

# Bloques en plataformas rocosas y acantilados del SE de Menorca: tipología y procesos

Francesc X. Roig-Munar<sup>1</sup>, José Á. Martín-Prieto<sup>1,2</sup>, Antonio Rodríguez-Perea<sup>2</sup>, Bernadí Gelabert Ferrer<sup>3</sup> y Joan Manuel Vilaplana Fernández<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Q4atre Consultoria Ambiental, Es Migjorn Gran.

<sup>2</sup> Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>3</sup> Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

<sup>4</sup> Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. Grup RISKMAT, Universitat de Barcelona, Barcelona.

## RESUMEN

Una de las contribuciones recientes en el estudio de las costas rocosas en Baleares es la caracterización y análisis de las acumulaciones de bloques en crestas de acantilados y costas rocosas bajas. En su conjunto, el itinerario permite, la observación de diferentes sedimentos asociados a eventos de gran intensidad, como son los tsunamis acaecidos a lo largo de los últimos siglos, así como diversas tipologías de acumulaciones de bloques (i.e. bloques aislados, cordones individuales o imbricados). Se trata de bloques de orden métrico que fueron arrancados del borde del acantilado o bien de terrazas y/o de plataformas litorales, siendo transportados por las olas de tsunami o de tormenta tierra adentro.

**Palabras clave:** bloques, acantilados, tsunamis

## ABSTRACT

One of the recent contributions on rocky coast research at the Balearic Islands is the study of cliff top Boulder deposits. This fieldtrip deals with the visit and characterization of different boulder deposits that are related with tsunamis that accounted during the last centuries. Along different coastal stations it is possible to observe boulders larger than 1 m in maximum length (i.e. isolated boulders, imbricated, chain aligned, etc.) that could be deposited by tsunami waves and/or storm waves.

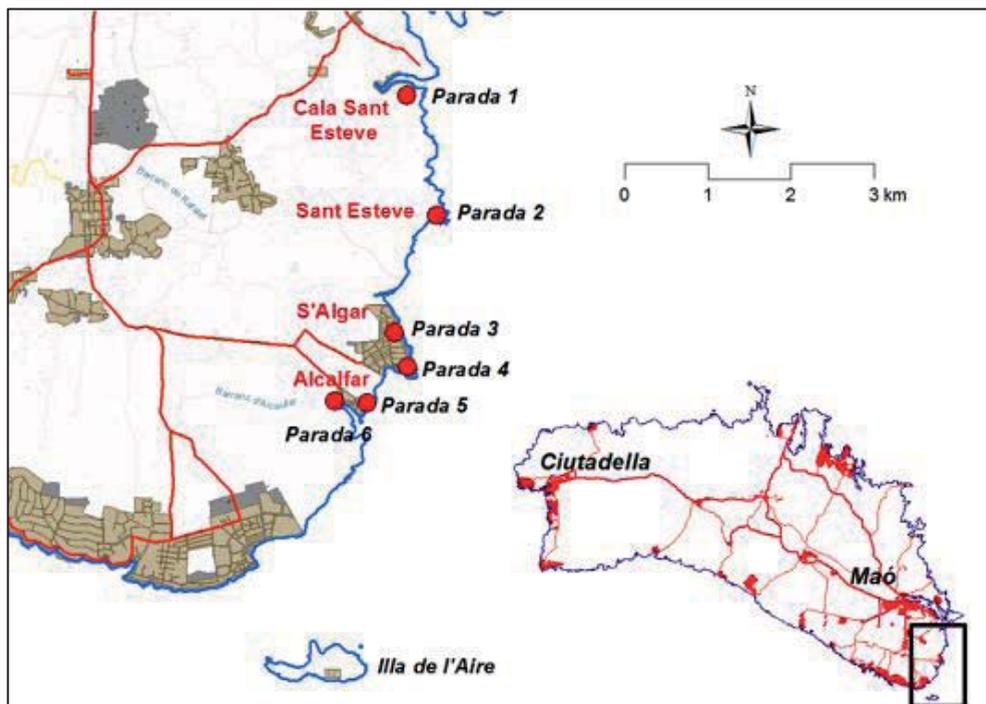
**Keywords:** boulders, rock coasts, tsunamis.

## 1 | Introducción

Una de las contribuciones recientes en el estudio de las costas rocosas en Baleares es la caracterización y análisis de las acumulaciones de bloques en crestas de acantilados y costas rocosas bajas (*cf.* Roig-Munar, 2016). Menorca constituye uno de los emplazamientos donde dicho estudio ha sido más intensivo y en el que se han obtenido algunos de los resultados más concluyentes. En la presente monografía puede consultarse un detallado estado de la cuestión (Roig-Munar *et al.*, 2017).

Por ello, el itinerario que se presenta a continuación, a lo largo de la costa SE de la Menorca, tiene un doble objetivo: (a) por un lado la visita a dos calas, Sant Esteve y Alcalfar, en las que se ha podido observar la incidencia del tsunami del 21 de mayo de 2003 y, por otro lado, (b) explorar dos emplazamientos en los que abundan acumulaciones de bloques, estudiados por Roig-Munar *et al.* (2014) y Roig-Munar (2016), y entre los cuales abundan los ejemplos a los que se atribuye la acción de un tsunami como mecanismo genético. Entre estos dos últimos emplazamientos se encuentra la costa rocosa de s'Algar que en noviembre de 2001 sufrió intensamente los efectos de una de los temporales marinos más severos de la historia recientes de Menorca y en donde abundan los ejemplos de bloques de acantilados ligados a temporales. Finalmente, desde esta localidad, se podrán visualizar acumulaciones de bloques sobre la illa de l'Aire.

En su conjunto, el itinerario (Fig. 1) permite, la observación de diferentes sedimen-



**Fig. 1.** Recorrido y paradas de la salida de campo. 1.- Cala Sant Esteve, afectación del tsunami de 2003. 2.- Bloques y cordones imbricados de tsunami. 3.- Efectos del temporal de 2001. 4.- Bloques sobre el perfil de l'illa de l'Aire. 5.- Bloques de tsunami de Alcalar, y 6.- Cala Alcalar, afectación del tsunami de 2003.

**Fig. 1.** Fieldtrip route and stops. 1.- Cala Sant Esteve, 2003 tsunami evidences. 2.- Tsunami boulders and imbricated boulders. 3.- 2001 Sea storm impacts. 4.- Boulders deposited on top of the illa de l'Aire. 5.- Tsunami boulders at Alcalar, y 6.- Cala Alcalar, evidences of the 2003 tsunami.

tos asociados a eventos de gran intensidad, como son los tsunamis acaecidos a lo largo de los últimos siglos, así como diversas tipologías de acumulaciones de bloques (i.e. bloques aislados, cordones individuales o bloques imbricados). Se trata de bloques de orden métrico que fueron arrancados del borde del acantilado o bien de terrazas y/o de plataformas litorales, siendo transportados tierra adentro.

## 2 | Marco geológico y geomórfico

La zona a visitar se encuentra en el extremo SE de la isla de Menorca, entre la cala de Sant Esteve y Alcalar (Fig. 1), y dentro de la unidad morfo-estructural conocida como Migjorn. Ésta comprende los afloramientos de los materiales postorogénicos del Mioceno superior (calcarenitas y calcilitas) que representan la mitad meridional de la isla y en la que pueden diferenciarse, grosso modo, tres unidades: una zona central, más elevada que presenta alturas medias de 35 m y flanqueada por otras dos áreas de menor altura. Tal disposición responde a un anticlinal laxo que define la estructura de la mitad meridional de la isla (Gelabert *et al.*, 2005). El itinerario discurre por una

costa acantilada y rectilínea, con articulaciones asociadas a ejemplos canónicos de calas (*vid.* Fornós *et al.*, 2017). Los acantilados están formados por materiales del Mioceno superior, correspondientes a dos secuencias estratigráficas (Pomar *et al.*, 2004). La secuencia inferior corresponde al Tortoniense, con depósitos de rampa carbonatada distal, mientras que la secuencia superior corresponde al complejo arrecifal carbonatado.

La zona por la que discurre el itinerario se caracteriza por la presencia de acantilados medios a bajos recortados sobre los materiales miocenos, que cuando afectan a materiales calcilutíticos dan perfiles escalonados, mientras que cuando se desarrollan sobre roquedo calcarenítico resultan en acantilados más verticales, pudiendo superar los 10 m de altura y en las que condicionada por líneas de fracturación, descansa una continua rasa de abrasión (Rosselló, 2004). Todo el conjunto está afectado por una intensa red de diaclasas y pequeñas fracturas que favorecen un litoral articulado y con el desarrollo de algunas calas en las que queda patente la combinación del modelado kárstico, el fluvial y el control estructural (Fornós, 2004; Rosselló, 2004). Un karren litoral bien desarrollado así como la presencia de campos de bloques son los dos atributos que llaman la atención en la zona (Gómez-Pujol y Fornós, 2004a).

Los depósitos de bloques ubicados sobre acantilados de la costa SE de Menorca han sido descritos por Roig-Munar *et al.* (2014) y Roig-Munar *et al.* (2016a), que caracterizaron 1762 bloques situados sobre las terrazas litorales en 8 localidades de estudio. En concreto en las zonas de cala Sant Esteve y Alcafar se han analizado la morfometría de 591 bloques: 218 en Sant Esteve, 368 en Alcafar, y 7 bloques en s'Algar.

Las acumulaciones de bloques e incluso los bloques individualizados presentan unas características (i.e orientación, imbricación) que permiten diferenciarlos como productos de otro tipo de modelado o dinámica distinto de la gravitatoria o la erosión de vertientes (Scheffers y Kinis, 2014). No obstante, se pueden observar procesos de retrabajamiento asociados a temporales extraordinarios que afectan las primeras líneas de bloques imbricados. Los escasos procesos erosivos y/o sedimentarios que se dan en estas costas rocosas han permitido la conservación de tales acumulaciones de grandes bloques (Roig-Munar *et al.*, 2015).

A cada uno de los bloques caracterizados, se les han aplicado diferentes ecuaciones para establecer las columnas de agua necesarias para su transporte a partir de las condiciones previas a su desplazamiento (i.e, bloques sumergidos, delimitados por juntas o subaéreos) así como las condiciones de flujo (i.e. tsunamis o flujos de tormentas) que generan la deposición del bloque (*cf.* Nott, 2003; Pignatelli *et al.*, 2009, Barbano *et al.*, 2010; Engel y May, 2012; Roig-Munar *et al.*, 2015). Al resultado de estas ecuaciones se le añade la altura del acantilado en su cornisa (Roig-Munar *et al.*, 2015) obteniendo las columnas de sobre elevación por remonte (run-up) necesarias para el desplazamiento de cada bloque bajo dichos supuestos.

Menorca presenta un clima marino caracterizado por una altura de ola significativa entre 0,5 y 1,5 m, con períodos de ola máximos asociados de 5 a 7 s y con una dirección dominante del N, seguida de una componente del SE. El régimen extremo pauta probabilidades del 90% para eventos anuales de 5 m de altura de ola significativa, y para periodos de retorno de 20 y 50 años arroja alturas de 7,8 y 8,3 m respectivamente. Los valores extremos de los últimos 50 años alcanzan alturas de ola

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).

Estudios recientes han identificado varios focos de tsunami en la costa norte de Argelia (Álvarez-Gomez *et al.*, 2011), así como también han modelado la propagación de la onda de tsunami y como ésta afectaría a la isla de Menorca, siendo el SE de la Isla el área más afectada, especialmente el sector entre Maó y Punta Prima y muy significativamente las localidades de Cala Sant Esteve y en Alcafar (Fig. 1). En cuanto al tiempo de viaje del tsunami la llegada del frente de onda a Menorca es 40' y 45', tardando aproximadamente de 20' a 25' más para llegar a la costa N de la Isla, aunque ya con menor intensidad.

Las áreas con bloques de orden métrico a una distancia y/o altura superiores a la influencia del oleaje de temporal han sido interpretadas como el producto de flujos de tsunamis. En concreto, se reconocen tanto bloques aislados como agrupaciones de bloques imbricados con morfología de cordones. Estos cordones están asociados a diferentes terrazas de denudación, conformándose estas como áreas fuente por el progresivo desmonte de sus cornisas tierra adentro (Roig-Munar *et al.*, 2016b). Las áreas han sido caracterizadas morfológicamente y presentan un doble perfil. 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 el oleaje y otro perfil a cotas superiores a 5 m s.n.m con bloques de grandes dimensiones y elevados grados de inclinación e imbricación.

Desde un punto de vista patrimonial y etnográfico, el área de Sant Esteve presenta numerosas explotaciones de calcarenitas usadas como material de construcción. Muchas de estas pequeñas canteras se abandonaban a medida que iban apareciendo "impurezas" en dichos materiales (Roig-Munar *et al.*, 2016a). Se trata de concreciones de calca en el Mioceno superior y una dolomitización asociada a infiltraciones subterráneas (Pomar *et al.*, 2004). Estas canteras fueron usadas entre 1720 y 1726 para la construcción del Fuerte Marlborough, situado en la cala Sant Esteve y en 1798 para la reconstrucción del mismo (Fornals, 1993).

### 3 | Efectos del tsunami de 21 de mayo de 2003

El 21 de mayo de 2003 a raíz de un movimiento sísmico de fuerza 6 en la costa de Argelia, las Baleares experimentaron los efectos de onda de tsunami que se dejó sentir especialmente en puertos y pequeñas ensenadas. El testimonio de las incidencias y el registro del último tsunami que afectó a las Baleares y en particular a Menorca, quedó recogido en las crónicas del Diario de Menorca, de los días 22 y 23 de mayo de 2003. En 2003, los autores de este trabajo aún no habían iniciado el estudio de la acumulación de bloques en acantilados, por lo que no se dispone de datos ni observaciones asociadas a procesos morfológicos sobre estas costas asociadas al evento en cuestión. No obstante las crónicas periodísticas son lo suficientemente explícitas como para intentar trazar las principales líneas maestras e impactos del tsunami de 2003:

*"Menorca sufre los efectos del terremoto-seísmo registrado en Argelia. El puerto de Maó, Cales Fonts, Cala Sant Esteve, Cala Alcafar y Cala Galdana fueron las zonas más afectadas por las "rissagues" que causaron daños en un buen número de embarcaciones, dañadas por la oscilación*

de las aguas. La isla sintió ayer los efectos de un terremoto registrado en Argelia que afectó sobre todo al mar. El seísmo, de magnitud 6,0 en la escala Richter, y cuyo epicentro se registró a 83 km de Argel, se sintió en toda la costa Mediterránea, en la Península Ibérica y en Baleares, según informó el Instituto Geográfico Nacional (IGN). En el caso de Maó, el movimiento de las aguas resultaba espectacular: tan pronto desaparecía de la orilla dejando al descubierto el fondo como volvía, inundando el paseo marítimo e incluso la calzada. La misma situación se vivía simultáneamente en Cales Fonts, Cala Alcalfar y Cala Sant Esteve, donde las «rissagues» eran igual de fuertes. Aproximadamente a las 23:00 h. llegaban noticias de Eivissa y Mallorca, los dos primeros puntos del archipiélago donde se notaron los efectos del terremoto, que informaban de que las oscilaciones habían cesado y que se esperaba que pasara lo mismo en la costa menorquina. En el conjunto del litoral muchas tumbonas desaparecieron de las playas por el efecto del oleaje, el maremoto, terremoto o tsunami, llámesele como se quiera, que sorprendió Menorca en la noche del miércoles, deja tras de sí una imagen lastimosa y unos desperfectos centralizados en las embarcaciones. La zona de levante de la isla fue la más afectada, y con la luz del día, los efectos del maremoto eran evidentes en la Colàrsega del puerto de Maó. Los daños también eran visibles en Cala Sant Esteve y Cala Llonga, y en Cala Alcaufar, donde algunas hamacas se hallaban a 300 m de la playa, junto a peces muertos. También en Biniancolla, Cales Fonts, Macaret o Cala Galdana los efectos eran visibles.” Diario Menorca (22/05/2003)

Las rissagues son movimientos bruscos del nivel del mar que se producen por súbitas variaciones de presión debido a bruscas oscilaciones de presión atmosférica y presencia de vientos del S, así como, la forma y orientación de la cala o el puerto:

“El servicio de emergencia 112 alarma por la posibilidad de que se produzca un nuevo “tsunami” debido al terremoto (seísmo, maremoto) acaecido en Argelia. Un nuevo terremoto en Argel ocurrido en la tarde de ayer motivó que el servicio de emergencia diera aviso. La alarma ante la posibilidad de que se produjera un nuevo «tsunami» en la isla. La causa se asociaría a otro terremoto ocurrido en Argelia a las 19:11 h, que el IGN fijó en una intensidad de 6.1 grados en la escala Richter. Según este departamento, el seísmo se sintió ligeramente en Menorca y Eivissa.” Diario Menorca (23/05/2003)

Las descripciones del Diario Menorca no ahondan en procesos de tipo geomorfológico, bien sea el transporte o la acumulación de bloques, o los desperfectos físicos que estos puedan ocasionar, no obstante sí que mencionan los emplazamientos afectados por daños sobre bienes o instalaciones antrópicas en la costa de Menorca y también en algunos aspectos anecdóticos como la presencia de numerosos peces arrojados tierra adentro por el frente de tsunami (Fig. 2). De hecho, las localidades citadas en la prensa coinciden con los focos de mayor intensidad del impacto en la costa según las simulaciones de propagación de tsunamis realizadas por Roger y Hébert (2008) y por Álvarez-Gómez *et al.* (2011). Dichas localizaciones también coinciden con zonas en las que hay importantes campos de bloques, que estudiados por Roig-Munar (2016) no pertenecen a este mismo evento. Las noticias de prensa también permiten considerar el tiempo que tardó el tsunami en llegar a Menorca tras producirse el seísmo, que también viene a coincidir con las isócronas de avance del tsunami establecidas por Alaset *et al.* (2006) y por Álvarez *et al.* (2011). Vale la pena sacar a colación que la acumulación de peces tierra adentro en los lechos torrenciales, como en el caso de Alcalfar, coinciden con los efectos de los tsunamis descritos en noticiarios históricos de la vecina isla de Mallorca. Así, Fontseré (1918) recoge una de las noticias del *Cronicon Majoriscense*, relativa a un evento fechado en 1756 en la isla de Mallorca y a raíz del cual se constató la presencia de peces a 2,4 km tierra adentro.



**Fig. 2.** Acumulación de embarcaciones en la colársela de cala Sant Esteve (izquierda). Presencia de peces a 200 m tierra adentro en el cauce del barranco de cala Alcafzar (derecha)

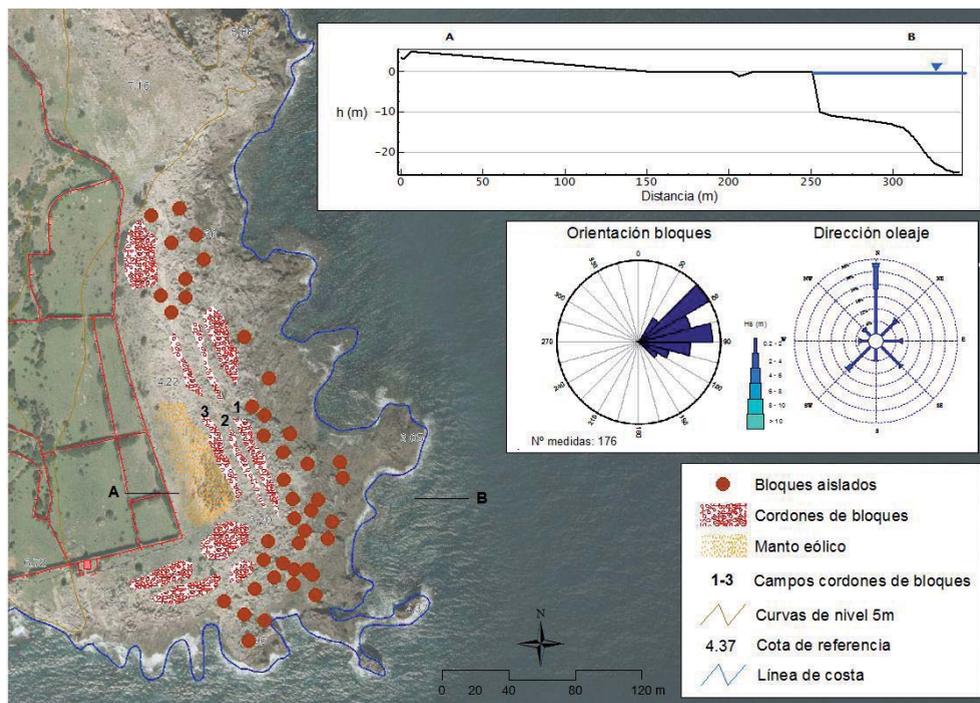
**Fig. 2.** Boats accumulated at the bottom of cala Sant Esteve embayment (right). Fishes and marine rest that were deposited 200 m inland at the Cala Alcafzar stream valley (left).

#### 4 | Campo de bloques de Sant Esteve (Parada 2)

En la cartografía geomorfológica de Sant Esteve (Fig. 3) se aprecia la presencia de hasta 3 cordones de bloques imbricados, que representan tres episodios de deposición de gran energía. La altura de esta sector de costa es baja –inferior a los 1,5 m– y en la superficie rocosa donde descansan los de bloques pueden observarse marcas puntuales de impactos recientes de orden centimétrico en su frente delantero, indicando cierto retrabajamiento de los cordones. Mientras que la dirección dominante del oleaje es N, así como la de los temporales más energéticos. Los bloques están preferentemente imbricados y con una marcada componente ENE, lo que junto a su clara disposición en cordones imbricados, sugiere como mecanismo genético un flujo del tsunami.

En Sant Esteve, un bloque de grandes dimensiones y con incrustaciones de fauna litoral, por tanto de origen sumergido, fue datado mediante  $C^{14}$  obteniendo una edad de 1720 AD.

En paralelo, se ha evaluado la posibilidad de estimar la edad de los bloques a partir de formas secundarias superpuestas (i.e. pozas, cubetas) y aplicando las tasas de erosión-disolución de carbonatos asociadas (Roig-Munar *et al.*, 2015). Para ello se han medido la profundidad de las pozas o cubetas (*basin pools, kamenitzas*) que se han formado posteriormente al evento de deposición. Al aplicarles una tasa de 0,3 mm/a (Gómez-Pujol y Fornós, 2004b y Gomez-Pujol, 2006) arroja edades estimadas de *ca.* 220 años, lo que ubicaría el inicio de las cubetas de disolución en torno a 1794. Además, algunos de los bloques se encuentran depositados sobre una antigua cantera que fue utilizada para la construcción del Fuerte Marlborough entre 1720 y 1726 (Fornals, 1993). Estas inferencias cronológicas junto con la datación mediante  $C^{14}$ , arrojan un marco temporal que son al fin y al cabo, coetáneos o próximos al episodio de 1756 descrito por Fontseré (1918) en el municipio de Santanyí (SE de Mallorca) que también estaría afectado por el mismo frente de ola que alcanzó la costa SE de Menorca.



**Fig. 3.** Cartografía geomorfológica del área de Sant Esteve, con el perfil topográfico del área en el transepto A-B, rosas de oleaje dominante (derecha) y orientación dominante de bloques (izquierda).

**Fig. 3.** Sant Esteve zone geomorphological map and topographic profile. Wave direction (left) and Boulder orientation (right).

## 5 | Efectos del temporal de noviembre de 2001

El debate sobre el transporte de bloques para discernir su origen, tsunami vs tormentas, obliga a considerar con más detalle el papel de las olas de tormenta en las costas rocosas de las áreas de estudio. Roig-Munar (2016) ha caracterizado diferentes bloques asociados a tormentas que afectaron costas rocosas del SE, SW y N de Menorca, en aquellos punto en los que permanecen in-situ o donde han sido acumulados por el hombre tras la limpieza de los efectos de la tormenta (Figura 4).

Las series temporales de Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)) del Punto SIMAR más cercano a la costa SE de Menorca, arrojan para el día 11 de noviembre de 2001 una altura significativa de ola de 8,2 m con un periodo de pico de 12,3 s y una dirección de procedencia del N ( $11^\circ$ ). El área de s'Algar, presenta un acantilado vertical de 8 m s.n.m. y sólo había sido sometida a oleajes más energéticos durante los últimos 50 años en una ocasión, en las que se alcanzaron los 8,5 m asociados a un temporal procedente del SE (Cañellas *et al.*, 2007). La tormenta del 11 de noviembre de 2001 arrancó numerosos bloques de orden decimétrico en una zona concreta de la fachada del acantilado, favorecida por una forma canalizada, tipo *flowout*. Los bloques



**Fig. 4.** Efectos del temporal de 2001 en la costa rocosa de s'Algar.

**Fig. 4.** 2001 Sea Storm effects at s'Algar rocky coast.

que se desprendieron no superan el metro y las dimensiones medias de los ejes A, B y C son de 0,08, 0,67 y 0,5 m respectivamente, con un peso medio de 0,35 T. La penetración media de los bloques desde la cornisa del acantilado fue de 31,7 m, quedando emplazados a una altura media de 12 m snm. Todo ello arroja un índice de TF (*Transport Figure* definido por Scheffers y Kelletat, 2003) medio de 146. Además se produjo una distribución dispersa de bloques sin ningún tipo de imbricación y donde sus valores de peso no alcanzan los 0,4 T. Las consecuencias geomórficas fueron muy débiles, ya que el acantilado no sufrió cambios en su morfología y los bloques no presentan evidencias de haber estado sumergidos previamente. Todo ello permite tener una estimación de los efectos de estas tormentas sobre esta tipología de acantilados.



**Fig. 5.** Bloques asociados a acantilados de 11 m en la Illa de l'Aire.

**Fig. 5.** Boulders places on cliff top at 11 m above mean sea level at Illa de l'Aire.

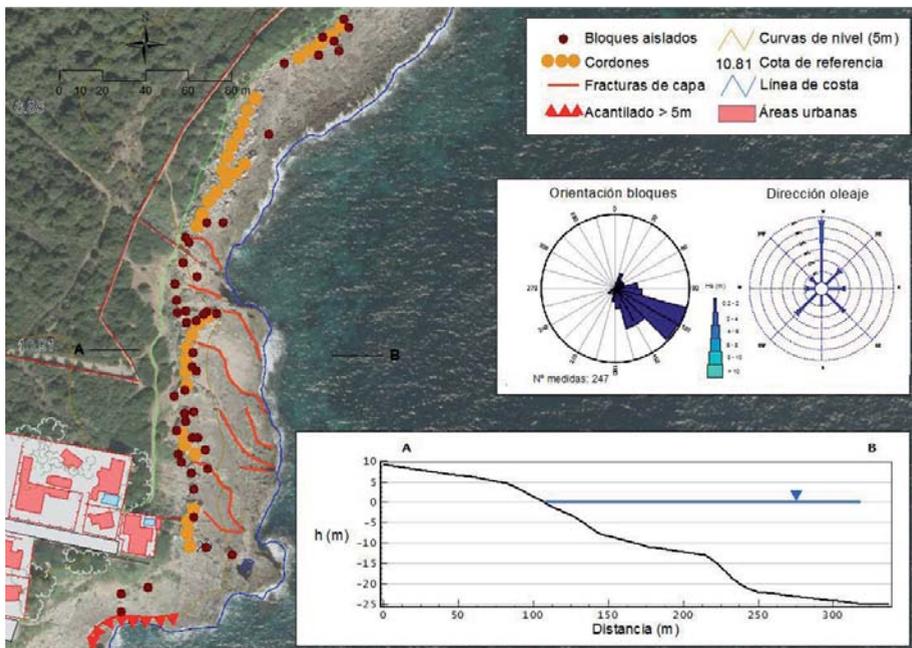
## 5 | Campos de bloques sobre el perfil de l'illa de l'Aire

En un día claro se pueden divisar sobre el perfil de la illa de l'Aire (SE de Menorca, Figura 1) acumulaciones de bloques de grandes dimensiones asociados a perfiles verticales de acantilados con alturas entorno a los 11 m y con áreas fuente bien

definidas en las cornisas de dichos acantilados. Encontramos bloques situados a alturas medias de 8,9 m (Fig. 5), inferiores a la cota de la cornisa debido a la morfología de la isla con buzamiento y pendiente topográfica hacia el N. Los bloques que se divisan se encuentran a 77,9 m de distancia de la cornisa y con un peso medio de 4,39 T. Las columnas de sobrelevación por remonte (*runup*) necesarias para el arranque de estos bloques delimitados por juntas según la ecuación de Engel y May (2012) ofrecen un  $R_t=15,65$  m y  $R_s=23,60$  m. Por tanto, los datos obtenidos manifiestan un flujo de *runup* asociado a un tsunami.

## 7 | Campos de bloques d'Alcázar (Parada 5)

En Alcázar, la cartografía geomorfológica refleja la presencia de hasta 2 cordones de bloques imbricados, ubicados en cotas superiores y que representan dos episodios de deposición de gran energía (Fig. 4). En el perfil no se observan marcas de impactos recientes que indiquen retrabajamiento de cordones ni de bloques aislados. El oleaje dominante es de componente N, mientras que la orientación dominante de los bloques es de  $117^\circ$ , reflejo del flujo de un tsunami no relacionado con el oleaje dominante. En las terrazas litorales observamos una sucesión de escalones producto de sucesivas denudaciones que se reflejan en una concordancia entre los ejes cortos (C) de los bloques imbricados y la potencia de los diversos estratos. Los cordones de bloques im-



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

**Fig. 6.** Alcázar geomorphological map and topographical profile. Wave direction (left) and Boulder orientation (right).

bricados se encuentran a distancias superiores a 60 m de la línea de costa y alturas de 7,5 m s.n.m. Las dataciones obtenidas mediante la tasa de disolución nos ofrece una edad estimada de 1796 AD, datación similar a la obtenida en Sant Esteve y próxima, dentro de un margen de error razonable, con el evento registrado en 1756 en Santanyí.

## 8 | Estimacions hidrodinámicas y conclusiones

En la Tabla I se pueden apreciar los valores estimados de la columna de sobreelevación por remonte (run-up) necesaria para el arranque y el transporte de los bloques analizados (asumiendo que se trata de rocas calcáreas con una densidad de 2,40 gr/cm<sup>3</sup>) en caso de tormentas ( $R_s$ ) y de tsunamis ( $R_t$ ). Se obtiene sumando a los resultados de la ecuación de Engel y May (2012) la altura de la cornisa del acantilado (Roig-Munar *et al.*, 2015 y 2017). Los valores obtenidos para el arranque y transporte de los bloques son  $R_s$ : 13,92 y  $R_t$ : 6,86 en el caso de Alcalfar, y de  $R_s$ : 9,70 y  $R_t$ : 2,8 en el caso de Sant Esteve. Los valores estimados para el desplazamiento de bloques subaéreos en caso de tormentas ( $R_s$ ) y en caso de tsunamis ( $R_t$ ) dan valores de alturas de ola de  $R_s$ : 7,85 y  $R_t$ : 5,34 en el caso de Alcalfar, y de  $R_s$ : 5,04 y  $R_t$ : 1,63 en el caso de Sant Esteve.

Estos resultados evidencian la dificultad para explicar solo mediante el oleaje de temporal (especialmente en Alcalfar) el arranque, el transporte y la imbricación de los cordones de bloques, así como los posibles retrabajamientos de los bloques de menor tamaño (especialmente en Sant Esteve) por dichos oleajes.

Los depósitos analizados muestran bloques bien imbricados, con sus ejes orientados hacia el mar, de modo que el sentido del flujo sería hacia tierra, 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 tipo tsunamis. Ha de considerarse, además, la divergencia entre la orientación del oleaje máximo, del Norte, y la orientación de los bloques ortogonal a la costa.

Así pues, los depósitos de bloques muestran evidencias que apuntan a la acción de eventos de grandes flujos asociados a tsunamis, bien individuales o múltiples sobre la misma área que dan lugar a un retroceso continuado en forma de sucesivas terrazas y cordones de bloques (Roig-Munar *et al.*, 2016b). Las localidades de Sant Esteve y Alcalfar presentan numerosos ejemplos en los que se aprecia una evidente coincidencia con los modelos de propagación de tsunamis.

Localidad	Bloques arrancados		Desplazamiento de bloques	
	$R_s$	$R_t$	$R_s$	$R_t$
Alcalfar	13,92	6,86	7,85	5,34
Sant Esteve	9,70	2,8	5,04	1,63

**Tabla 1.** Altura de la columna de agua necesaria para el arranque y desplazamiento de bloques en caso de olas de tormentas ( $R_s$ ) y de tsunamis ( $R_t$ ) en cada una de las áreas analizadas.

**Table 1.** Water column for boulder detachment and removal by sea storm waves ( $R_s$ ) and tsunami waves ( $R_t$ ).

Estos dos emplazamientos de bloques de tsunamis han sido propuestos por Roig-Munar *et al.* (2017) como Lugares de Interés Geológico (LIG) por sus valores científicos y didácticos, siendo la primera propuesta, a nivel mundial, de un área individualizada con bloques de tsunami como LIG.

### Agradecimientos

A Laura Bañón, por facilitarnos los textos y fotografías del Diario Menorca. A la Policía Local de Sant Lluís por facilitarnos el acceso a los informes sobre los eventos de tsunamis en Alcafar de mayo de 2003. Los autores agradecen al Dr. L. Gómez-Pujol sus comentarios críticos y sugerencias a propósito de la versión preliminar del presente trabajo.

### Referencias

- Alasset, J. P., Hebert, 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.
- 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.
- Cañellas, B., Orfila, A., Méndez, F. J., Menéndez, M., Gómez-Pujol, L. 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* SI, 50: 329-333.
- Diario Menorca, edición impresa de 23 de mayo de 2003
- Diario Menorca, edición impresa de 28 de mayo de 2003
- 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*. Ed. Museo Militar de Menorca, Maó pp. 245.
- 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, L. (2006): *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 200 pp.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004a): Les microformes litorals del Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004b): Tasas de meteorización química en la costa carbonatada de Mallorca. Evaluación preliminar mediante tests de exposición (weight-loss rock tablets). En: Blanco, R., Bedoya, J., Pérez-Alberti, A. (Eds.). *Procesos geomorfológicos y evolución costera*: 401-410. SPUSC, Santiago de Compostela.
- 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., Ferilli, S., Capolongo, D., Marsico, A., Milella, M., Pennetta, L., Piscitelli, A. y Mastronuzzi, G. (2010): Morphological evidences and computer science techniques in order to evaluate tsunami inundation limit. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 42: 129-142.
- Policía Local de Sant Lluís (2013): Informes 00342 y 00343 relativos a tsunami en Alcafar (2013). Ajuntament de Sant Lluís, Menorca.
- Pomar, Ll., Westphal, H. y Obrador, A. (2004): Oriented calcite concretions in Upper Miocene carbonate rocks of Menorca, Spain: evidence for fluid flow through a heterogeneous porous system. *Geologica Acta*, 2 (4): 271-284.
- 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 tsunamis 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., Vilaplana, J. M. y Gelabert, B. (2015): Morfometría de bloques de tsunami en las costas rocosas del Este de Mallorca (Islas Baleares). *Geotemas*, 15: 229-232.
- Roig-Munar, F.X., Mata, R., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M. y Gelabert, B. (2017). Propuesta de Lugares de Interés Geológico asociados a bloques y cordones de origen tsunamítico en la costa SE de Menorca (Baleares) *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1): en prensa
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M., Gelabert, B., Pons, G. X. y Mir-Gual, M. (2014). *Presencia de bloques de tsunamis en las costas rocosas del SE de Menorca (I. Baleares)*. En: Álvarez-Gómez, J. A. y Martín-González, F. (Eds.). *Una aproximación multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico* : 125-128. Murcia, Universidad de Murcia.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, 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. Baleares). En: Álvarez-Gómez, J.A. y Martín-González, F. (eds.), *Una aproximación multidisciplinar al estudio de las fallas activas, los terremotos y el riesgo sísmico*: 109-102. Murcia, Universidad de Murcia.
- Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Vilaplana, J.M. y Gelabert, B. (2016a): 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., Vilaplana, J.M., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A. y Gelabert B. (2016b): Indicadores geomorfológicos de tsunamis históricos en las costas rocosas de Baleares. *Geotemas*, 16 (1): 641-644
- 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
- Scheffers, A.M. y Kelletat, D. (2003). Sedimentologic and geomorphic tsunami imprints worldwide - a review. *Earth-Science Review*, 63: 83-92.
- 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.