

Eventos de oleaje extremo en la costa del sureste peninsular: bloques y megabloques como indicadores de tsunamis o tormentas extremas.

Extreme wave events in the southeastern Iberia coast: blocks and megablocks as an indicator of tsunamis or extreme storms.

J. Lario¹, T. Bardají², C. Spencer³ y A. Marchante⁴

1 Facultad de Ciencias, UNED, 28040 Madrid. javier.lario@ccia.uned.es

2 Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá, 28801 Alcalá de Henares, Madrid. teresa.bardaji@uah.es

3 FET - Geography and Environmental Management, University of the West of England, UK. Chris.Spencer@uwe.ac.uk

4 Grupo de investigación TARHA, Universidad de las Palmas de Gran Canaria. 35001 Las Palmas de Gran Canaria. angel.marchante@ulpgc.es

Resumen: Mientras que la costa SW de la península tiene un registro importante de eventos de oleaje extremo (EOE), la mayoría asociados a tsunamis, la costa mediterránea peninsular ofrece un registro menor de estos eventos, si bien han sido citados algunos tsunamis históricos con pocos efectos en la costa. En general estos estudios se han basado en el registro geológico de secuencias detríticas de arenas y limos. En nuestro caso nos hemos centrado en el estudio de cordones litorales de bloques y megabloques en la zona de Cope, Murcia (SE Peninsular) donde se han localizado bloques mayores de 1 m y a más de 4 msnm, generados por un EOE asociado a tsunamis o grandes tormentas. Mediante el uso de un vehículo aéreo no tripulado (dron) se ha realizado la fotogrametría aérea, completada con terrestre de mayor resolución, y su posterior tratamiento para realizar un modelo 3D del terreno y obtener los parámetros dimensionales y espaciales de estos bloques. Se han utilizado diversos modelos para calcular las alturas de ola de tsunamis y tormentas capaces de generar dichos depósitos (Nott, 2003; Engel y May, 2012). Con los resultados se ha podido confirmar el proceso generador de los cordones de bloques en este escenario.

Palabras clave: oleaje extremo, tsunami, tormentas, dron.

Abstract: Whilst the SW coast of the Iberian Peninsula has a significant record of extreme wave events (EWE), mostly associated with tsunamis, the Mediterranean coast offers a smaller record of these events, although some historical tsunamis with limited impact have been cited on the coast. In general, these studies have been based on the geological record of detrital sequences of sands and silts. In this case, we have focused on the study of coastal deposits of blocks and megablocks in Cope, Murcia (SE of Iberian Peninsula). Here, blocks greater than 1 m and located up to 4 msl were generated by an EWE associated to either a tsunamis or great storm. An unmanned aerial vehicle (drone) has been utilized to perform aerial photogrammetry, which complemented terrestrial photogrammetry of higher resolution. This has been processed to develop a 3D model of the terrain and obtain the dimensional and spatial parameters of these blocks. Different models have been used to calculate potential tsunami wave heights and scale of storms capable of generating such deposits (Nott, 2003; Engel and May, 2012). The results confirm the process of generating force required to generate the block ridges at this site.

Key words: extreme waves, tsunami, storm, drone.

INTRODUCCIÓN

La costa mediterránea ibérica ofrece un registro limitado de eventos de oleaje extremo (EOE) asociados a tsunamis o grandes tormentas. Aunque se ha citado la ocurrencia de algunos tsunamis en tiempos históricos, los efectos geológicos y ambientales en la costa han sido mínimos.

En la cuenca de Cope (Murcia) se han localizado unos cordones litorales de bloques mayores de 1 m y a una altura de hasta 4 msnm (Fig. 1). Estos cordones han debido ser generados por un EOE tipo tsunami o tormenta extrema, lo que suscita el interés de poder determinar su origen para estimar la ocurrencia de estos eventos extremos en la zona.

La geodinámica regional de la zona está controlada por lo que se conoce como el Corredor de Desgarre de las Béticas Orientales (Eastern Betics Left Lateral Shear Zone; EBSZ), que se generó en respuesta al proceso de indentación tectónica del Arco de Águilas (Coppiet et al., 1989) desde el Mioceno medio hasta el Cuaternario (Silva et al. 1993). En el Arco de Águilas, las fallas NNE-SSW y ESE-WNW controlaron la localización y geometría de pequeñas cuencas sedimentarias litorales, como es el caso de la Cuenca de Cope (Bardají et al., 2015).

La actividad sísmica más fuerte en el área se concentra claramente a lo largo de las fallas dentro de la EBSZ que presentan una orientación perpendicular u oblicua al campo de esfuerzos regional (N-S a NW-

SE), habiéndose registrado terremotos de hasta Mw5.2 (terremoto de Lorca, 2011). No obstante, el registro sísmico instrumental de la zona de estudio muestra pocos terremotos y de baja magnitud ($\leq 4,0$ Mw) y sólo dos terremotos históricos (1596 y 1882 AD) con epicentro macrosísmico en la localidad de Águilas con intensidades máximas de IV - V (Mezcua, 1982).



FIGURA 1. Cordones de bloques métricos imbricados en la costa de Cabo Cope (Murcia).

Los bloques objeto de este estudio están constituidos por tres litologías diferentes: 1) Calcarenitas fosilíferas amarillas de grano medio-grueso y carácter masivo (Plioceno superior-Pleistoceno inferior); 2) Calcarenitas de grano medio-fino alternando con niveles de gravas de grosor variable, y niveles con un elevado contenido en moldes de bivalvos (Pleistoceno superior); 3) Conglomerado gris muy cementado en el que se han diferenciado dos facies, conglomerado de gravas (1-2cm) muy redondeadas fundamentalmente de cuarzo blanco, y conglomerado heterométrico con gravas, cantos y bloques muy redondeados y de litología diversa (Pleistoceno superior).

METODOLOGÍA y RESULTADOS

Para la geolocalización de los cordones de bloques se han realizado diversos vuelos con vehículo aéreo no tripulado (dron) DJI Phantom 4, realizando un vuelo fotogramétrico y su posterior modelización 3D con software Pix4D. Para obtener una resolución centimétrica de la geolocalización de los bloques y sus dimensiones se obtuvieron diversos puntos de control con sistema GPS Trimble Rover R8 GNSS. Para obtener un detalle milimétrico se realizó fotogrametría terrestre de los bloques mediante la utilización del software comercial Agisoft Photoscan (Agisoft, 2017) realizando una restitución y modelización tridimensional de los mismos e integrando los productos resultantes tanto del vuelo fotogramétrico como de la fotogrametría terrestre en un SIG a partir del software libre QGIS. De este modo se puede determinar la morfometría, orientación, altura y distancia a línea de costa de cada bloque.

Igualmente, se ha asignado a cada bloque la litología asociada al mismo. Para el cálculo de

densidades se procedió a realizar un muestreo de las diferentes litologías identificadas, tomando un mínimo de 2-3 muestras de cada una de ellas. En el laboratorio se tuvieron sumergidas en agua al menos 24 horas para su total saturación para una correcta simulación del entorno sumergido. Una vez pasado ese tiempo, se pesaron (m_i) y se calculó el volumen (v_i) de cada muestra, mediante su inmersión en agua y medición del volumen de agua desplazado. Todas las medidas se hicieron dos veces con el fin de minimizar errores. Finalmente, la densidad (ρ_i) se calcula mediante la fórmula básica $\rho_i = m_i/v_i$.

Como se puede observar en la Fig.2 hay una relación directa entre la distancia a la línea de costa y el peso del bloque: tal como se puede esperar los bloques más pesados están más cercanos a la costa y los más ligeros han podido transportarse a mayor distancia.

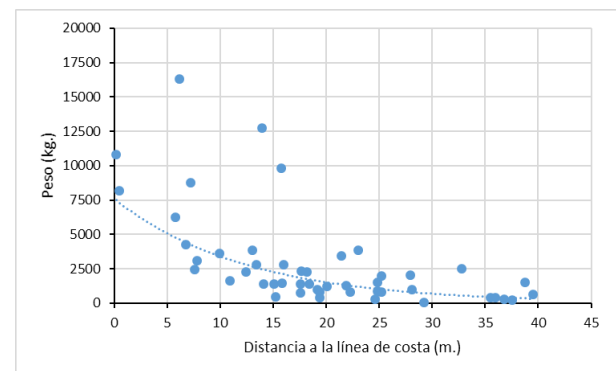


FIGURA 2. Relación entre la distancia a la línea de costa y el peso de los bloques.

En la Fig.3 se muestra la relación entre el peso del bloque y la altura a la que ha sido transportado, observándose también una relación directa entre estos parámetros.

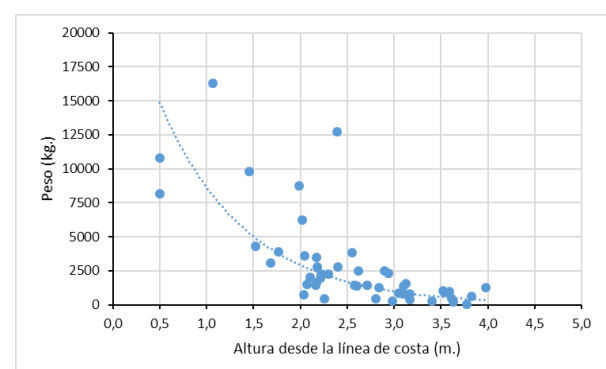


FIGURA 3. Relación entre la altura desde la línea de costa y el peso de los bloques.

Una vez se tienen estos datos se utilizaron diferentes aproximaciones para calcular la altura de ola necesaria para transportar esos bloques tanto por una ola

de tsunami como por una ola de tormenta. Dado que muchos de los bloques proceden de la zona intermareal en un escenario de bloques limitados por diaclasas (JBB-joint bounded boulders), se ha utilizado la formulación propuesta por Engel y May (2012):

$$H_S = \frac{2 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b}{C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w}$$

$$H_T = \frac{0,5 \cdot \mu \cdot V \cdot \rho_b}{C_D \cdot (a \cdot c \cdot q) \cdot \rho_w}$$

Donde H_S es la altura de ola de tormenta, H_T es la altura de ola de tsunami, μ es un coeficiente de fricción estática (0,65), C_D es el coeficiente de arrastre (1,95), a es la longitud del eje mayor, c la longitud del eje menor, q es un valor medio del área medida respecto a un rectángulo que cubriera esa área (0,73), ρ_w es la densidad del agua del mar (1,02 g/cm³ y ρ_b es la densidad del bloque.

Para los bloques sumergidos se ha utilizado la propuesta de Nott (2003):

$$H_S = \frac{\left(\rho_b - \frac{\rho_w}{\rho_w}\right) 2a}{C_n \cdot (a \cdot c/b^2) + C_L}$$

$$H_T = \frac{0,25 \left(\rho_b - \frac{\rho_w}{\rho_w}\right) 2a}{C_n \cdot (a \cdot c/b^2) + C_L}$$

Dónde b es la longitud del eje intermedio y C_L es el coeficiente de sustentación (0,178).

Se han medido más de 1.000 bloques, con volúmenes entre 0,02 y 6,52 m³ y pesos entre 42,5 kg y 16,3 Tn. El bloque más alto está situado a 4 msnm y el más alejado a 39,5 m de la línea de costa. En la Tabla I se presentan los valores más extremos de altura de ola de tormenta (H_S) y tsunami (H_T) calculadas con las dos propuestas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la Tabla I se puede ver que las alturas de ola máxima esperada para un tsunami usando la metodología propuesta por Engel y May (2012) están en el rango de 2,5-3,6 m y las de tormenta entre 10,2 y 14,5 m. Usando la metodología de Nott (2003) se obtienen unos rangos de 2,7-3,9 m y 10,9 a 15,6 m respectivamente.

Id.	V	P	1-Ht	1-Hs	2-Ht	2-Hs
39	5,1	12,7	2,1	8,4	3,9	15,6
40	3,9	9,8	2,7	10,9	1,0	3,9
43	6,5	16,3	2,5	10,2	2,8	11,2
805	0,3	0,7	0,3	1,4	3,6	14,6
1003	3,51	8,8	2,8	11,4	1,4	5,4
1006	0,9	2,6	0,9	3,7	2,7	10,9
1010	3,3	8,1	3,6	14,5	0,8	3,2

TABLA I. Alturas máximas de ola de tormenta y tsunami (en m.) calculadas según Engel y May (1) y Nott (2). Id: número de bloque; V: volumen calculado con GIS en m³; P: peso en Tn.

Si bien las tormentas ciclónicas en la costa de Murcia son de baja entidad, el estudio de altura máxima de ola medidas en la boya de Cabo de Palos entre el periodo 1985-2012 muestra al menos cuatro momentos en los que éstas han rebasado los 4,5 m, alcanzando 5,6 m el 28 de febrero de 1995 (Puertos del Estado, www.puertos.es). En la zona de Cabo Cope, las modelizaciones realizadas también por Puertos del Estado para el periodo 1958-2017 muestra una altura máxima de ola de 3,73 m alcanzada en octubre de 1973. Con estos datos se puede confirmar que las alturas de ola de más de 10 m necesarias para poder movilizar los bloques mayores que forman esta barra litoral no se han dado durante grandes tormentas producidas en la zona en época instrumental.

En relación a la generación de tsunamis, la matriz de decisión para tsunamis en la costa Mediterránea Española indica que terremotos desde Mw 6.0-6.5 generados a menos de 40 km de la costa y a profundidades menos de 100 km tiene potencial para generar un tsunami destructivo en esta costa (IOC, 2011). Los modelos de generación de tsunamis también muestran que la región de Murcia es la zona más afectada por grandes tsunamis generados principalmente en el norte de Argelia (Álvarez-Gómez et al., 2011). Aun así, son pocas las referencias a tsunamis ocurridos en la zona en tiempos históricos.

El 1522 se produjo un terremoto en Almería de M>6,5 que afectó a amplias zonas del Mediterráneo occidental, causando más de 1.000 fallecidos. El área epicentral se localiza en la plataforma del Golfo de Almería y produjo varios deslizamientos submarinos que pudieron producir un tsunami (Reicherter y Becker-Heidmann, 2009). Estos autores encuentran sedimentos asociados a este evento (y anteriores) que indican alturas de ola de al menos entre 2-3 m., aunque no parece haberse notado este tsunami más al norte del Cabo de Gata.

Con estos antecedentes, se puede asignar este EOE a un tsunami generado en el Mediterráneo occidental y que pudo alcanzar al menos 4 msnm en la costa de Cabo Cope. Respecto a la edad del evento, no ha sido

posible realizar dataciones en los bloques estudiados, pero dada su disposición respecto a los depósitos subyacentes su edad debe ser Holocena post-máximo transgresivo (ca. 6.000 yrBP). Los terremotos históricos estudiados en la zona no parecen haber generado estos cordones de bloques.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por los proyectos MINECO CGL2013-42847-R y CGL2015-69919-R, así como por la Faculty of Environment and Technology, University of the West of England, Bristol, UK. Es una contribución del GTE al Proyecto IGCP 639 “Sea Level Change from Minutes to Millennia”.

REFERENCIAS

- Agisoft (2017): Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 1.3, San Petersburgo.
- 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 Earth Systems Science*, 11: 227–240.
- Bardají, T., Cabero, A., Lario, J., Zazo, C., Silva, P.G., Goy, J.L. y Dabrio, C.J. (2015): Coseismic vs climatic effects in the record of relative sea-level changes: an example from last interglacials in SE Spain. *Quaternary Science Reviews*, 113: 60-77.
- Coppier, G., Griveaud, P., Larouziere, F.D., Montenat, Ch., Ott d’Estevou, Ph., (1989): Example of Neogene tectonic indentation in the Eastern Betic Cordilleras: the Arc of Aguilas (Southeastern Spain). *Geodinamica Acta*, 3: 37-51.
- Engel, M. y May, S.M. (2012): Bonaire's boulder fields revisited: evidence for Holocene tsunami impact on the Leeward Antilles. *Quaternary Science Reviews*, 54: 126-141.
- IOC (2011): ICG/NEAMTWS: Seventh Session Paris, France 23–25 November 2010. Intergovernmental Oceanographic Commission, Reports of Governing and Major Subsidiary Bodies, 45 p.
- Mezcua, J. (1982): *Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica*. Instituto Geográfico Nacional, Pub. 202: 319 p.
- Nott, J. (2003): Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pretransport setting. *Earth and Planetary Science Letters*, 210: 269-276.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C. y Bardají, T. (2003): Fault generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, 250: 203-226.
- Reicherter, K. y Becker-Heidmann, P. (2009): Tsunami deposits in the western Mediterranean: remains of the 1522 Almería earthquake? *Geological Society, London, Special Publications*, 316 (1): 217-235