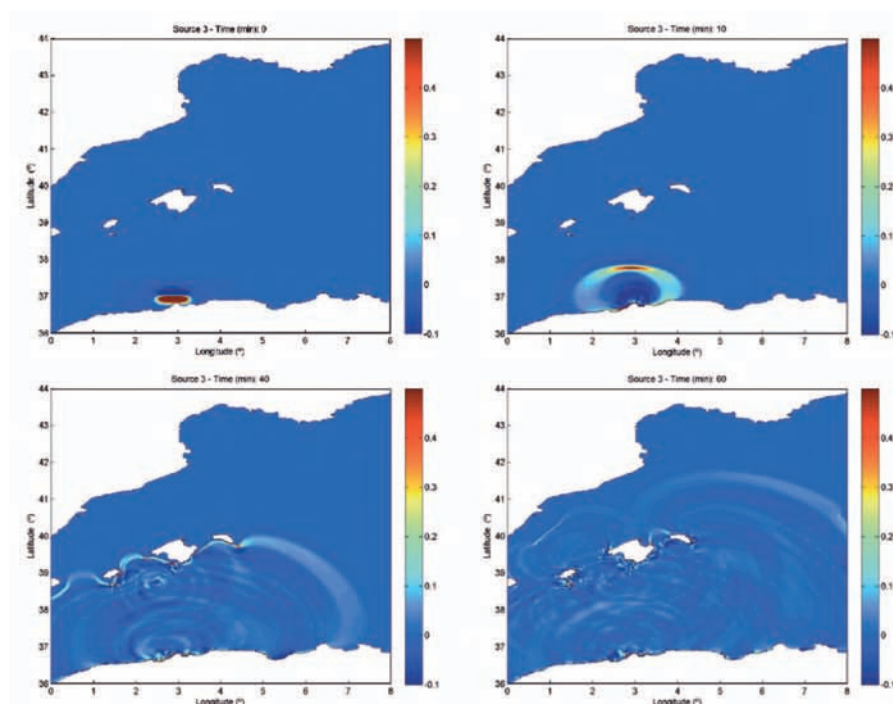
### Marco geológico

La sismicidad histórica e instrumental indica que el N de Argelia está expuesto a peligros y riesgo sísmico relevantes.

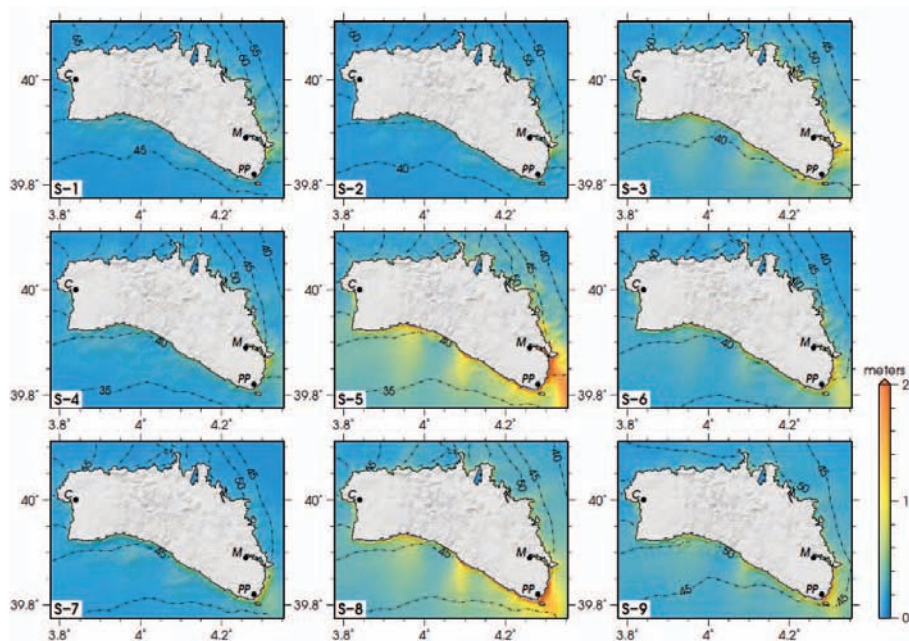
El 10 de octubre de 1980 tuvo lugar el terremoto de Al-Asnam, con una magnitud de 7,3. El último evento sísmico registrado fue el de Zemmouri del 21 de mayo de 2003, con una magnitud de 6,9. Este terremoto fue generado por una falla inversa, dando lugar a una deformación significativa del fondo marino, responsable del tsunami que se observó en Argelia y España y llegó a las costas de Francia e Italia. Las olas máximas registradas fueron de 2 m en las islas Baleares, con daños materiales en algunos puertos de Mallorca, Menorca e Ibiza. Las simulaciones de este tsunami realizadas por varios autores (Hébert y Alasset, 2003; Alasset *et al.*, 2006) demuestran el impacto directo en las costas baleares. Álvarez-Gómez *et al.* (2010) realizaron una modelización de la propagación del tsunami hacia el N (Fig. 1) en el que concluían que, debido a los cambios de batimetría, y sobre todo debido a la existencia de una pronunciada pendiente en la plataforma continental de las islas Baleares, la ola del tsunami sufre una importante refracción en el cambio de las direcciones de onda creándose trayectorias perpendiculares a la plataforma continental. Posteriormente Álvarez-Gómez *et al.* (2011) modelizaron los posibles tsunamis generados por fuentes cercanas a las islas Baleares, con el objetivo de identificar las áreas donde el impacto es mayor. Álvarez-Gómez *et al.* (2011) elaboraron un mapa de 9 fuentes tsunámicas, que representan fallas inversas con bajo ángulo de buzamiento hacia el S y SE, y capaces de generar terremotos de intensidad 7,3. El tsunami generado por estas fuentes llegaría en 30 minutos a Formentera, la isla balear más cercana a la costa de Argelia, y el tiempo de llegada hasta Menorca, la isla más lejana, sería de aproximadamente 45 minutos (Roger y Hébert, 2008).

En los modelos de Álvarez-Gómez *et al.* (2011) las fuentes que presentan la mayor amenaza para las islas Baleares son las denominadas S-3, S-5, S-6 y S-8. En general estas fuentes pueden plantear una amenaza significativa a las islas de Ibiza y Menorca, con elevaciones de ola máxima superiores a 2 m (localmente incluso superiores a 4 m; Fig. 2).

De todas las fuentes tsunámicas definidas, las S-5 y S-8 son las responsables de la creación de los tsunamis más peligrosos para la isla de Menorca. En general, el borde suroriental de Menorca es el área más afectada por todos los tsunamis modelizados. Además de las fuentes S-5 y S-8, hay otras que generan tsunamis con la máxima elevación de onda superior a 1 m: las fuentes S-3, S-6, S-8 y S-9 generan elevaciones máximas de onda significativas, afectando a la costa situada entre Mahón y Punta Prima, sobre todo con las fuentes S-3, S-5 y S-8, y con es-



**Fig. 1.-** Modelización de las fuentes tsunámicas del N de Argelia y el efecto de escudo de las islas Baleares frente a la península Ibérica. Fuente: Álvarez-Gómez *et al.* (2010).



**Fig. 2.-** Mapas de elevación de ola máxima y tiempos estimados (en minutos) de propagación del tsunami en la isla de Menorca según las 9 fuentes tsunámicas definidas (S-1 a S-9) por Álvarez-Gómez *et al.* (2011). Localidades de referencia: M, Mahón; PP, Punta Prima; C, Ciudadela. Fuente: Álvarez-Gómez *et al.* (2011).

Menorca presenta un clima marítimo caracterizado por altura de ola significativa entre 0,5 y 1,5 m, con períodos de máximos asociados de 5 a 7 s, y con una componente dominante de SW, seguida de una ESE y con un régimen extremo que ofrece probabilidades del 90% para eventos anuales de 5 m de altura de ola significativa, y para períodos de recurrencia de 20 y 50 años de 7,8 y 8,3 m respectivamente.

pecial incidencia en la Cala San Esteve y Alcarfar (Fig. 2). En cuanto al tiempo de viaje del tsunami en todos los casos es entre 40 y 45 minutos, tomando aproximadamente 20-25 minutos para llegar a la parte N de la isla ya con menor intensidad, como se observa en la fuente S-5.

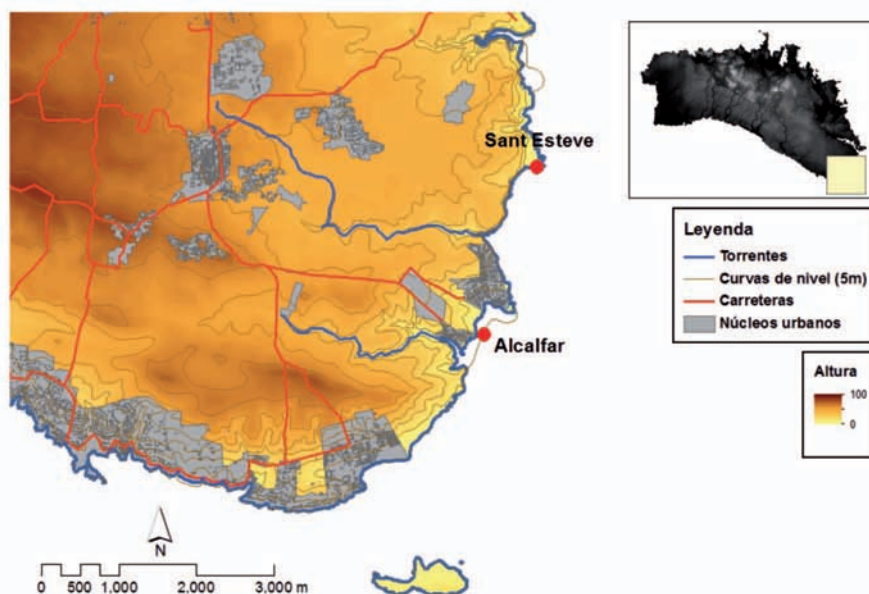
Los valores extremos de los últimos 50 años de período de retorno presentan niveles de alrededor de 11 m en el sector N de Baleares y en torno a 8,5 m en el SE de Menorca (Cañellas *et al.*, 2007).

### Área de estudio

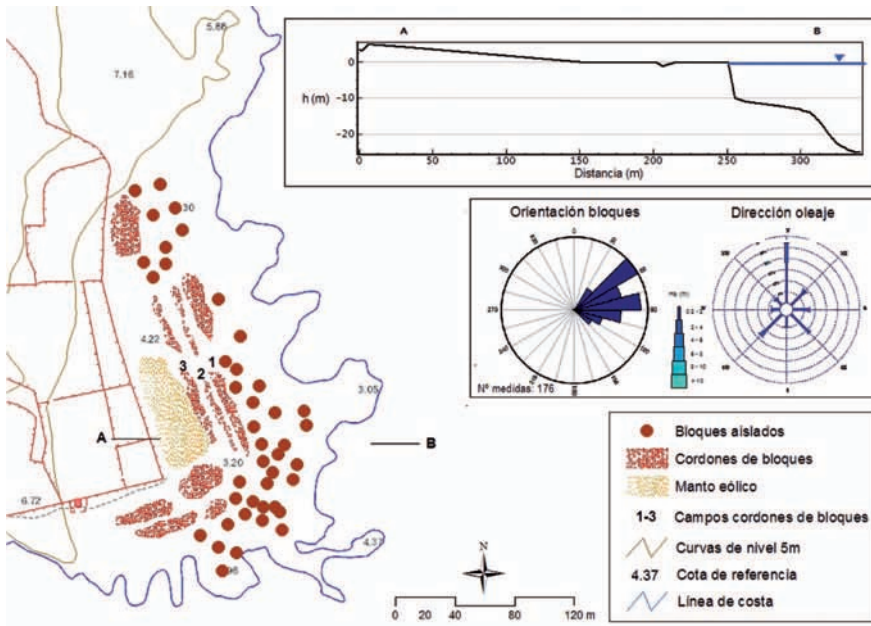
El área de estudio se localiza al SE de la isla de Menorca, la más oriental de las islas Baleares, en concreto en Sant Esteve y Alcarfar (Fig. 3). La región meridional de la isla está formada por una plataforma tabular de calcarenitas y calcilitas miocenas en la que se diferencian tres grandes unidades: una zona central, más elevada y flanqueada por dos áreas de menores alturas. Tal disposición responde a un anticlinal laxo que define la estructura de la mitad meridional de la isla, el Migjorn (Gelabert *et al.*, 2005).

La costa es acantilada y rectilínea, con articulaciones asociadas a calas y presenta elevaciones medias de 35 m en su parte central que disminuyen hacia los extremos oriental y occidental. Según Álvarez-Gómez *et al.* (2011) sólo las fuentes sísmicas en el N de Argelia son capaces de generar tsunamis que afecten a Baleares (Fig. 1) con una direccionalidad de propagación distinta por cada fuente, estando Menorca especialmente afectada por las trayectorias de dirección NNW- SSE.

Los depósitos de bloques ubicados sobre acantilados de la costa SE de Menorca fueron analizados morfométricamente por Roig-Munar *et al.* (2014), caracterizando 1042 bloques situados sobre las terrazas litorales de 6 áreas de estudio, posteriormente ampliadas a 8 áreas y 1762 bloques analizados (Roig-Munar, 2016). En las zonas de estudio de Sant Esteve y Alcarfar se han analizado morfométricamente 586 bloques: 218 en Sant Esteve (Fig. 4) y 368 en Alcarfar (Fig. 5). Estas dos áreas destacan por presentar bloques de orden métrico a una distancia y altura superiores a la influencia del oleaje de temporales. En concreto, se reconocen tanto bloques aislados, como agrupaciones de bloques imbricados con morfología de



**Fig. 3.-** Áreas de estudio de Sant Esteve y Alcarfar ubicadas al SE de Menorca analizadas en esta propuesta de Lugares de Interés Geológico (LIG).



**Fig. 4.-** Cartografía geomorfológica del área de Sant Esteve, con el perfil topográfico del área en el transecto A-B, rosas de los vientos del oleaje dominante (derecha) y orientación dominante de bloques (izquierda).

sodios de deposición de gran energía. El perfil de esta área es bajo, inferior a 1,5 m de altura, y presenta una plataforma de deposición de bloques con marcas puntuales de impactos recientes de orden centimétrico que indican cierto retrabajamiento de los cordones. Observamos que el oleaje dominante es de N, mientras que la dirección dominante de los bloques imbricados analizados es de 184°, con dirección SW hacia tierra, claro

reflejo del flujo del tsunami que actuó sobre esta área, por tanto no relacionado con el oleaje. En la Figura 5A observamos un bloque de grandes dimensiones de origen sumergido que fue datado mediante radiocarbono, tomando muestras de fauna marina endolítica presente en el bloque, y obteniendo una edad del bloque de 1720 AD. Paralelamente estos bloques han sido datados mediante tasas de disolución de carbonatos (Roig-Munar *et al.*, 2015), midiendo su incisión de morfologías de *basin pools*, con una edad estimada de 1794 para los bloques ubicados en cordones (Fig. 5B). Estos cordones se encuentran sobre una antigua explotación de eolianitas que fue utilizada entre 1720 y 1726 (Fornals, 1993). Estas dataciones obtenidas mediante diferentes técnicas presentan una coetaneidad con las fuentes documentales de tsunamis registrado en 1756 (Fontseré, 1918) en el municipio de Santanyí (Mallorca), ubicado en la costa SE que se encuentra afectada por las mismas trayectorias que afectan la costa SE de Menorca.

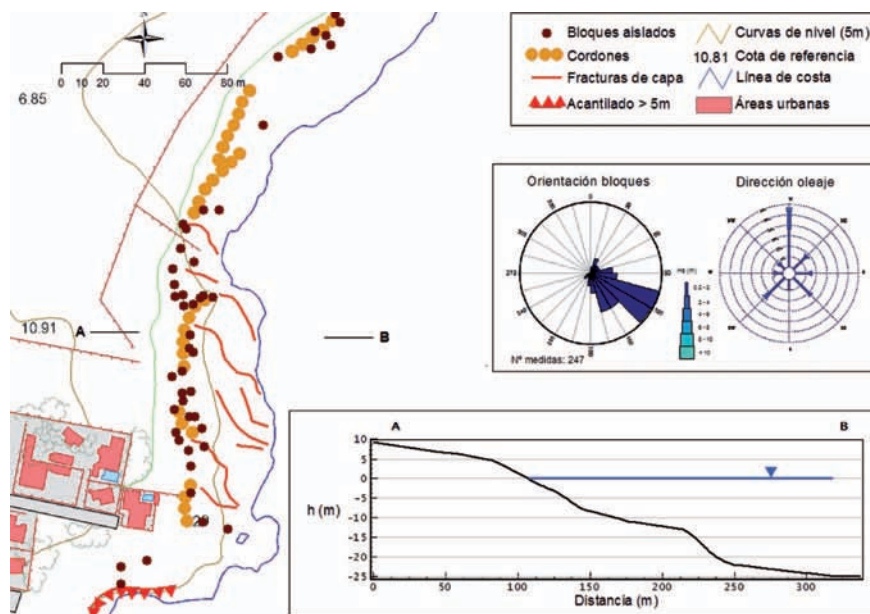
cordones. Estos cordones están asociados a diferentes terrazas de denudación, conformándose como sus áreas fuente por el progresivo desmonte de sus cornisas tierra adentro. Las dos áreas han sido caracterizadas morfológicamente y presentan dos tipologías de perfiles cada una. Un perfil asociado a terrazas litorales con alturas inferiores a 1,5 m s.n.m. que incluyen cordones de bloques imbricados con procesos de retrabajamiento esporádicos por oleaje, y perfiles superiores a 5 m s.n.m con bloques de grandes dimensiones y elevados grados de inclinación e imbricación. A cada bloque se han aplicado las ecuaciones de Engel y May (2012), obteniendo los valores de columna de agua sobre el bloque en casos de tormenta ( $H_s$ ) y de tsunami ( $H_t$ ) necesaria para su desplazamiento de bloques bajo dos supuestos, bloques subaéreos y bloques delimitados por juntas. Al resultado de estas ecuaciones se le añade la altura del acantilado en su cornisa (Roig-Munar *et al.*, 2015) obteniendo las columnas de agua necesarias para el desplazamiento de cada bloque bajo estos dos supuestos.

Respecto al área de Alcafar (Fig. 6), la cartografía geomorfológica refleja la presencia de diferentes campos de cordones de bloques imbricados, hasta 2 cordones, ubicados en cotas inferiores y que representan dos episodios de deposición



**Fig. 5.-** Área de estudio de Sant Esteve: A) Bloque de grandes dimensiones de origen sumergido y datado mediante radiocarbono en el año 1720 AD; B) Presencia de cordones de bloques imbricados superpuestos sobre canteras de eolianitas explotadas entre 1720 y 1726.

**Fig. 6.-** Cartografía geomorfológica del área de Alcafár, con el perfil topográfico del área en el transecto A-B, rosas de lo vientos del oleaje dominante (derecha) y orientación dominante de bloques (izquierda).



de gran energía. El perfil de esta área es medio y de baja pendiente, donde no se observan marcas de impactos recientes que indiquen re-trabajamiento de cordones ni de bloques aislados. Observamos que el oleaje dominante es de componente N, mientras que la dirección dominante de los bloques analizados es de  $117^\circ$ , por tanto con una dirección dominante hacia tierra de SW, que refleja el flujo del tsunami, no relacionado con las olas dominantes actuales, ni tampoco con la dirección observada anteriormente. En la Figura 7A observamos la sucesión de denudación de terrazas litorales tierra adentro, con una relación de su potencia y el eje corto de los bloques depositados. En la Figura 7B observamos cordones de bloques imbricados a distancias superiores a 60 m de la línea de costa y alturas de 7,5 m s.n.m. Las dataciones obtenidas mediante tasas de disolución de *cocons* nos da una datación estimada de 1796 AD, datación similar a la obtenida en Sant Esteve y que se correlaciona con el evento registrado en 1756 en Santanyí.

Los valores estimados de columna de agua para el arranque de bloques correspondientes a rocas calcáreas del Mioceno, con una densidad de 2,40, en caso de tormentas (Hs) y de tsunamis (Ht) se pueden apreciar en la Tabla I, siendo los valores de columna de agua para el arranque de bloques de Hs: 13,92 y Ht: 6,86 en el caso de Alcafár, y de Hs: 9,70 y Ht: 2,8 en el caso de Sant Esteve. Los valores estimados en el caso de la columna de agua para el desplazamiento de bloques subaéreos en caso de tormentas (Hs) y en caso de tsunamis (Ht) dan valores de alturas de ola de Hs: 7,85 y Ht: 5,34 en el caso de Alcafár, y de Hs: 5,04 y Ht: 1,63 en el caso de Sant Esteve.

Los depósitos analizados muestran bloques bien imbricados, especialmente con sus ejes orientados hacia el mar (ver Figs. 4 y 5), de modo que el sentido del flujo sería tierra adentro (*e.g.*, Switzer y Burston, 2010), coincidiendo con la dirección de flujos de tsunami definidos por Álvarez-Gómez *et al.* (2011) y ajustándose a los criterios de Williams y Hall (2004), que argumentan que este tipo de organización de bloques se atribuye a eventos como tsunamis. Así pues, los bloques muestran la evidencia de eventos de grandes flujos asociados a tsunamis (Roig-Munar *et al.*, 2014, 2015), proporcionando evidencias convincentes de eventos individuales o múltiples sobre la misma área (Roig-Munar, 2016), con una clara correlación con los modelos de propagación de tsunamis y avalado con la aplicación de las ecuaciones de columnas de agua necesaria para el transporte y arranque de bloques.

## Metodología

La Ley de Patrimonio Natural y Biodiversidad (Ley 42/2007 de 13 de diciembre, modificada por la Ley 33/2015 de Patrimonio Natural y Biodiversidad) introduce por pri-



**Fig. 7.-** Área de estudio de Alcafár: A) Áreas de arranque de bloques asociados a las cornisas y a diferentes terrazas de denudación; B) Bloques imbricados de grandes dimensiones a 60 m de la línea de costa y a 8 m s.n.m.



	Bloques arrancados		Desplazamientos de bloques	
	Hs	Ht	Hs	Ht
Alcalfar	13,92	6,86	7,85	5,34
Sant Esteve	9,70	2,8	5,04	1,63

**Tabla I.-** Altura de la columna de agua necesaria para el arranque y desplazamiento de bloques en caso de olas de tormentas (Hs) y de tsunamis (Ht) en cada una de las áreas analizadas.

mera vez en la legislación española la geodiversidad y el patrimonio geológico, así como la necesidad de trabajar en pro de su conservación. El texto señala a las administraciones públicas como responsables del conocimiento y protección del patrimonio geológico, lo que implica la elaboración de inventarios de Lugares de Interés Geológico (LIG) (García-Cortés *et al.*, 2014). En las islas Baleares hay actualmente 109 LIG, 34 de ellos en la isla de Menorca, según los datos del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG) y el Inventario de Patrimonio Geológico de Menorca. En la realización de inventarios de patrimonio geológico se recomiendan que estén abiertos y sujetos a cambios futuros que permitan la incorporación de nuevos LIG que surgirán por el avance de la ciencia básica e incluso la eliminación de LIG por su destrucción o por la pérdida irremediable de su valor geológico contemplado como LIG (Carcavilla *et al.*, 2007).

En este trabajo se propone dos nuevos LIG del inventario de la provincia de las islas Baleares, analizando la idoneidad para considerar LIG los bloques de tsunami de las localidades de Sant Esteve y Alcalfar (Fig. 3). Se describen las características generales, el tipo de interés y uso al que están enfocados (científico, didáctico y turístico/recreativo), así como la valoración de su fragilidad y las amenazas externas a las que están sometidas estas dos áreas. El método de trabajo utilizado se ha centrado en la caracterización de los puntos propuestos a partir de las recomendaciones y las directrices metodológicas establecidas en el IELIG (García-Cortés *et al.*, 2014), valorando la potencialidad de uso, así como una estimación de su vulnerabilidad y las amenazas externas para cada uno de ellos. Esta valoración se resume en la Tabla II, que se ha elaborado siguiendo los parámetros de valoración simplificados propuestos por Alcalá (2002) y Puiguriguer *et al.* (2004).

La metodología expuesta en la Tabla II toma en consideración aquellos valores que permiten dar un valor geológico al espacio propuesto, haciendo especial énfasis en valores como su singularidad, el contexto geológico y su nivel de conocimiento científico. Estos tres campos son valorados en cuanto a su potencialidad de interés científico, didáctico y turístico. Como consideraciones finales cabe destacar los riesgos de degradación que pueden afectar al yacimiento analizado.

Los parámetros de valoración se cuantifican con la escala 1- nulo o muy bajo, 2- bajo, 3- medio, 4- alto, 5- muy alto. El valor geológico es el de mayor peso, ya que se pondera multiplicando por 1,5, e incluye los parámetros de singularidad (en este caso la escala regional se refiere al ámbito de las islas Baleares), el contexto geológico y su nivel de conocimiento científico. Para esto parámetros los LIG propuestos obtienen

valores altos o muy altos. En cuanto a la potencialidad se obtiene 5 y respecto al riesgo de degradación se obtiene un valor 1. El valor patrimonial finalmente obtenido para Alcalfar y Sant Esteve es alto, en concreto 4,08 y 4,36, respectivamente.

### Propuesta de LIG

De acuerdo con la Ley 42/2007 y su modificación 33/2015, se considera patrimonio geológico el conjunto de recursos naturales geológicos de valor científico, cultural y/o educativo, que sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, minerales, rocas, meteoritos, fósiles, suelos y otras manifestaciones geológicas que permitan conocer, estudiar e interpretar: a) el origen y la 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 la evolución de la vida. Los testimonios de estos procesos son tanto los materiales rocosos, como sus estructuras y disposición en el medio natural. La relevancia de los LIG propuestos en el presente trabajo radica en que constituyen la manifestación inequívoca de procesos tsunamíticos que han afectado a las islas Baleares en los últimos tres siglos y donde por primera vez los bloques se han caracterizado como un nuevo tipo de depósito sedimentario no descrito anteriormente como tal (Roig-Munar *et al.*, 2015; Roig-Munar, 2016). Los parámetros de valoración de los LIG y clase de valor al que corresponden, se han obtenido aplicando la metodología propuesta a los LIG definidos en el Anejo II de García-Cortés *et al.* (2014). De la valoración metodológica se han obtenido los siguientes valores para cada LIG propuesto (Tabla III).

#### Alcalfar

**Interés:** En la Tabla III se detalla la valoración de los parámetros empleados para caracterizar el interés científico, didáctico y turístico de esta área (Fig. 4). De todos los valores el más sobresaliente es el científico con 285 puntos. Al obtenerse un valor superior a 267 debe considerarse como un lugar de interés muy alto, y debería quedar recogido en cualquier inventario de LIG. Por otro lado, el valor didáctico debe considerarse muy alto dado que el valor obtenido, 275, es superior a 266. Los depósitos representan un buen ejemplo de bloques asociados a tsunamis, con desmantelamiento de áreas fuente bien definidas e imbricaciones características de estos procesos.

**Fragilidad:** Es un área de una fragilidad media, con 200 puntos. Ello implica que constituye un elemento natural relativamente frágil poco expuesto a su alteración o destrucción por acciones antrópicas o naturales, a consecuencia principalmente de que se encuentra dentro de una zona protegida.

**Amenazas:** El valor estimado para las amenazas externas es de 250 puntos (Tabla III), dado que constituyen elementos expuestos a la posible afectación antrópica asociada a un uso público de espacios litorales, especialmente aquellas asociadas a posible destrucción de *basin pools*.

**Prioridad de protección global:** La prioridad de protección global es elevada, de 57 puntos, y por ello se propone poner en valor este espacio como LIG para su conservación con la señalización del punto dando a conocer su valor cien-

Valor geológico	1	2	3	4	5	Alcalfar 6,5	St Esteve 7
<b>Singularidad</b>	hay muchos más a escala regional	hay algunos a escala regional	hay muy pocos a escala regional	hay muy pocos a escala regional pero es el mejor	único a escala regional	4	5
<b>Contexto geológico</b>	descontextualizado	afloramiento aislado	afloramiento representativo	afloramiento representativo o estratotipo	clave para la comprensión de la geología regional	5	5
<b>Nivel de conocimiento</b>	ninguna publicación	publicaciones poco importantes	algunas publicaciones y conocimiento universitario	varias publicaciones y conocimiento a nivel estatal	muchas publicaciones y conocimiento a nivel internacional	4	4
<b>Potencialidad</b>						<b>4</b>	<b>4,33</b>
<b>Interés didáctico</b>	No	se ve el afloramiento	se ve el afloramiento y estructuras de detalle	se ve el afloramiento y estructuras de detalle y procesos	se ve el afloramiento y estructuras de detalle y procesos, y está acondicionado	3	3
<b>Interés científico</b>	No	muestra algún carácter de interés	permite reconocer e identificar algunos elementos de la geología	permite interpretar la historia y los procesos de la geología	permite interpretar y comparar la historia y los procesos de la geología con otras zonas	5	5
<b>Interés turístico-cultural</b>	No	a nivel de especialistas	turismo científico	visita instructiva	visita instructiva	4	5
<b>Riesgo de degradación</b>						<b>1,75</b>	<b>1,75</b>
<b>Extensión</b>	>100 m	100-51 m	51-11 m	10-5 m	<5 m	1	1
<b>Accesibilidad</b>	sin localizar	inaccesible	difícil acceso	accesible	occurrido	4	4
<b>Edificaciones</b>	lejanas	proyectadas	ocasionales	varias	afectación	1	1
<b>Minería</b>	lejanas	proyectadas	ocasionales	varias	afectación	1	1
<b>Vías de comunicación</b>	lejanas	proyectadas	ocasionales	varias	afectación	1	1
<b>Vertederos</b>	lejanas	proyectadas	ocasionales	varias	afectación	1	1
<b>Expoliación</b>	nunca	anterior a 1990	eventual	frecuente	frecuente	2	1
<b>Erosión</b>	No	riesgo futuro	activa y dévil	activa y moderada	activa y severa	3	4
<b>Valor patrimonial</b>						<b>4,08</b>	<b>4,36</b>

**Tabla II.-** Valoración simplificada del valor patrimonial de los LIG propuestos, siguiendo parámetros de valoración similares a los de Puiguirguer *et al.* (2004).

tífico, didáctico y cultural con el fin de evitar el desarrollo de actividades destructivas o de espolio en su entorno, aunque en este caso es difícil la espoliación de elementos por su tipología, magnitud, peso y acceso.

De acuerdo con la Tabla II, se considera este punto no solo como un posible LIG sino también como un elemento del Patrimonio Geológico de la isla de Mallorca, dado que su valor patrimonial es de 4,08 sobre 5. Específicamente su valor geológico en referencia a la singularidad reside en la existencia de pocos elementos a escala regional, siendo uno de los mejores ejemplos por su gran potencial científico y didáctico ya que permite interpretar y comparar la historia y los procesos de la geología y geomorfología litoral con otras zonas.

#### *Sant Esteve*

**Interés:** En la Tabla III se detalla la valoración de los parámetros empleados para caracterizar el interés científico, didáctico y turístico de esta área. De todos ellos, el más sobresaliente es el científico con 315 puntos, lo que implica que se trata de un área con un interés muy alto, especialmente porque representa una sucesión de cordones de bloques imbricados y bloques aislados que informan de diferentes eventos tsunamíticos de gran energía y de retrabajamiento de bloques de primera línea por eventos de temporales.

**Fragilidad:** Es un área de una fragilidad media, con 160 puntos (Tabla III), lo que implica que constituye un elemento natural poco expuesto a la destrucción antrópica pero si a la

Vacimient	Alcalfar Puntos	St Esteve Puntos	Alcalfar VC	St Esteve VC	Alcalfar VD	St Esteve VD	Alcalfar VT	St Esteve VT	Alcalfar Fic	St Esteve Fic	Alcalfar Ffid	St Esteve Ffid	Alcalfar Fis	St Esteve Fis	Alcalfar Fit	St Esteve+Al:053 Fit
Representatividad	4	4	30	30	5	5			120	120	20	20	20	20	0	0
Cracter de localidqad tipo	1	1	10	10	5	5			10	10	5	5	5	5	0	0
Grado de conocimiento científico del lugar	2	4	15	15	0	0			60	60	0	0	0	0	0	0
Estado de conservación	2	4	10	10	5	5			20	40	10	20	20	20	0	0
Condiciones de conservación	4	4	10	10	5	5	5	5	40	40	20	20	20	20	20	20
Rareza	1	1	15	15	5	5			15	15	5	5	5	5	0	0
Diversidad	2	3	10	10	10	10			20	30	10	30	30	30	0	0
Contenido didáctico	2	2			20	20			0	0	40	40	40	40	0	0
Infraestructura logística	4	4			10	10	5	5	0	0	60	60	60	60	20	20
Densidad de población	1	1			5	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	5
Accesibilidad	4	4	0	0	15	15	10	10	0	0	60	60	0	0	40	40
Tamaño del LIG	2	2			0	0	15	15	0	0	0	0	0	0	30	30
Asociación con otros elementos de PN y/o PC	4	4	5	5	5	5	5	5	0	0	20	20	20	20	20	20
Espectacularidad o belleza	2	2			5	5	20	20	0	0	10	10	10	10	40	40
Contenido divulgativo	2	2					15	15	0	0	0	0	0	0	30	30
Potencialidad para realizar actividades turísticas y recreativas	2	2					5	5	0	0	0	0	0	0	10	10
Proximidad a zonas recreativas (demanda potencial inmediata)	4	2					5	5	0	0	0	0	0	0	20	10
Entorno socioeconómico	2	2	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	20	20
<b>TOTAL</b>	<b>47</b>	<b>44</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>285</b>	<b>315</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>235</b>	<b>255</b>	<b>205</b>	<b>205</b>
<b>Criterio</b>	<b>Puntos</b>	<b>Puntos</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>lt</b>	<b>lt</b>	<b>lt</b>	<b>lt</b>	<b>lt</b>	<b>lt</b>	<b>lt</b>	<b>lt</b>
Tamaño del LIG	2	1	40	40	80	40										
Vulnerabilidad al expolio	0	0	30	30	0	0										
Amenazas naturales	4	4	30	30	120	120										
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>160</b>										
<b>Criterio</b>	<b>Puntos</b>	<b>Puntos</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso</b>	<b>A</b>	<b>A</b>										
Amenazas antrópicas	2	0	20	20	40	0										
Interés para la explotación minera	0	2	15	15	0	30										
Régimen de protección del lugar	2	4	15	15	30	60										
Protección física o indirecta	4	0	15	15	60	0										
Accesibilidad	4	4	15	15	60	60										
Régimen de propiedad del lugar	4	0	10	10	40	0										
Densidad de población	0	1	5	5	0	5										
Proximidad a zonas recreativas	4	4	5	5	20	20										
<b>VALORACIÓN FINAL</b> calor máximo 400	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>250</b>	<b>175</b>										
Interés científico del LIG -Ic-	285	315														
Interés didáctico del LIG -Id-	275	235														
Interés turístico del LIG -It-	255	205														
Fragilidad del LIG -F-	200	160														
Vulnerabilidad por amenazas antrópicas sobre el LIG -A-	175															
Susceptibilidad de degradación del LIG (SD= (F x A) x 1/400)	125	70														
Prioridad de protección por su interés científico (PPC=IcE2 x SD x 1/400E2)	63,46	43,41														
Prioridad de protección por su interés didáctico (PPD=IcE2 x SD x 1/400E2)	59,08	24,16														
Prioridad de protección por su interés turístico-recreativo -PPt-	50,80	18,39														
Prioridad de protección global (PP=[(Ic+Id+It) / 3] x SD x 1/4002)	57,66	27,71														

**Tabla III.-** Valoración de interés científico (VEC), didáctico (VD) y turístico (VT) de un LIG de acuerdo con la metodología del IELIG (García-Cortés *et al.*, 2014).



destrucción por futuros tsunamis que permitirán un nuevo registro sedimentario o la modificación del presente.

**Amenazas:** El valor estimado para las amenazas externas es de 175 puntos (Tabla III), un valor medio a bajo por lo que se considera que constituye un LIG poco expuesto a la afectación antrópica asociada a actividades de edificación o uso público de espacios litorales, debido a que se incluyen en un espacio protegido.

**Prioridad de protección global:** La prioridad de protección global es elevada, de 28, por lo que se propone poner en valor este espacio para su divulgación con la señalización del punto dando a conocer su valor científico, didáctico y cultural. No se considera necesario llevar a cabo medidas de protección estructural dado que su estado es bueno y se encuentra dentro una zona protegida, siendo el elemento más representativo y único dentro del complejo de bloques de tsunami y cordones imbricados retrabajados en las islas Baleares.

De acuerdo con la Tabla II se considera este punto no solo como un LIG potencial sino también como un elemento del Patrimonio Geológico de la Islas Baleares, dado que su valor patrimonial es de 4,36 sobre 5. Específicamente su valor geológico en referencia a la singularidad reside en que es único a escala regional y clave para la comprensión de la geología regional, presenta una gran potencial científico y didáctico, todo ello en cuanto permite interpretar y comparar la historia y los procesos de la geología con otras zonas, se identifica claramente y permite la realización de visitas instructivas y amenas. Además, la existencia de canteras abandonadas donde se emplazan los bloques es un criterio de datación visible *in situ* para el visitante.

## Conclusiones

Se proponen dos nuevos Lugares de Interés Geológico (LIG) para incluir en el inventario de Patrimonio Geológico de la isla de Menorca, comunidad autónoma de Illes Balears (Fig. 3), que se sitúan dentro del dominio geológico español de Baleares, y que son depósitos de bloques aislados de tsunamis y cordones imbricados de tsunamis en las áreas de Sant Esteve (Fig. 4) y Alcafar (Fig. 6), de interés geológico por su representatividad como bloques de grandes dimensiones asociados a las trayectorias de tsunamis procedentes del N de África.

Estos dos LIG propuestos tienen un alto valor científico puesto de manifiesto en estudios científicos puntuales (Roig-Munar *et al.*, 2014; Roig-Munar *et al.*, 2015; Roig-Munar, 2016) y no han sido explotados como yacimientos didácticos. Ninguno de los afloramientos presenta fragilidad alta ni amenazas antrópicas, excepto los fenómenos puntuales de carácter extraordinario asociados a tormentas, que producen la modificación de orden centimétrico de los bloques de carácter multianual en el caso de Sant Esteve, y que permite observar los cambios de orientaciones, que pueden desconfigurar el área para la creación de nuevos campos de bloques y nuevos cordones o retrabajamiento.

Los dos emplazamientos propuestos también cuentan con un gran valor didáctico y educativo, ya que pueden ayudar a explicar la evolución geológica del SE de Menorca, e ilustran acontecimientos geológicos (tsunamis) y las relaciones entre

las actividades antrópicas y los procesos geológicos, convirtiéndose estas áreas en un ejemplo de riesgo geológico asociado a las trayectorias de tsunamis procedentes de Argelia. Estos LIG pueden ayudar a aumentar la conciencia y la percepción de los riesgos geológicos de las poblaciones que se encuentran en costas afectadas por tsunamis que han tenido lugar en el pasado y que las modelizaciones establecen como puntos de impacto potencial. Esta característica de los LIG propuestos refuerza su carácter didáctico a toda la población local.

Además, los dos LIG propuestos constituirían los primeros LIG en campos de bloques de tsunami propuestos en el caso de la cuenca mediterránea española, y siguen el ejemplo de algunos trabajos recientes que proponen como LIG afloramientos de bloques de tsunamis en las costas italianas. Cortaza y Waele (2012) proponen 8 áreas LIG entre las que se encuentran bloques de tsunami. Magiotta y Sansò (2014) proponen en la región de Salento algunos LIG donde se encuentran bloques de tsunami con el objetivo de optar a la figura de Geoparque, y posteriormente Sansò *et al.* (2015) apuesta por estos LIG como producto turístico. Por último, se sugiere que, siguiendo esta metodología, sean valoradas otras localidades con afloramientos de bloques relacionados con tsunamis en las islas de Mallorca, Ibiza y Formentera, analizados en el trabajo de Roig-Munar (2016).

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer las correcciones y sugerencias realizadas por la Dra. Juana Vegas y por un revisor anónimo. Agradecer también a la editora de la revista, Beatriz Bádenas, ya que sus sugerencias finales han ayudado de forma considerable a la mejora de este trabajo.

## Referencias

- Alasset, J.P., Hébert, H., Maouche, S., Calbini, V. y 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.
- Alcalá, L. (2002): Valoración patrimonial de los yacimientos de vertebrados de la Fosa de Teruel. En: *El Patrimonio Paleontológico de Teruel*, (G. Meléndez y E. Peñalver, Eds). *Instituto de Estudios Turolenses, Teruel*, 227–242.
- Álvarez-Gómez, J.A., Olabarrieta, M., González, M., Otero, L., Carreño, E. y 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. y Otero, L. (2011): Tsunami hazard at the Western Mediterranean Spanish coast from seismic sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 227–240.
- Barbano, M.S., Pirrotta, C. y Gerardi, F. (2010): Large boulders along the south-eastern Ionian coast of Sicily: Storm or tsunami deposits? *Marine Geology*, 275: 140–154.
- Bartel, P. y Kelletat, D. (2003): Erster Nachweis holozäner Tsunamis im Westlichen Mittelmeergebiet (Mallorca, Spanien) mit einem Vergleich von Tsunamiund Sturmwellenwirkung auf Festgesteinsküsten. *Berichte aus dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Band 28*.
- Browne, A. (2011): *Coarse coastal deposits as palaeo-environmen-*

- tal archives for storms and tsunamis*. PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW. 277 p.
- Biolchi, S., Furlani, S., Antonioli, F., Baldassini, N., Causon De-guara, J., Devoto, S., Di Stefano, A., Evans, J., Gambin, T., Gauci, R., Mastronuzzi, G., Monaco, C. y 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.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F.J., Menéndez, M. y 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*, 50: 329–333.
- Carcavilla, L., López-Martínez, J. y 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, 360 p.
- Coratza, P. y de Waele, J. (2012): Geomorphosites and Natural Hazards: Teaching the Importance of Geomorphology in Society. *Geoheritage*, 4: 195–203.
- Engel, M. y 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.
- 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.
- Fornals, F. (1993): Fortificaciones de *Menorca: Fuerte Marlborough y Torre del Penjat*. *Museo Militar de Menorca*. Maó, 245 p.
- Furlani, S., Pappalardo, M., Gómez-Pujol, Ll. y Chelli, A. (2014): *The rock coast of the Mediterranean and Black seas*. *Geological Society, London*, 40: 89–123.
- García-Cortés, A., Carcavilla, L., Díaz-Martínez, E. y Vegas, J. (2014): Documento metodológico para la elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG). *Instituto Geológico y Minero de España*. 64 pp. (consultada día 15 de diciembre de 2016).
- Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo, J.E., Rosselló, V.M. y Segura, F.S. (2005): Structural controlled drainage basin development in the South of Menorca island (Spain). *Geomorphology*, 65: 139–155.
- Gómez-Pujol, Ll. y 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., Okada, K. y Imamura, F. (2009): Characteristics and hydrodynamics of boulders transported by storm waves at Kudaka Island, Japan. *Marine Geology*, 262: 14–24
- Hébert, H. y Alasset, P.J. (2003): The Tsunami Triggered by the 21 May 2003 Algiers Earthquake. *EMSC Newsletter, Centre Sismologique Euro-Méditerranéen*, 20: 10–12.
- Kelletat, D. y Schellmann, G. (2002): Tsunami in Cyprus field evidences and <sup>14</sup>C dating results. *Zeitschrift für Geomorphologie, NF, Supplement band*, 46 (1): 19–34.
- Kelletat, D., Whelan, F., Bartel, P. y Scheffers, A. (2005): New Tsunami evidences in Southern Spain Cabo de Trafalgar and Mallorca Island. En: *Geomorfología Litoral i Quarternari, Homenatge al professor Vincenç M. Rosselló i Verger* (E. Sanjaume y J.F. Mathieu, Eds.). Universitat de València, 215–222.
- Maoche, S., Morhange, C. y Meghraoui, M. (2009): Large Boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. *Marine Geology*, 262: 96–104.
- Margiotta, S. y Sansò, P. (2014). The Geological Heritage of Otranto–Leuca Coast (Salento, Italy). *Geoheritage*, 6: 305–316.
- Mastronuzzi, G., Pignatelli, C., Sanso, P. y Selli, 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.
- 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.
- Pignatelli, C., Sanso, P. y Mastronuzzi, G. (2009): Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260: 6–18.
- Puigurri Ferrando, M., Mata Leonart, R. y Mata-Perelló, J.M. (2004): Estudio geológico ambiental para la conservación y protección del paraje de Els Blaus (Esparreguera, Barcelona). En: *El patrimonio geológico: cultura, turismo y medio ambiente. Actas de la V Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico de la Sociedad Geológica de España*, (F. Guillén y A. del Ramo, Eds). Molina de Segura, 2001.
- Roger, J. y Hébert, H. (2008): The 1856 Djielli (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 morfomètrica. Tesis doctoral. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. 410 p.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vila-plana, J.M., Gelabert, B., Pons, G.X. y Mir-Gual, M. (2014): Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del sur de Mallorca (I. Balears). En: *Una aproximación multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico*, (Álvarez-Gómez, J.A. y Martín-González, F., Eds.). Segunda Reunión Ibérica sobre fallas activas y paleosismología, Lorca (Murcia, España), 109–102.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vila-plana, J.M. y Gelabert, B. (2015): Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). En: *VIII Jornadas de Geomorfología litoral*. (G. Málvarez et al., Eds). *Geo-Temas*, 15: 229–232.
- Sansò, P., Stefano Margiotta, S., Mastronuzzi, G. y Vitale, A. (2015): The Geological Heritage of Salento Leccese Area (Apulia, southern Italy). *Geoheritage*, 7: 85–101.
- Scheffers, A. y Kelletat, D. (2003): Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Reviews*, 63: 83–92.
- Scheffers, A.M. y Kinis, S. (2014): Stable imbrication and delicate/unstable settings in coastal boulder deposits: Indicators for tsunami dislocation?. *Quaternary International*, 332: 73–84.
- Scicchitano, G., Monaco, C. y Tortorici, L. (2007): Large Boulder deposits by tsunami along the Ionian coast of south-eastern Sicily (Italy). *Marine Geology*, 238: 75–91.
- Switzer, A.D. y Burston, J.M. (2010): Competing mechanisms for boulder deposition on the southeast Australian coast. *Geomorphology*, 114: 42–54.
- Weiss, R. (2012): The mystery of boulders moved by tsunamis and storms. *Marine Geology*, 295-298: 28–33.
- Williams, D. M. y Hall, A.M. (2004): Cliff-top megaclast deposit of Ireland, a record of extreme waves in the North Atlantic-storms or tsunamis? *Marine Geology*, 206: 101–117.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 5-7-2016

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 20-12-2016

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 20-12-2016