

Roca Mora, M.; Davies, B.; Gernez, P.; Zoffoli, M.; Barillé, L. Arribazones de macrófitos marinos: seguimiento mediante datos de teledetección hiper- y multiespectral

Arribazones de macrófitos marinos: seguimiento mediante datos de teledetección hiper- y multiespectral

Roca Mora, Mar ¹ Davies, Bede Ffinian Rowe ^{2,3} Gernez, Pierre ² Zoffoli, Maria Laura ⁴ Barillé, Laurent ²

¹ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Departamento de Ecología y Gestión Costera, Cádiz, España

² Institut des Substances et Organismes de la Mer (ISOMer), Nantes Université, Nantes, Francia

³ MARBEC, Université de Montpellier, CNRS, Ifremer, IRD, Montpellier, Francia

⁴ Institute of Marine Sciences (ISMAR), Italian National Research Council (CNR), Trieste, Italia

ORCID: Roca Mora 0000-0001-7311-2618 Davies 0000-0001-6462-4347 Gernez 0000-0003-2055-410X Zoffoli 0000-0003-1892-0051 Barillé 0000-0001-5138-2684

Correspondencia: mar.roca@csic.es bede.ffinian.davies@ifremer.fr pierre.gernez@univ-nantes.fr marialaura.zoffoli@cnr.it laurent.barille@univ-nantes.fr

RESUMEN

Las zonas costeras han sufrido importantes alteraciones antropogénicas, lo que ha facilitado la propagación de especies exóticas invasoras, como *Rugulopteryx okamurae* en el estrecho de Gibraltar, que coloniza los fondos rocosos y crea acumulaciones masivas de biomasa a lo largo de la costa. Los macrófitos marinos, macroalgas y fanerógamas marinas, pueden crear acumulaciones de biomasa en la playa como parte de su ciclo vital natural. Sin embargo, el aumento en frecuencia y abundancia de arribazones masivos de *R. okamurae* en el sur peninsular y norte africano está provocando graves impactos ecológicos y económicos desde el inicio de la invasión en 2015. Sin embargo, actualmente no existe ningún programa de seguimiento de arribazones a nivel regional utilizando datos de teledetección. Este estudio se centra en la caracterización radiométrica de arribazones de *Zostera noltii* y *R. okamurae* para evaluar su diferenciación espectral en las distintas etapas de degradación de biomasa, relacionadas con el contenido de agua y la fotooxidación de sus pigmentos. Además, se utilizaron imágenes de satélite multiespectrales de Sentinel-2 y PlanetScope SuperDove para evaluar la capacidad espacial y espectral de monitorizar ambos tipos de arribazón, destacando la utilidad de las tres bandas red-edge, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) de Sentinel-2. Los resultados mostraron diferencias radiométricas significativas en los estadios de degradación de arribazones de ambas especies, mostrando *R. okamurae* una mayor retención de agua, pero una degradación más rápida de los pigmentos en comparación con la fanerógama marina *Z. noltii*. Esta caracterización previa es crucial para escalar un algoritmo de monitorización de arribazones de macrófitos marinos a nivel regional con el fin de mejorar la gestión operativa de esta especie marina invasora.


Palabras clave: *macroalga invasora, fanerógamas marinas, radiometría, Sentinel-2, PlanetScope*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 marzo 2026

Arribazones de macrófitos marinos: seguimiento mediante datos de teledetección hiper- y multiespectral

Roca Mora, Mar ⁽¹⁾, Davies, Bede Ffinian Rowe ^(2,3), Gernez, Pierre ⁽²⁾, Zoffoli, Maria Laura ⁽⁴⁾, Barillé, Laurent ⁽²⁾


⁽¹⁾ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Departamento de Ecología y Gestión Costera, España.

 0000-0001-7311-2618, mar.roca@csic.es


⁽²⁾ Institut des Substances et Organismes de la Mer (ISOMer), Nantes Université, Nantes, Francia.

 0000-0003-2055-410X, pierre.gernez@univ-nantes.fr ;  0000-0001-5138-2684, laurent.barille@univ-nantes.fr

⁽³⁾ MARBEC, Université de Montpellier, CNRS, Ifremer, IRD, Francia.

 0000-0001-6462-4347, bede.ffinian.davies@ifremer.fr

⁽⁴⁾ Institute of Marine Sciences (ISMAR), Italian National Research Council (CNR), Trieste, Italia.

 0000-0003-1892-0051, marialaura.zoffoli@cnr.it

Resumen: Las zonas costeras han sufrido importantes alteraciones antropogénicas, lo que ha facilitado la propagación de especies exóticas invasoras, como *Rugulopteryx okamurae* en el estrecho de Gibraltar, que coloniza los fondos rocosos y crea acumulaciones masivas de biomasa a lo largo de la costa. Los macrófitos marinos, macroalgas y fanerógamas marinas, pueden crear acumulaciones de biomasa en la playa como parte de su ciclo vital natural. Sin embargo, el aumento en frecuencia y abundancia de arribazones masivos de *R. okamurae* en el sur peninsular y norte africano está provocando graves impactos ecológicos y económicos desde el inicio de la invasión en 2015. Sin embargo, actualmente no existe ningún programa de seguimiento de arribazones a nivel regional utilizando datos de teledetección. Este estudio se centra en la caracterización radiométrica de arribazones de *Zostera noltii* y *R. okamurae* para evaluar su diferenciación espectral en las distintas etapas de degradación de biomasa, relacionadas con el contenido de agua y la fotooxidación de sus pigmentos. Además, se utilizaron imágenes de satélite multiespectrales de Sentinel-2 y PlanetScope SuperDove para evaluar la capacidad espacial y espectral de monitorizar ambos tipos de arribazón, destacando la utilidad de las tres bandas *red-edge*, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) de Sentinel-2. Los resultados mostraron diferencias radiométricas significativas en los estadios de degradación de arribazones de ambas especies, mostrando *R. okamurae* una mayor retención de agua, pero una degradación más rápida de los pigmentos en comparación con la fanerógama marina *Z. noltii*. Esta caracterización previa es crucial para escalar un algoritmo de monitorización de arribazones de macrófitos marinos a nivel regional con el fin de mejorar la gestión operativa de esta especie marina invasora.

Palabras clave: macroalga invasora, fanerógamas marinas, radiometría, Sentinel-2, PlanetScope

Marine macrophyte beachcasts: monitoring through multispectral and hyperspectral remote sensing data

Abstract: Coastal areas have undergone significant anthropogenic alterations, facilitating the spread of invasive alien species such as *Rugulopteryx okamurae* in the Strait of Gibraltar, which colonizes rocky bottoms and creates massive accumulations of biomass along the coast. Marine macrophytes, macroalgae, and seagrasses can create biomass accumulations on beaches as part of their natural life cycle. However, the increase in frequency and abundance of massive strandings of *R. okamurae* in southern Spain and North Africa has been causing serious ecological and economic impacts since the invasion began in 2015. However, there is currently no regional stranding monitoring program using remote sensing data. This study focuses on the radiometric characterization of *Zostera noltii* and *R. okamurae* strandings to evaluate their spectral differentiation at different stages of biomass degradation, related to water content and photooxidation of their pigments. In addition, multispectral satellite images from Sentinel-2 and PlanetScope SuperDove were used to evaluate the spatial and spectral capacity to monitor both

types of strandings, highlighting the usefulness of the three red-edge, near-infrared (NIR), and short-wave infrared (SWIR) bands of Sentinel-2. The results showed significant radiometric differences in the stages of degradation of the debris of both species, with *R. okamurae* showing greater water retention but faster pigment degradation compared to the marine phanerogam *Z. noltii*. This preliminary characterization is crucial for scaling up a marine macrophyte debris monitoring algorithm at the regional level in order to improve the operational management of this invasive marine species.

Keywords: invasive macroalgae, seagrass, radiometry, Sentinel-2, PlanetScope

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, la costa ha sufrido numerosas alteraciones debido a las actividades antropogénicas. En especial, el tráfico marítimo global ha derivado en la introducción de especies exóticas invasoras en el medio marino, generando graves pérdidas de biodiversidad e impactos económicos en la pesca, la acuicultura y el turismo (Katsanevakis *et al.*, 2024). Este es el caso de *Rugulopteryx okamurae*, una macroalga exótica invasora detectada por primera vez en Ceuta en 2015, la cual se ha expandido rápidamente desde el Estrecho de Gibraltar hacia el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo, situándola como la invasión más agresiva de la historia europea.

Los macrófitos marinos, incluyendo macroalgas y fanerógamas marinas, pueden generar arribazonos en playas circundantes como parte de su ciclo vital natural. Sin embargo, *R. okamurae* genera arribazonos de grandes dimensiones sin precedentes en las costas del sur peninsular, cuyas características espectrales pueden generar confusión con otros arribazonos de especies autóctonas como la *Posidonia oceanica* o la *Zostera noltii*. Además, la degradación de esta biomasa varada en la playa por la exposición a agentes atmosféricos puede cambiar sus características espectrales, siendo un ámbito muy poco estudiado a través de la teledetección, donde la caracterización hiper- y multiespectral es de gran utilidad (Davies *et al.*, 2023).

Este trabajo caracteriza la respuesta hiper- y multiespectral de dos arribazonos de *R. okamurae* y *Z. noltii* en la provincia de Cádiz (España) y el efecto de la degradación, proporcionando información clave para desarrollar métodos escalables de monitorización basados en teledetección óptica.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y especies

El estudio se realizó en la provincia de Cádiz (España), incluyendo un arribazón de la fanerógama marina *Z. noltii* (San Fernando) y otro de la macroalga invasora *R. okamurae* (Bolonia, Tarifa).

2.2. Datos hiperespectrales

2.2.1. Transectos *in situ*

Para caracterizar espectralmente ambos arribazonos en la playa, se realizaron medidas hiperespectrales mediante un radiómetro ©ASD HandHeld2 de transectos transversales a la costa (Figura 1), midiendo el

comportamiento *in situ* de la exposición atmosférica en ambas especies. En dichos arribazonos, se recogieron muestras de biomasa fresca no degradada.

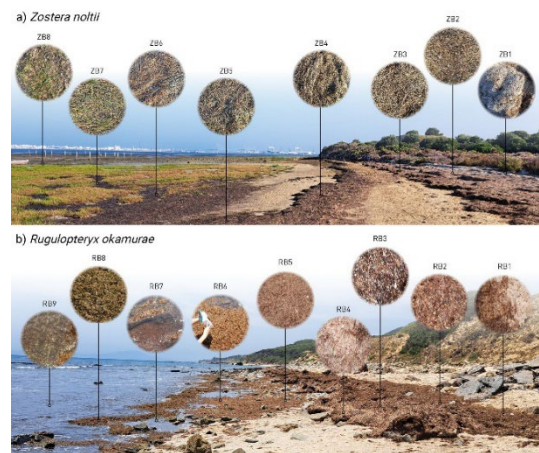


Figura 1. Transectos hiperespectrales *in situ* de los arribazonos de macrófitos marinos.

2.2.2. Experimento de laboratorio

Con la biomasa fresca, se analizó el efecto del contenido de agua en la variabilidad radiométrica de ambos arribazonos con muestras por triplicado. Las medidas radiométricas se realizaron con luz solar natural tras haber sido calibradas con un panel de calibración, y las muestras eran pesadas e introducidas en la estufa a 60 °C en intervalos de una hora las 8 primeras horas, y tras 21 y 32 horas (Figura 2).

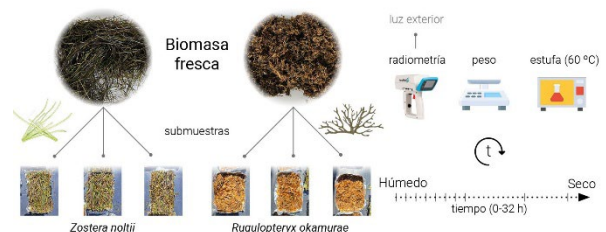


Figura 2. Esquema del experimento de laboratorio realizado con radiometría *in situ*.

2.2.3. Análisis estadístico

Con los datos hiperespectrales, se desarrollaron modelos aditivos generalizados (GAMs, del inglés) para evaluar diferencias radiométricas significativas *in situ* y en laboratorio. Para esta última, se calculó la diferencia

de reflectancia modelada ($\Delta R_{\gamma t}$) en diferentes intervalos ($R_{\gamma t}$) en comparación con el estado inicial ($R_{\gamma 0}$), donde γ representa la longitud de onda y t el intervalo de tiempo transcurrido (Eq. 1).

$$\Delta R_{\gamma t} = R_{\gamma 0} - R_{\gamma t} \quad (1)$$

2.3. Datos multispectrales

2.3.1. Sentinel-2 y PlanetScope SuperDove

Para evaluar la capacidad espacial y espectral de la teledetección óptica en la discriminación de estados de degradación de arribazones de macrofitos marinos, se utilizaron imágenes de Sentinel-2 (S2) y PlanetScope SuperDove (PSB.SD) lo más cercanas al día de muestreo (Tabla 1), con 10-20-60 y 3 metros de resolución espacial, respectivamente.

Tabla 1. Imágenes de satélite procesadas por cada arribazón y sensor cercanas al día de muestreo.

Especie/ Sensor	Sentinel-2	PlanetScope SuperDove
<i>Zostera noltii</i>	11/06/2025	12/06/2025
<i>Rugulopteryx okamurae</i>	14/06/2025	13/06/2025

2.3.2. Análisis espectral

Se desarrollaron cuatro GAMs para evaluar la capacidad teórica espectral de ambos sensores acorde al ancho de banda, y se extrajeron los datos de cada imagen acorde a cada transecto *in situ*.

3. RESULTADOS

Los GAMs con información hiperespectral de los transectos *in situ* muestran diferencias significativas entre estadios de degradación de arribazones de *R. okamurae* y *Z. noltii*, identificando la absorción de pigmentos de clorofila y fucoxantinas, así como la absorción de la señal en algas flotantes (Figura 3a).

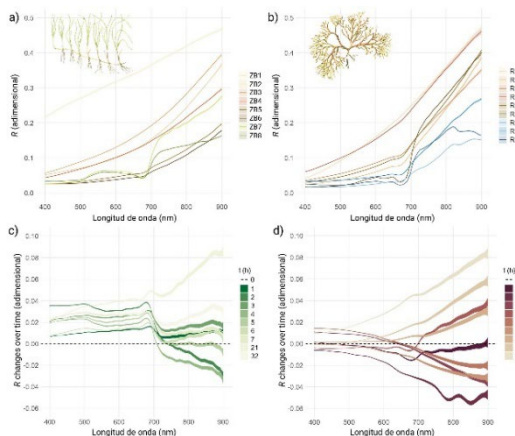


Figura 3. GAMs de transectos *in situ* y experimento de laboratorio para arribazones de *R. okamurae* y *Z. noltii*.

Además, los GAMs derivados del experimento de laboratorio muestran la variabilidad espectral en un intervalo de 32 horas respecto al tiempo cero,

observándose una mayor variabilidad en *R. okamurae* que en *Z. noltii* debido a la gran capacidad de retención de agua de dicha macroalga (Figura 3b).

Respecto a la capacidad teórica de las imágenes de satélite, los GAMs de S2 muestran ventajas en la capacidad de detección de cambios en la degradación de arribazones con las tres bandas del *red-edge* y el NIR estrecho, zona donde existe mayor variabilidad espectral, mientras que PSB.SD muestra mayores ventajas en el espectro del verde y el amarillo (Figura 4).

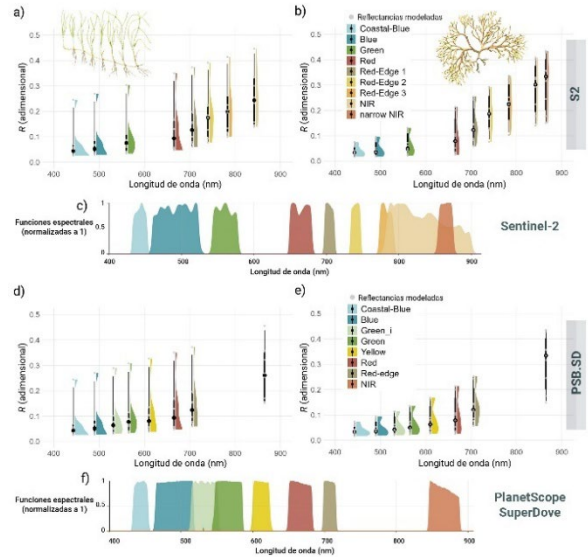


Figura 4. Variabilidad espectral de radiometría de campo agrupada en las bandas de S2 y PSB.SD.

En cuanto a la capacidad espacial, PSB.SD permite una mayor precisión en la detección de estadios degradados de biomasa respecto a S2 por sus 3 metros de resolución espacial. Sin embargo, S2 es capaz de distinguir hasta cuatro estadios de degradación, fuertemente influenciados por la distancia a la orilla del mar y a la degradación de pigmentos (Figura 5). Además, S2 ofrece las bandas del infrarrojo corto (SWIR) a 20 metros de resolución espacial, pudiendo obtener información sobre el contenido de agua de forma más precisa a correlacionar con la pérdida observada en laboratorio.

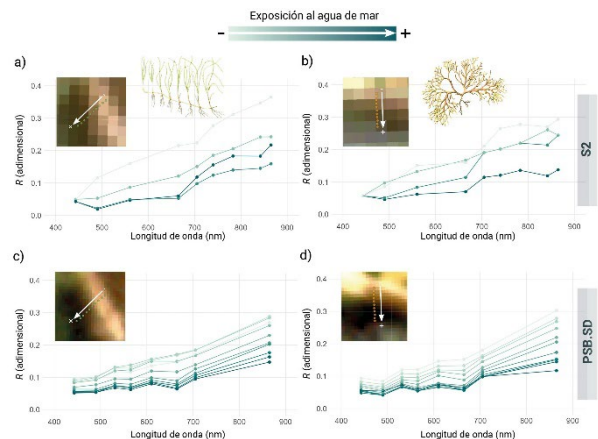


Figura 5. Reflectancia (adiimensional) de S2 y PSB.SD en los transectos de arribazones muestreados.

4. DISCUSIÓN

La caracterización radiométrica proximal de especies de macrófitos marinos es de crucial importancia para entender su comportamiento espectral en la playa y en la biomasa flotante, altamente condicionada por el contenido de agua y la fotooxidación de pigmentos. Generalmente, cuando hay una pérdida de contenido de agua, la degradación de pigmentos se intensifica, provocando una pérdida de absorción espectral en el rango del visible, *red-edge* y NIR debido a la degradación de la estructura celular (Du *et al.*, 2022). Sin embargo, *R. okamurae* mostró una rápida pérdida de pigmentos, aunque retuvo mejor el contenido de agua en comparación con la fanerógama marina *Z. noltii*. Además, el experimento de laboratorio mostró un incremento de 0.09 de reflectancia en el NIR de biomasa húmeda a seca, mientras que las imágenes de satélite mostraron una variación del 0.2, sugiriendo la acción de efectos añadidos como la fotooxidación de pigmentos y la exposición atmosférica (Pan y Holmer, 2025). Este experimento, junto con las respuestas espectrales distintivas de las dos especies *in situ*, sugiere que el seguimiento de los arribazones a lo largo del tiempo puede proporcionar información valiosa para identificar el tiempo que llevan varados en la costa.

En cuanto al uso de imágenes de satélite para escalar la monitorización de arribazones, tanto S2 como PSB.SD mostraron capacidades relevantes para detectar los diferentes estados de degradación de la biomasa marina. Mientras otros estudios han demostrado una mayor precisión en la detección de macrófitos marinos sumergidos combinando ambas fuentes (Roca-Mora *et al.*, 2026), el uso aislado de S2 muestra capacidades suficientes para desarrollar un sistema de monitorización regional con estimaciones de estado de biomasa y cobertura. Además, el uso de la banda 11 (SWIR) sugiere el potencial uso del índice normalizado de humedad (NDMI) para informar acerca de la cantidad de agua en el arribazón.

Investigaciones futuras, dentro del proyecto RugOBSS financiado por OYSTER EuroMarine y Blue-Cloud Hackathon 2025, se centrarán en la monitorización multitemporal a gran escala de las zonas invadidas para cuantificar los impactos de *R. okamurae* y las tendencias de invasión mediante el uso de computación en la nube, así como en la creación de la primera base de datos de ocurrencia y una biblioteca hiperespectral de arribazones de *R. okamurae*. Esta información será clave para cuantificar los impactos acumulados en las playas, lo que respaldará las compensaciones económicas municipales, la retirada operacional por parte de empresas de retirada de algas y la potencial valorización de esta biomasa.

5. CONCLUSIONES

Este estudio caracteriza dos arribazones de *Zostera noltii* y *Rugulopteryx okamurae* mediante radiometría de campo hiperespectral, evaluando la capacidad de distinguir diferentes estadios de degradación de la biomasa de ambas especies mediante imágenes de satélite multispectrales. Los resultados muestran una

degradación más rápida de los pigmentos y una mayor retención de agua de *R. okamurae* respecto a los arribazones de *Z. noltii*. Aunque PSB.SD proporciona una mayor resolución espacial, la mayor variabilidad espectral en estadios de degradación en el *red-edge* y NIR sitúan al satélite S2 como más adecuado para definir el estado de la biomasa varada en las playas. Sin embargo, la complejidad de la degradación y la posible mezcla espectral con otros macrófitos marinos ponen de relieve la importancia de crear una biblioteca espectral de *R. okamurae*, no pudiendo sostener su diferenciación mediante índices espectrales independientes, requiriendo de algoritmos más complejos de aprendizaje automático. Estos resultados son pioneros en la caracterización espectral de arribazones, proporcionando información útil para el desarrollo de un sistema de monitorización por satélite a escala regional.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha estado financiada por el contrato FPU020/1294 del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Espacial Francesa a través del proyecto INVASEA y el Blue-Cloud Hackathon 2025 a través del proyecto RugOBSS.

7. REFERENCIAS

- Davies, B.F.R., Gernez, P., Geraud, A., Oiry, S., Rosa, P., Zoffoli, M.L., *et al.* (2023). Multi- and hyperspectral classification of soft-bottom intertidal vegetation using a spectral library for coastal biodiversity remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 290, 113554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113554>
- Du, G., Li, X., Wang, J., Che, S., Zhong, X., and Mao, Y. (2022). Discrepancy in photosynthetic responses of the red alga *Pyropia yezoensis* to dehydration stresses under exposure to desiccation, high salinity, and high mannitol concentration. *Marine Life Science & Technology* 4(1), 10-17. doi: <https://doi.org/10.1007/s42995-021-00115-w>
- Katsanevakis, S., Zaiko, A., Olenin, S., Costello, M.J., Gallardo, B., Tricarico, E., *et al.* (2024). GuardIAS—Guarding European waters from invasive alien species. *Management of Biological Invasions* 15, 701-730. doi: <https://doi.org/10.3391/mbi.2024.15.4.14>
- Pan, Y., and Holmer, M. (2025). Seagrass and macroalgae on shores: unraveling the decomposition of beach wrack on Danish coasts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 324, 109473. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109473>
- Roca-Mora, M., Peixoto-Dias, C.E., Vivanco-Bercovich, M., Lee, C.B., Fonseca, A.L., Caballero, I., Navarro, G., Horta, P. (2026). Blending PlanetScope and Sentinel-2 imagery to assess subtidal seagrass changes in turbid waters. *Marine Pollution Bulletin* 225, 119228. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119228>