











Dinámica de bloques mediante sensores RFID en la Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Ilha de São Jorge, Archipiélago de las Azores)

Boulder dynamics using RFID in Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Ilha de São Jorge, Azores)

Alejandro Gómez-Pazo^a, Ana Hipólito^b, Augusto Pérez-Alberti^c, Rui Quartau^d, Sérgio P. Ávila^e, Carlos Melo^f, Mariana Andrade^g, Esther Martín-González^h, Cesar Andradeⁱ y Ricardo S. Ramalho^j

^aDepartamento de Geografía y Geología, Universidad de León, , agomp@unileon.es; ^bCIBIO-Açores, Universidade dos Açores, , ana.hipolito80@gmail.com; ^cDepartamento de Edafología e Química Agrícola, Universidade de Santiago de Compostela, , augusto.perez@usc.es; ^dInstituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa, , rui.quartau@hidrografico.pt; ^eCIBIO-Açores, Universidade dos Açores, , avila@uac.pt; ^fUniv. de Lisboa, , casm.azores@gmail.com; ^gGEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany, , mandrade@geomar.de; ^hMuseo de Ciencias Naturales de Tenerife, , mmartin@museosdetenerife.org; ⁱDepartamento de Geología, Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, , candrade@ciencias.ulisboa.pt y ^jSchool of Earth and Environmental Sciences, Cardiff University, , ramalhor@cardiff.ac.uk.

Gómez-Pazo, A.; Hipólito, A.; Pérez-Alberti, A.; Quartau, R.; Ávila, S.P.; Melo, C.; Andrade, M.; Martín-González, E.; Andrade, C. y Ramalho, R.S. 2023. Dinámica de bloques mediante sensores RFID en la Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Ilha de São Jorge, Archipiélago de las Azores). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral*. Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. <https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18573>

Abstract

This research focuses on the evolution of a boulder beach on a barrier surrounding a lagoon on a coastal-talus platform located on the north of the volcanic island of São Jorge. The Azores Islands are exposed to a high energetic wave regime, combining wind-waves (local and storm derived) and high-energy swells from distant storms. Geomorphological response of this coastal feature to oceanographic forcing has led to the development of a monitoring program to evaluate short-term morphological variations, sediment transport dynamics and to identify evolution patterns. With this aim, boulder mobility was tracked in 2022 by deploy 30 RFID sensors. During the first tag retrieval survey (2023), 15 boulders were recovered. Maximum displacement exceeded 25 m with an average of 7.7 m and varied significantly throughout the analysed area. Directional displacements show a remarkable similarity with the dominant wave (W-NW). After these initial results, the number of monitored boulders has been increased to track the sediment transport processes in greater detail.

Keywords: Coastal evolution, boulder beach, coastal-talus platform, RFID.

Resumen

Esta investigación se centra en la evolución de una playa de bloques en una barrera a lo largo de un lago en la isla de São Jorge. Las islas Azores están expuestas a condiciones de alta energía de oleaje. La respuesta geomorfológica de este sector ha llevado al desarrollo de un programa de seguimiento para evaluar las variaciones morfológicas a corto plazo y las dinámicas/patrones de transporte de sedimentos. Con este objetivo, la movilidad de los bloques se monitorizó en 2022 con la introducción de 30 RFIDs. En la primera campaña de recuperación (2023) se localizaron 15 bloques. El desplazamiento máximo superó los 25 m con una media de 7.7 m, que varía de forma importante a lo largo de la zona analizada. Las direcciones de los desplazamientos encajan con el régimen de oleaje dominante (W-NW). Tras estos primeros resultados, se aumentó el número de bloques monitorizados para conocer más en detalle el proceso de transporte de sedimentos.

Palabras clave: evolución costera, playa de bloques, plataforma costera detrítica, RFID.

1. Introducción

El archipiélago de las Azores constituye un lugar de gran interés para el desarrollo de actividades científicas de múltiple índole. Su exposición a un régimen energético marítimo fuerte, con recurrencia de temporales marinos, se suma a factores de orden geológico y geomorfológico, incluyendo procesos vulcanológicos, sedimentarios, erosivos, eustáticos e isostáticos que determinan la evolución de estas islas volcánicas oceánicas. Estas condiciones marcan la existencia de un litoral de substrato rocoso compacto y de depósitos sedimentarios móviles de materiales muy gruesos, en detrimento de las playas de arena que son menos comunes. En este contexto aparecen morfologías inusuales que exhiben una dinámica sedimentaria propia, relacionada con procesos de erosión, transporte y acumulación de sedimentos costeros de gran tamaño. Un claro ejemplo son las *fajãs* detríticas con sistemas lagunares (Melo et al., 2018; Ramalho et al., 2013) rodeadas por barreras litorales de gravas y bloques, como es el caso de la Fajã da Caldeira de Santo Cristo, en la isla de São Jorge.

Este proyecto pretende analizar en detalle las dinámicas costeras en un entorno rocoso como son las playas de bloques de una barrera litoral con el uso de nuevas tecnologías. En este caso el análisis se centra en la introducción de sensores de radiofrecuencia (RFID) para la monitorización de la movilidad de bloques naturales. A partir de estos datos se busca comprender las dinámicas de transporte sedimentario presentes en el sector de estudio y estimar en detalle la tendencia de evolución costera en esta zona.

2. Área de estudio

La posición geográfica del archipiélago de Azores en el contexto de la circulación global atmosférica y oceánica, además de la influencia de la extensa masa de agua de la que emergen, marcan las condiciones climáticas del archipiélago, con consecuencias directas sobre el nivel energético y la distribución y dirección del oleaje. El régimen de oleaje se caracteriza por una altura significativa (H_s) de 1-2 m y períodos de pico (T_p) de 9-11 s (Esteves et al., 2009). La marea tiene un régimen semidiurno, incluyéndose dentro de un litoral micromareal por sus características (Borges, 2003). Son comunes los episodios de fuertes temporales marítimos que surgen de las tormentas de origen tropical llegadas de latitudes más septentrionales del Atlántico Occidental y asociadas a vientos fuertes con dirección predominantemente de NW (Rusu & Onea, 2016). No obstante, la posición septentrional del archipiélago hace que sea recurrente el paso de ciclones tropicales, los cuales otorgan un medio de transporte que asegura, con cierta regularidad, la llegada de nuevas especies a este archipiélago aislado (Ávila et al., 2018). Los datos de agitación marina marcan una altura máxima significativa de ola por encima de los 5 m durante los temporales (Esteves et al., 2009), sobrepasando ocasionalmente los 10 m (Monteiro et al., 2022).

La zona analizada se localiza en la costa norte de la isla volcánica de São Jorge, grupo central del archipiélago, en el entorno de la Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Fig. 1). Se trata de un sector costero marcado por la presencia de una *fajã* detrítica con un sistema lagunar, una morfología definida por una plataforma litoral de bajo relieve aproximadamente al nivel del mar, formada a partir de la acumulación subárea de detritos producidos por los movimientos en masa en los acantilados costeros. Delimitando la *fajã* se extiende una barrera litoral de gravas que integra una extensa playa reflectiva de sedimentos gruesos. Estas acumulaciones sedimentarias constituyen eficientes muros de protección natural ante el avance del mar. Con todo, existen sectores sujetos a una intensa erosión, lo que, junto a la sedimentación de la laguna que conduce al cierre del canal que la comunica con el mar, son factores que marcan la inestabilidad actual de la morfología de la *fãja*.

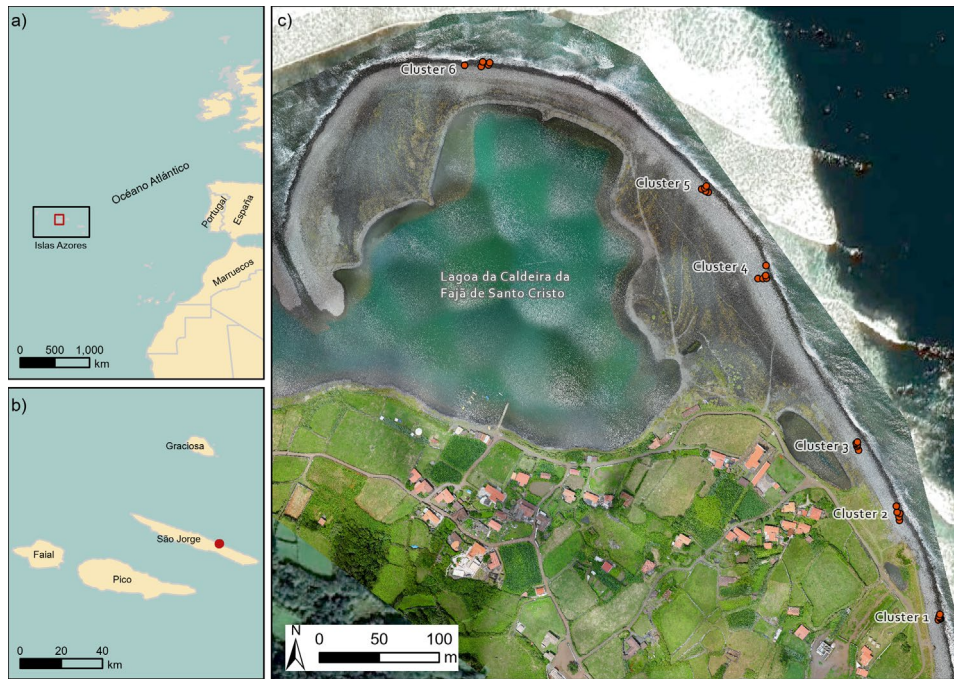


Fig. 1 Zona de estudio en (a) contexto atlántico, (b) archipiélago de las Azores y (c) Fajã da Caldeira de Santo Cristo con la localización de los sensores RFID en 2022. Fuente: Elaboración propia. Información cartográfica a) y b) Eurostat.

3. Materiales y métodos

La dinámica de los desplazamientos de bloques se ha monitorizado a través de la introducción de sensores RFID e imágenes de alta resolución. La implantación de los sensores se realizó el 19 y 20 de junio de 2022, aunque desde 2020 se han obtenido anualmente imágenes de alta resolución a través de drones, que también se han utilizado para comprender el dinamismo de este sector.

El principal componente del análisis es el empleo de sensores RFID. En este caso se han empleado los HDX PIT tags de OregonRFID con una longitud de 23 mm y un diámetro de 3.65 mm. Para completar la tarea de identificación de los sensores se empleó la antena receptora del mismo fabricante, que conectada mediante bluetooth a un smartphone permite visualizar el código único del sensor. Para registrar la posición de cada bloque se usó un equipo de posicionamiento topográfico de alta resolución GNSS, con un receptor equipado con posicionamiento cinemático relativo en tiempo real RTK de la marca Leica Geosystems, modelo CS10 con una precisión mínima de 0.05 m.

Previamente a la fase de campo, los sensores se introducen en protectores de silicona y se comprueba su código identificador. La fijación de los sensores se realizó sobre el terreno, seleccionando bloques en distintos sectores a lo largo de la playa, tratando de cubrir la mayor extensión y agrupándolos en clústeres de cinco sensores, para tratar de estimar si existen distintos patrones de desplazamiento a lo largo de la zona de estudio. En esta primera campaña se realizaron seis clústeres cuya posición se refleja en la Fig. 1.

Tras la selección del bloque a monitorizar se realiza un orificio usando un taladro, en el que se introduce el sensor y se sella con silicona. Una vez introducido el RFID se identifica su código usando la antena receptora OregonRFID, y se graba la posición con el receptor GNSS. De cara a futuros análisis de correlaciones, se realiza la medición de los tres ejes de los bloques sobre el terreno y se almacenan fotografías desde varios ángulos de todos ellos.

En la segunda campaña, desarrollada el 26/07/2023, se procedió a buscar los sensores a partir de barridos a lo largo de todo el perfil de la playa, y a posicionar, con el mismo receptor GNSS, las coordenadas de cada uno de los bloques monitorizados.

A partir de los datos recogidos en ambas campañas y con la ayuda de R *software* se procedió al análisis de los vectores de desplazamiento de cada bloque, y la relación de estos con las posibles dinámicas oceánicas. En el caso de los desplazamientos, para este análisis se ha empleado un umbral de 2 m para definir si un bloque se había desplazado. Este valor pretende evitar el registro de variaciones que pueden deberse a la posición del receptor GNSS sobre el bloque o a la incertidumbre de este.

4. Resultados

La mitad de los sensores introducidos en 2022 han sido recuperados en 2023 (15/30), de los cuales 10 han experimentado desplazamientos superiores a 2 m (Tabla 1). En los bloques recuperados que se consideraron estáticos (5) el desplazamiento medio fue de 33 cm, lo que se puede relacionar con la propia ondulación en condiciones modales en estos entornos en función del tamaño y la posición de los bloques y/o con un rápido enterramiento, siendo este uno de los elementos que deberán analizarse en detalle en futuras campañas.

Tabla 1. Principales estadísticos del desplazamiento de los bloques

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Bloques recuperados	15	Bloques con desplazamientos > 2 m (móviles)	10
Mayor desplazamiento	25.6 m	Desplazamiento medio (total/móviles)	7.7 m / 11.4 m

El desplazamiento medio durante el período analizado ha sido de 7.7 m, si bien este valor cambia bastante entre los seis clústeres en los que se divide, entre los 4.0 m y los 17.6 m de los clústeres 6 y 2 respectivamente (Fig. 2). Por su parte, el mayor desplazamiento se produjo en el Clúster 2, con los 25.6 m que varió la posición del bloque 08 que presenta unas dimensiones de 65x45x26 cm (eje mayor, intermedio y menor). Cerca de la mitad de los bloques se encontraban enterrados o parcialmente enterrados en esta campaña.

En cuanto a la orientación del desplazamiento, mayoritariamente es S-SE (media 143°), ya que siete de los 10 bloques móviles presentan orientaciones entre 106 y 152° (Tabla 2). Estos desplazamientos siguen en buena medida el perfil del litoral, con movimientos que principalmente se producen de manera paralela a la línea de costa o de forma descendente, desde elevaciones mayores en el perfil de la playa hasta el sector más próximo al mar. Una excepción es el bloque 20 (Fig. 2; Clúster 4), con un desplazamiento, ascendente en el perfil, superior a los 12 m, que se sitúa en un sector de alta recuperación de sensores, pero de baja movilidad.

Tabla 2. Orientación media del desplazamiento de los bloques por clúster

Clúster	Bloques móviles	Orientación media	Clúster	Bloques móviles	Orientación media
1	1	151	4	1	187
2	2	142	5	2	132
3	2	116	6	2	158

5. Discusión

La tasa de recuperación de los sensores (50%) ha sido similar a la observada en otros lugares como Galicia (Gómez-Pazo et al., 2021). Estas cifras son inferiores a las existentes en plataformas costeras (Hastewell et al., 2020), lo que se relaciona con su propia morfología y con la capacidad de las playas de bloques para enterrar el material, impidiendo su movimiento y lectura. La experiencia previa sugiere que parte de los bloques no localizados en esta primera campaña podrían aparecer en sucesivos años.

El análisis por sectores muestra diferencias relevantes en cuanto a las dinámicas existentes, a pesar de la similitud en la orientación de los desplazamientos en la mayoría de los casos. Esto se relaciona también con el escaso número de sensores recuperados en cada clúster (Tabla 2). El Clúster 1 se corresponde con una zona de menor recuperación, a pesar de ser un sector menos expuesto; presenta claras muestras de erosión, vinculada a la morfología de la playa sumergida, donde se estima que pueden encontrarse parte de los sensores introducidos, atendiendo a los vectores de desplazamiento de los bloques relocalizados. Los clústeres 2 y 3 presentan un transporte más intenso, con zonas

de rebase y lenguas de bloques desde la cresta, lo que propició un mayor enterramiento de los bloques con sensores, incluso de los recuperados. Además, la presencia de cantos y bloques con algas indica un transporte continuo desde zonas más profundas. También destaca el reducido desplazamiento registrado en el Clúster 6, que pese a encontrarse en la zona más expuesta, presenta una menor energía por la escasa profundidad del entorno, lo que indica un bajo hidrodinamismo. Esto se observa con claridad en el retrabajo del material fino en la zona. Las interferencias en la dirección de las olas en las proximidades de la costa parecen justificar los movimientos de bloques en sentidos opuestos. Estas direcciones para los años 2022-2023 no coinciden con las direcciones residuales de la deriva litoral inferidas por Borges (2003), en el análisis entre marzo de 1999 y abril de 2000.

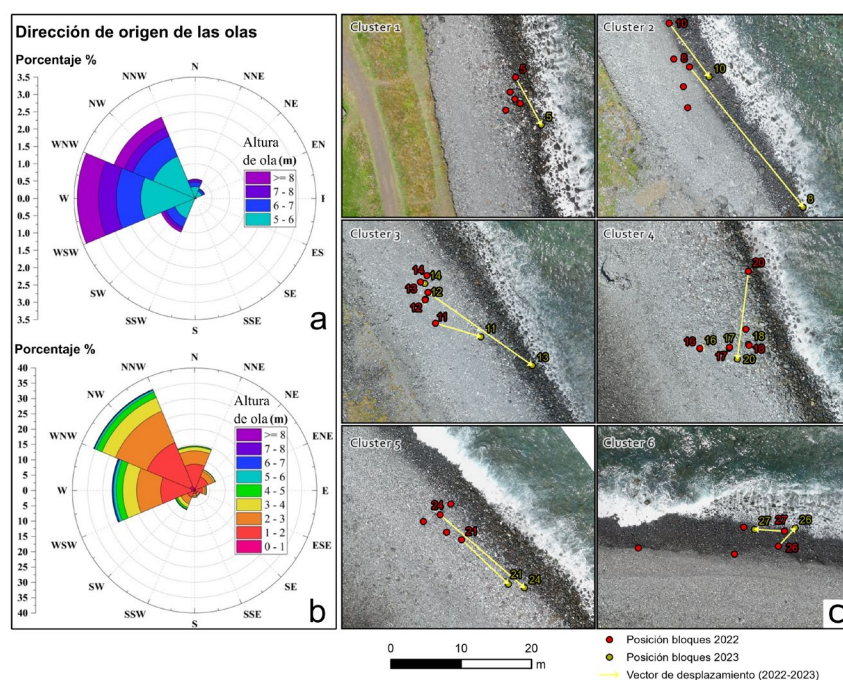


Fig. 2 Altura significativa del oleaje en Capelinhos 1989-2002. IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera (Carvalho, 2002) para (a) todas las olas y (b) olas > 5 m. (c) Vectores de desplazamiento y posición de los bloques (2022-2023) en cada clúster. Fuente: Oleaje adaptado de Zhao et al. (2019).

En esta primera aproximación al empleo de sensores RFID en São Jorge se observó la necesidad de incluir un mayor número de dispositivos, con el fin de mejorar la tasa de recuperación y tener una mayor cobertura, ampliando las zonas del sector litoral y aumentando la cantidad de sensores donde se ha logrado una tasa de recuperación menor. Por ello, durante el verano de 2023 se han instalado 40 sensores en el mismo entorno de la Fajã da Caldeira de Santo Cristo. La repetición sistemática de esta metodología contribuirá al esclarecimiento de la dinámica sedimentaria de la barrera en términos de variabilidad estacional e interanual, y a establecer las tendencias de evolución a largo plazo.

6. Conclusiones

Se ha demostrado que los RFID son una herramienta de gran utilidad para identificar patrones de desplazamiento de bloques rocosos en zonas costeras. La baja tasa de recuperación (50%) entre las dos primeras campañas pretende mejorarse en el futuro gracias a la instalación de nuevos sensores y a la mejora de los dispositivos de detección. Se ha identificado una dinámica de desplazamiento hacia el SE, que se presenta en la mayoría de los bloques, y que se relaciona perfectamente con la dirección predominante del oleaje en la región (cuadrante W-NW, Fig. 2). En algunos de los casos en los que se observa un movimiento en el perfil de playa, este parece vinculado a la acción de episodios tormentosos y el efecto de la gravedad al cesar el oleaje, además de con el posible transporte durante la resaca de la ola de los materiales que no alcanzan la cresta de la barrera.

7. Agradecimientos

Este proyecto contó con el apoyo financiero y logístico de la Câmara Municipal de Calheta de São Jorge y el Governo Regional dos Açores (M3.3B/ORG.R.C./010/2022/EDIÇÃO1). Este trabajo es una contribución al IGCP Project 725 “Forecasting Coastal Change”. S.P. Ávila reconoce su contrato M1.1.A/INFRAEST CIENT/A/001/2021 - Base de Dados da PaleoBiodiversidade da Macaronésia, financiado por el Governo Regional dos Açores, y el contrato FCT/2023.07418CEEECIND. Proyecto financiado con fondos FEDER (COMPETE), fondos nacionales, FCT (UIDB/50027/2020, POCI-01-0145-FEDER-006821, UIDB/00153/2020, LA/P/0048/2020), y del Governo Regional dos Açores (M1.1.a/005/Funcionamento-C-/2016, CIBIO-A; M3.3.B/ORG.R.C./005/2021).

8. Referencias

- Ávila, S.P., Cordeiro, R., Madeira, P., Silva, L., Medeiros, A., Rebelo, A.C., Melo, C., Neto, A.I., Haroun, R., Monteiro, A., Rijdsdijk, K., & Johnson, M.E. (2018). Global change impacts on large-scale biogeographic patterns of marine organisms on Atlantic oceanic islands. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.087>
- Borges, P. (2003). *Ambientes litorais nos grupos central e oriental do arquipélago dos Açores. Conteúdos e dinâmica de microescala*. Universidade dos Açores.
- Esteves, R., Valente, A. S., Costa, M., Reis, F. V., & Azevedo, E. B. (2009). Dados direcionais de agitação marítima nos Açores (projeto CLIMAAT - Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos). *Atas das 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., & Trenhaile, A. (2021). Tracking clast mobility using RFID sensors on a boulder beach in Galicia, NW Spain. *Geomorphology*, 373, 107514. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107514>
- Hastewell, L., Inkpen, R., Bray, M., & Schaefer, M. (2020). Quantification of contemporary storm-induced boulder transport on an intertidal shore platform using radio frequency identification technology. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.4834>
- Melo, C. S., Ramalho, R. S., Quartau, R., Hipólito, A., Gil, A., Borges, P. A., Cardigos, F., Ávila, S. P., Madeira, J., & Gaspar, J. L. (2018). Genesis and morphological evolution of coastal talus-platforms (fajãs) with lagoons: The case study of the newly-formed Fajã dos Milagres (Corvo Island, Azores). *Geomorphology*, 310, 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.006>
- Monteiro, N. M. R., Oliveira, T. C. A., Silva, P. A., & Abdolali, A. (2022). Wind-wave characterization and modeling in the Azores Archipelago. *Ocean Engineering*, 263, 112395. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112395>
- Ramalho, R. S., Quartau, R., Trenhaile, A. S., Mitchell, N. C., Woodroffe, C. D., & Ávila, S. P. (2013). Coastal evolution on volcanic oceanic islands: A complex interplay between volcanism, erosion, sedimentation, sea-level change and biogenic production. *Earth-Science Reviews*, 127, 140–170. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.007>
- Rusu, E., & Onca, F. (2016). Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands. *Renewable Energy*, 85, 687–703. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.042>
- Zhao, Z., Mitchell, N. C., Quartau, R., Tempera, F., and Briccheno, L. (2019). Submarine platform development by erosion of a Surtseyan cone at Capelinhos, Faial Island, Azores. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44: 2982–3006. <https://doi.org/10.1002/esp.4724>