



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-Munar¹, José Ángel Martín-Prieto^{1,2}, Antonio Rodríguez-Perea², Bernadí Gelabert³, Joan Manuel Vilaplana⁴ y Carla Garcia-Lozano⁵

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

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

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

⁴ Dpto. de Geodinámica y Geofísica, Grupo RISK NAT, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona, nue.vilaplana@ub.edu

⁵ 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.

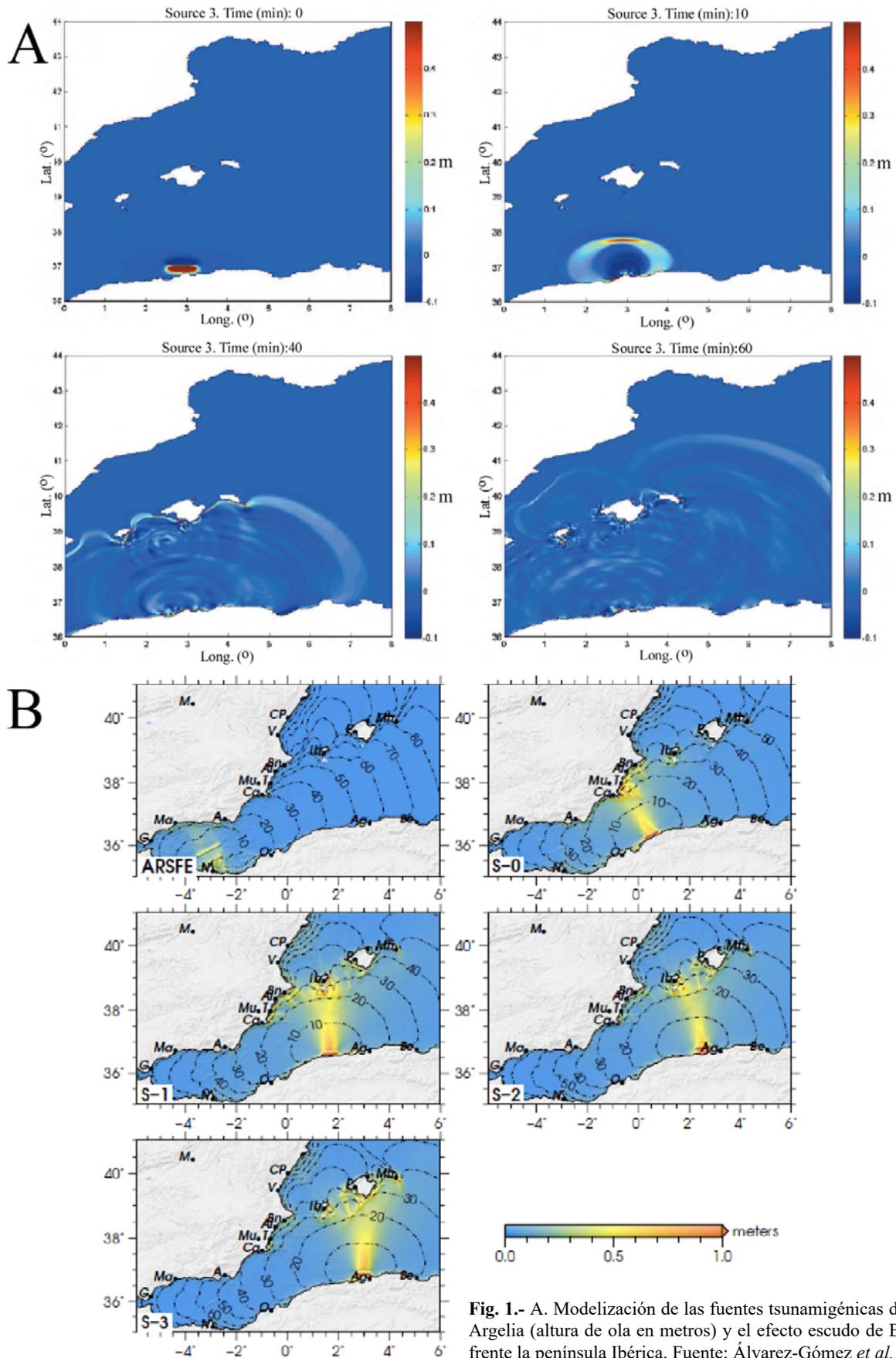


Fig. 1.- A. Modelización de las fuentes tsunamigénicas del N de Argelia (altura de ola en metros) y el efecto escudo de Baleares frente la península Ibérica. Fuente: Álvarez-Gómez *et al.* (2010). B. Mapas regionales de elevación máxima de onda de la fuente tsunamigénica del mar de Alborán y por las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

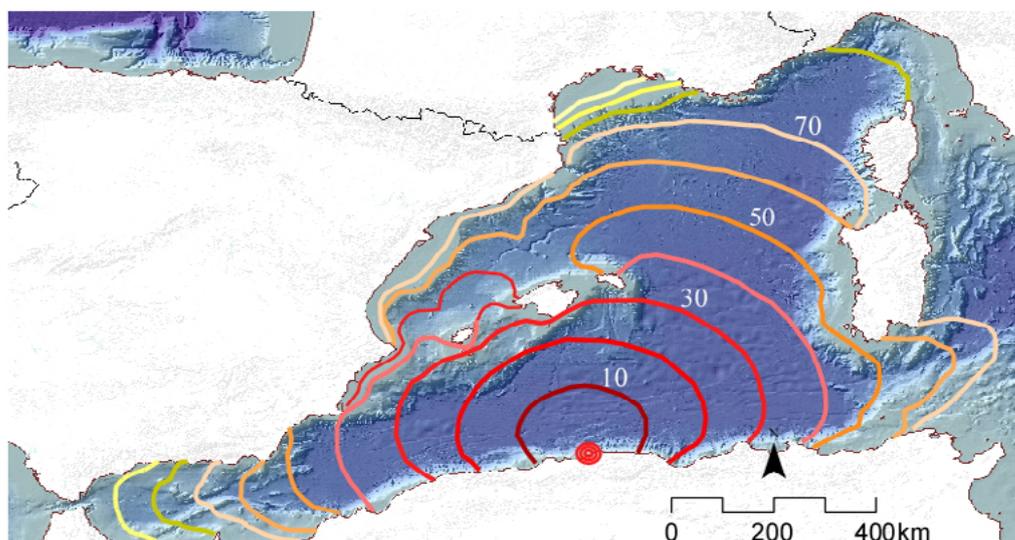


Fig. 2.- Análisis del tiempo de viaje de las olas para el tsunami del 21 de mayo de 2003 con contornos de intervalos de 10 minutos. Simplificado de Heidarzadeh *et al.* (2019).

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: desalajo 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 Kelleat (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 Kelleat, 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.

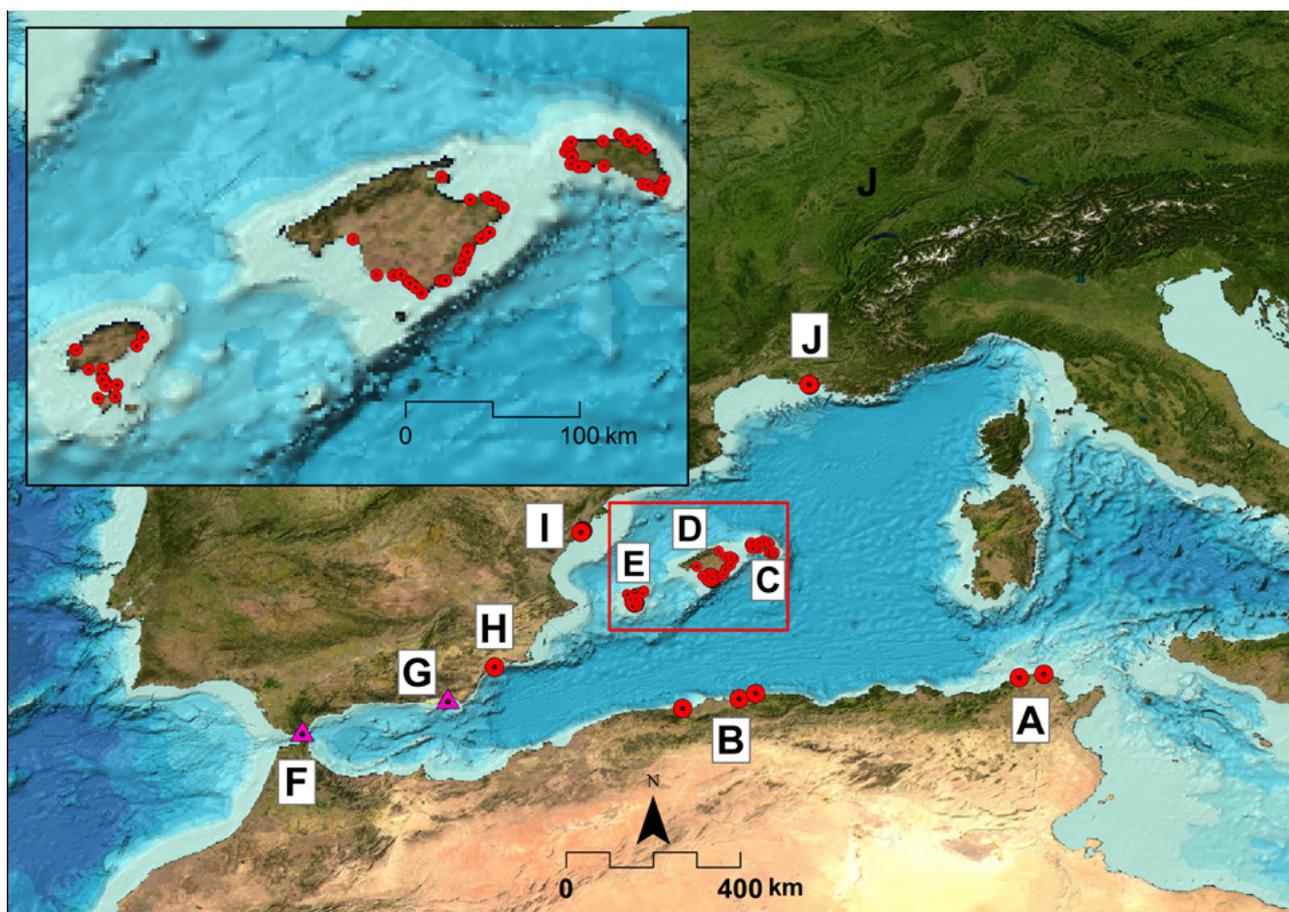


Fig. 3.- Ubicación de bloques y tsunamitas estudiados en el Mediterráneo occidental. En círculos apreciamos bloques de tsunamis, en triángulos sedimentos de tsunamis. A. Túnez; B. Argelia; C. Menorca; D. Mallorca; E. Ibiza y Formentera (ver detalle de C a E en el mapa de la parte superior izquierda); 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 tsunamitas), 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

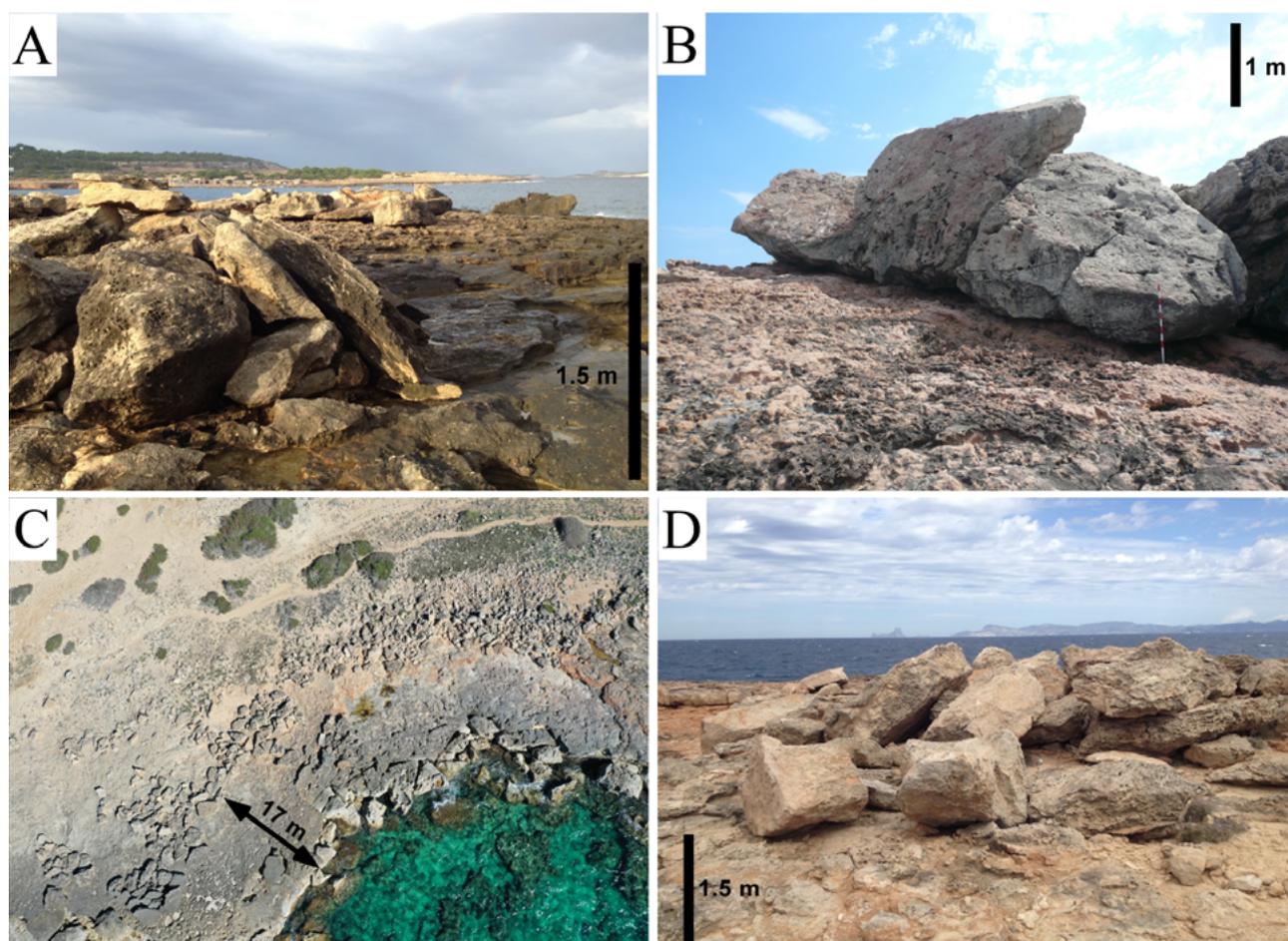


Fig. 4.- Bloques de tsunamis analizados por Roig-Munar (2016) en las costas rocosas de las islas Baleares asociados a las trayectorias de tsunamis (Figs. 1 y 2). A. Trenes de bloques imbricados en la costa de Sant Antoni, Ibiza. B. Bloques de 280 T en la isla del Aire, Menorca. C. Vista aérea de cordones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

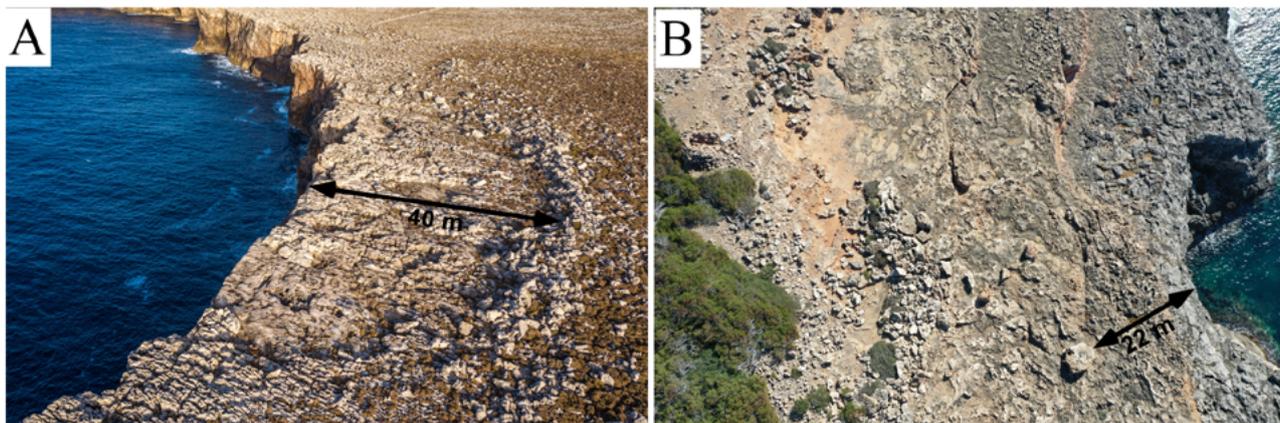


Fig. 5.- Presencia de bloques de tsunami en acantilados superiores a 20 m s.n.m. A. Cordones de bloques en Punta Nati, Menorca, a 33 m s.n.m. B. Cordones de bloques en es Bancals, Mallorca, a 28 m s.n.m. (Imágenes de los autores tomadas con drone).

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 tsunamis, 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 tsunamis 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 tsunamis 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., 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.
- 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., Gurrupinar, 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. Tsunami 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