



**Dinámica de los sistemas dunares costeros ante el Cambio Global:
La necesidad de una gestión sostenible**

*Dynamics of coastal dune systems in the face of the Global Change:
The need for sustainable management*

Hernández, A. ⁽¹⁾; González-Villanueva, R. ⁽²⁾; Carballeira, R. ⁽¹⁾; Bao, R. ⁽¹⁾; Sáez, A. ⁽³⁾

(1) Universidade da Coruña, GRICA Group, Centro Interdisciplinar de Química e Bioloxía (CICA),
Facultade de Ciencias, Rúa As Carballeras, 15071, A Coruña, España. armand.hernandez@udc.es

(2) Centro de Investigación Mariña, Universidade de Vigo, XM-1, 36310 Vigo, España.

(3) Institut de Investigació UB-Geomodels. Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà.
Universitat de Barcelona. Martí i Franques s/n, 08028 Barcelona, España.

Resumen

El desarrollo y evolución de los sistemas arenosos costeros está gobernado por un frágil equilibrio dinámico entre la interacción de múltiples factores ambientales, y por ello estos sistemas naturales son altamente sensibles a las perturbaciones humanas. Estas alteraciones se acentúan en el contexto actual de Cambio Global. Los cambios en los vientos, en el oleaje, en la intensidad de las tormentas, en la disponibilidad de arena y en la vegetación juegan un papel crucial en el complejo desarrollo de las dunas, tanto por retener la arena que forma las dunas, como para protegerlas físicamente de la erosión. Actualmente, muchos de los ecosistemas dunares se encuentran degradados sobre todo por el déficit de aportes sedimentarios y la presión sobre la cubierta vegetal, fenómenos siempre muy relacionados con el impacto antrópico. El desarrollo natural de los sistemas dunares, incluida su vegetación, contribuye de forma significativa a amortiguar los efectos destructivos de los eventos climáticos extremos, incrementados durante el actual periodo de Cambio Global. Así, las dunas costeras suponen un patrimonio natural muy valioso que debe ser conservado. Aquí presentamos un trabajo de revisión sobre el estado del arte y una síntesis de factores y procesos de cara a un nuevo enfoque en la gestión costera. Al mismo tiempo, en este artículo se defiende una gestión que no interrumpa los procesos geomorfológicos que intervienen en el desarrollo natural del ecosistema dunar, y que son el soporte principal de su biodiversidad. Se demuestra que, a medio y largo plazo, una gestión respetuosa con la dinámica geológica dunar favorece tanto el mantenimiento de la biodiversidad como la conservación del paisaje costero y sus servicios ecosistémicos.

Palabras clave: geomorfología costera, sedimentos, clima, vegetación, ecosistemas, Cambio Global.



Abstract

The development and evolution of coastal sandy systems is governed by a fragile dynamic balance between the interaction of multiple environmental factors, and therefore these natural systems are highly sensitive to human disturbances. These alterations are accentuated in the current context of Global Change. Changes in winds, waves, storminess, sand availability and vegetation play a crucial role in the complex development of dunes, both by trapping the sand that forms the dunes and protecting them from erosion. Currently, many of the dune ecosystems are degraded mainly due to the deficit of sediment inputs and the pressure on vegetation cover, phenomena that are always closely related to anthropogenic impact. The natural development of dune systems, including their vegetation, contributes significantly to buffering the destructive effects of extreme weather events, which have increased during the current period of Global Change. Thus, coastal dunes represent a valuable natural heritage that must be preserved. Here we present a review of the state of the art and a synthesis of factors and processes to achieve a new approach related to the coastal management. In turn, this article argues for a management that does not interrupt the geomorphological processes involved in the natural development of the dune ecosystem, which are the main support of dune biodiversity. Thus, in the medium and long term, a management that respects the geological dynamics of the dunes will promote both the maintenance of biodiversity and the conservation of the coastal landscape and its ecosystem services.

Keywords: coastal geomorphology, sediments, climate, vegetation, ecosystems, Global Change.

1. Introducción

Es inequívoco que el Cambio Global (CG) está perturbando de forma significativa los ecosistemas naturales, repercutiendo negativamente en la humanidad y las actividades socioeconómicas relacionadas. El CG incrementa la vulnerabilidad costera como consecuencia de la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos y a la alteración de la dinámica litoral (IPCC, 2022). La resiliencia de los ecosistemas costeros como playas, arenales y dunas a escala mundial depende de las políticas de mitigación de los efectos del CG, del grado de impacto humano y de las acciones de conservación efectivas. Las decisiones y las acciones que se implementen en la próxima década condicionarán la capacidad de amortiguar las perturbaciones de los sistemas costeros frente al impacto climático. Sin embargo, muchas iniciativas dan prioridad a la reducción de los riesgos climáticos inmediatos y a corto plazo, reduciendo la oportunidad de una adaptación dinámica al CG de los sistemas costeros a medio y largo plazo. En este sentido, el in-

forme especial del IPCC sobre el estado de los océanos y la criosfera alerta de una potencial subida del nivel del mar de entre 0.3 y 1.1 m para finales de este siglo según el escenario considerado (IPCC, 2019). También se estima que los fenómenos costeros extremos como las tormentas de alta energía, históricamente poco frecuentes (uno por siglo en el pasado), serán más frecuentes y/o más probables durante este siglo (hasta al menos, una vez al año) en numerosos lugares y según todos los escenarios proyectados (IPCC, 2019; Paerl *et al.*, 2019). Por lo tanto, no hay duda que las zonas costeras se enfrentan a un incremento del nivel de peligrosidad en las próximas décadas, lo que conlleva un riesgo especialmente preocupante si tenemos en cuenta que la mayor parte de las actividades socio-económicas y de la población mundial se sitúan en la franja litoral (Neumann *et al.*, 2015).

Ante esta perspectiva, los sistemas dunares pueden ayudar a proteger físicamente las zonas costeras contra el impacto de estos fenómenos extremos (Martínez y Psuty, 2004). Los

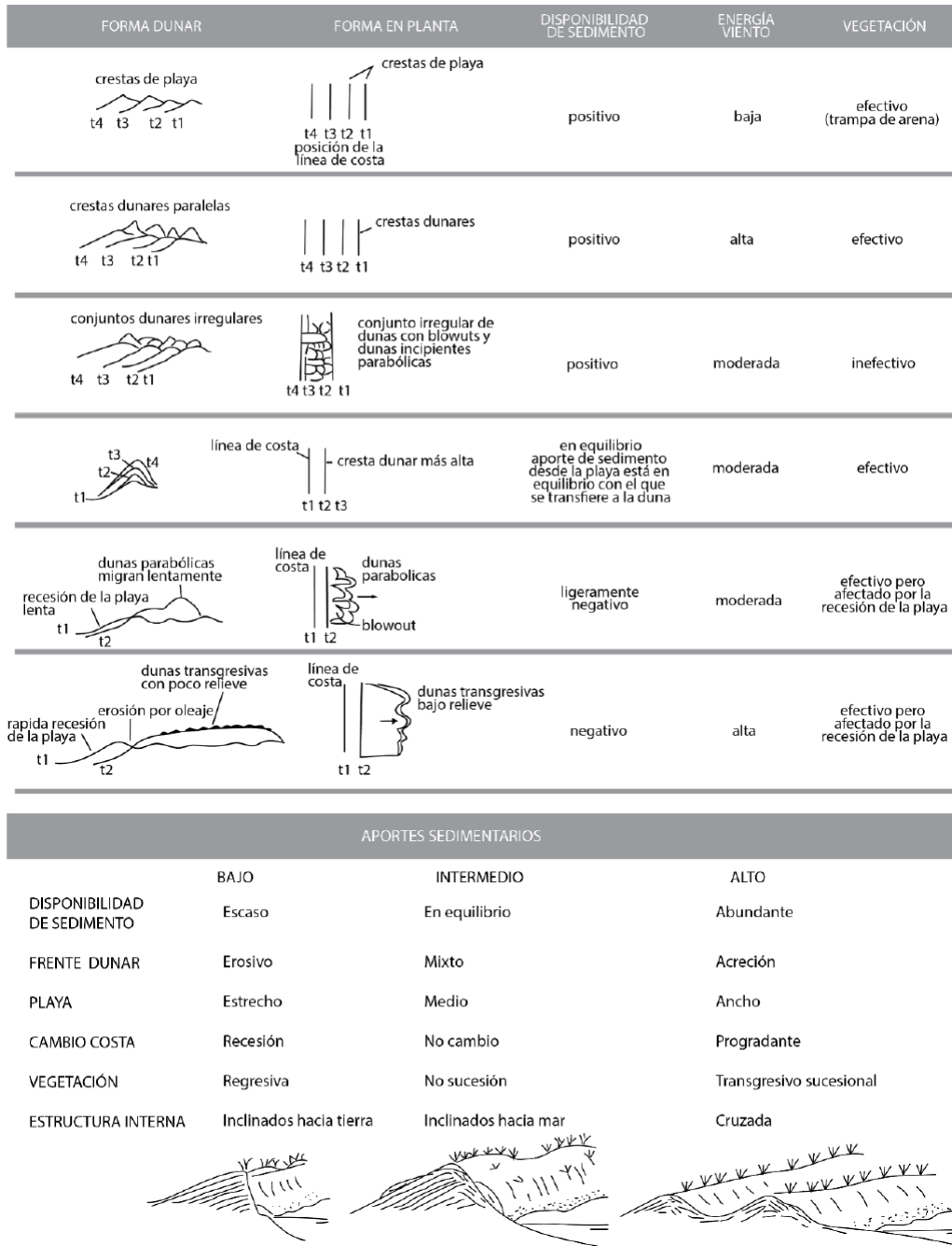


Figura 1: Arriba: Diagrama esquemático en el que se muestra la relación entre el aporte sedimentario, energía del viento, vegetación, y la morfología dunar resultante desde una situación inicial de la línea de costa (t1) al resultado final (t2, t3 o t4)(según Goudie *et al.* (1999), modificado de Pye, (1990)). Abajo: Características de los tres tipos básicos de topografía dunar costera asociada con el aporte sedimentario (bajo, intermedio y alto) (según Carter (1990), modificado de Hellemaa (1998)).

Figure 1: Top: Schematic diagram showing the relationship between sedimentary inputs, wind energy, vegetation, and the resulting dune morphology from the initial position of the shoreline (t1) to the final result (t2, t3 or t4)(after Goudie *et al.* (1999), modified from Pye (1990)). Bottom: Characteristics of the three basic types of coastal dune topography associated with sediment inputs (low, intermediate and high) (after Carter (1990), modified from Hellemaa (1998)).

procesos de acumulación y retención de arena en las costas son complejos (Fig. 1) e inicialmente se deben a un equilibrio dinámico en el que la interacción entre la deriva litoral y la costa conlleva un balance positivo en la sedimentación de arena a partir del oleaje en las franjas arenosas de playa (Packham y Willis, 1997). El crecimiento en vertical de los sedimentos arenosos puede conllevar la emersión, de forma que la arena queda expuesta a la atmósfera y al modelado por acción eólica. La pérdida de agua que se produce en el depósito al emerger facilita la disgregación de los granos de arena y su transporte. En las zonas más alejadas del mar, la disminución de la velocidad del viento, debido al mayor rozamiento con la superficie topográfica, se inicia el proceso de acumulación de la arena y la formación de las dunas en función de la geomorfología litoral, el régimen de vientos y el clima (Sherman y Bauer, 1993).

La presencia de vegetación en los sistemas dunares o la parte alta de la playa favorece la acumulación de arena en la costa, frenando el transporte eólico, haciendo que la altura y el volumen de la duna tiendan a aumentar (Goldstein *et al.*, 2017). La presencia de vegetación, si bien no es esencial para la formación de dunas costeras, tiene una influencia muy importante en su morfología. En sentido amplio, las dunas son el resultado de la interacción entre el viento y las superficies arenosas de la playa, por lo que lo que las características de ambos juegan un papel determinante en la morfología de las dunas (Fig. 1). Esta interacción se ve modulada por el propio crecimiento de la duna, la vegetación y el clima (temperatura, precipitación, viento). Además, es conocido que otros factores medioambientales también influyen en la dinámica de las dunas costeras (Fig. 2). Estos factores concretos que determinan la existencia, la morfología y la evolución de las dunas son: i) la tipología y disponibilidad del sedimento; ii) el régimen de vientos y la orien-

tación de la playa; iii) el grado de cobertura de vegetación; iv) la topografía del sustrato rocoso; y v) la posición del nivel freático y el grado de humedad ambiental (Delgado-Fernández *et al.*, 2019). Por lo tanto, para poder realizar una gestión adecuada de los sistemas dunares es necesario conocer los procesos de transporte y acumulación de la arena, sin olvidar los efectos de las actuaciones humanas sobre la costa que en muchos casos tienen un fuerte impacto sobre las dunas y los ecosistemas asociados (Doody, 2012).

Este trabajo revisa los mecanismos y procesos que intervienen en la formación y evolución de los sistemas dunares en un contexto de CG como el actual, con la finalidad de poner en valor la dinámica natural de las dunas a medio y largo plazo. También, se revisa y discute el impacto humano por medio de la gestión y restauración de estos sistemas. Para ello se alude a una perspectiva geomorfológica, ecológica, climática y de impacto humano para poder tener una visión de conjunto que pueda resultar útil para un mejor conocimiento de estos sistemas en el contexto actual de CG.

2. Factores reguladores de la dinámica dunar

2.1. Geomorfología costera y oleaje

La costa puede definirse como la franja continental que interacciona con el mar. El volumen, distribución y el tamaño de grano del sedimento arenoso que allí puedan acumularse son reflejo de las características geomorfológicas de esa costa y de la energía de las olas, que van a determinar, parcialmente, la disponibilidad de arena y su espacio de acomodación (Short, 2000). A su vez, la procedencia del oleaje dominante, según el régimen de vientos, en relación con la orientación de la línea de costa es una característica fundamental para el transporte de sedimento (Garès y Pease, 2015). Normalmente, las olas

de poca energía permiten la progradación del sistema sedimentario, mientras que las olas asociadas a mar de tormenta y/o de mayor energía son olas que erosionan la costa y generan movimiento de sedimentos hacia el mar y, por lo tanto, tienden a provocar la retrogradación del sistema (Davidson-Arnott *et al.*, 2019). El balance entre ambos procesos determinará la extensión y el desarrollo costero del sistema dunar. Las costas españolas han experimentado una mayor frecuencia de episodios extremos de alta energía como consecuencia del cambio climático durante las últimas décadas, que llegan a destruir infraestructuras de poblaciones costeras, afectando negativamente a la estabilidad y evolución de los sistemas dunares costeros (Gutiérrez-Mas *et al.*, 2009; Dissanayake *et al.*, 2015; Gómez-Pazo y Pérez-Alberti, 2017; Brown *et al.*, 2018; Guisado-Pintado y Jackson, 2019;).

Las playas, arenales y dunas se desarrollan en contextos geológicos donde se acumula arena a partir de la erosión de rocas y que posteriormente es transportada por distintos procesos superficiales (por ejemplo, fluviales, de ladera, etc.) hasta el espacio de acumulación (Arribas *et al.*, 2010). En zonas extensas de costas regulares y muy expuestas se dan amplios espacios disponibles para la acomodación y acumulación de arenas pudiendo migrar hacia tierra, a veces hasta decenas de kilómetros (Short, 2005; Gao *et al.*, 2015). En líneas de costa acantiladas y recortadas se alternan cambios bruscos en la orientación y la morfología del litoral por la sucesión de entrantes y salientes originando una sucesión alternante de formaciones entre las que se intercalan pequeñas playas (*'pocket beach'*) con reducidos sistemas dunares. En los valles, coincidiendo con la desembocadura de cursos fluviales y entre afloramientos rocosos, se forman espacios de depósito arenoso con forma normalmente triangular. Estos espacios forman bahías o "calas" en su parte exterior y, si se adentran lo suficiente en el continente,

pueden albergar lagunas costeras en su parte interior separados de la playa por barreras dunares (Sáez *et al.*, 2018). Estos espacios son favorables para el desarrollo de dunas a partir de la formación de cordones litorales, barras y/o barreras arenosas (Davis y FitzGerald, 2009).

La costa atlántica de la Península Ibérica, orientada hacia el oeste, coincide con la dirección de los vientos predominantes favoreciendo el desarrollo de grandes dunas como en el caso de la zona central de Portugal (Ponte Lira *et al.*, 2016). En la costa noroeste y norte las costas acantiladas son, sin embargo, mucho más irregulares y tienden a proteger las playas de los vientos y el oleaje (Trenhaile *et al.*, 1999; Gómez-Pazo *et al.*, 2021). Esto hace que los espacios para la formación de dunas tiendan a ser más estrechos, aunque en algún caso se puedan formar complejos dunares destacados como en el caso de Corrubedo y Carnota (Vilas *et al.* 1986; González-Villanueva *et al.*, 2011; Blanco-Chao, 2019; Pérez-Alberti *et al.*, 2021) o el de algunos estuarios de la costa cantábrica como los de Villaviciosa y Mogro (Gallego-Fernández *et al.*, 2011; Flor-Blanco y Flor, 2019; Flor *et al.*, 2019; Flor-Blanco *et al.*, 2022). En el litoral mediterráneo, las franjas dunares son más estrechas y suelen formarse en llanuras deltaicas, dando lugar a dunas más bajas y en la mayoría de los casos con gran impacto humano (Pagán *et al.*, 2016; Molina-Gil *et al.*, 2022).

En el escenario actual de CG, el ascenso del nivel del mar hace que el oleaje y las corrientes de marea afecten zonas topográficamente más elevadas, siendo frecuente que las olas desborden y superen las barreras (naturales o artificiales) impactando en los ecosistemas y asentamientos ya establecidos (Brooks *et al.*, 2016). Los valles fluviales que desembocan en el mar en costas rocosas generan localmente una topografía de bajo gradiente del sustrato rocoso que agrandan la zona afectada tanto

por el oleaje como por la acción eólica, y por tanto, favorecen el desarrollo de sistemas dunares de extensión variable (Bao *et al.*, 2007; Sáez *et al.*, 2018; Fraga-Santiago *et al.*, 2019). Paralelamente, la disminución de la cantidad de precipitación, asociada al cambio climático sobre todo en latitudes medias, y los usos de aguas continentales para actividades humanas repercuten en la erosión y en la disminución de carga de material arenoso transportado por los ríos hacia la costa, disminuyendo los aportes sedimentarios que originan y/o alimentan los sistemas de dunas costeras (Poulos y Collins, 2002; Huang, 2011).

2.2. El equilibrio entre el aporte sedimentario y la vegetación

La vegetación es uno de los principales condicionantes ambientales para el desarrollo de

las dunas costeras, tanto por atrapar la arena como por proteger sus depósitos de la erosión. Sin embargo, otros parámetros ya comentados con anterioridad (clima, topografía, sedimento) tienen el potencial de alterar los patrones de crecimiento de la vegetación (Fig. 2). Las características de las plantas (por ejemplo, la longitud y la anchura de las hojas o su capacidad de enraizar) son importantes en el inicio de una duna, y su interacción con la arena que se transporta hacia el interior desde la playa es muy variable (Innocenti *et al.*, 2021; McGuirk *et al.*, 2022). Cuando las dunas costeras están parcialmente vegetadas, se desarrolla un complejo sistema de retroalimentación positiva entre el tipo de vegetación, el flujo de arena y la morfología de las dunas (Hesp, 2011; Durán y Moore, 2013). Las dunas cubiertas de vegetación pueden estabilizarse y dejar de migrar, pero también



Figura 2: Diagrama de las relaciones habituales entre factores que pueden controlar el crecimiento de la vegetación dunar. Cabe destacar que el impacto de estos efectos combinados puede ser mayor que la suma de las contribuciones individuales. Modificada de Jackson *et al.* (2019).

Figure 2: Likely relationships envisaged between the drivers and dune vegetation growth. Note that the impact of these combined effects may be greater than the sum of the individual contributions. Modified from Jackson *et al.* (2019).

pueden seguir evolucionando y modificándose bajo la influencia de la acción del viento. El crecimiento sostenido de la vegetación y la posterior formación de suelo implica una sucesión de complejas fases evolutivas (Jones *et al.*, 2008; Miller *et al.*, 2009). La progresiva estabilización de los sistemas dunares promueve un mayor desarrollo de flora y fauna, con un incremento paulatino de la biodiversidad asociado a la sucesión ecológica.

La vegetación que cubre las dunas costeras está sometida a un fuerte estrés y perturbaciones ambientales, disponiéndose en cinturones a lo largo de los gradientes ambientales en el eje mar-continente, a causa de la salinidad, la sequía, la limitación de nutrientes, la inestabilidad del sustrato, el enterramiento de la arena, la abrasión del viento, la erosión de la línea de costa y las tormentas (Rozema *et al.*, 1985; Hesp, 1991; Maun, 2009; Gornish y Miller, 2010;). Aunque muchos estudios se han centrado en el análisis de las comunidades vegetales y en las amenazas a las que se enfrentan las poblaciones de dunas costeras, se sabe poco sobre la relación entre la composición de la comunidad vegetal y los procesos geomorfológicos (Ciccarelli *et al.*, 2012; González-Villanueva *et al.*, 2023). En el noroeste de España, se ha observado que existe una relación entre el incremento de la cubierta vegetal de las dunas, la disminución de la velocidad y un cambio en la dirección de los vientos desde aproximadamente 1945 (González-Villanueva *et al.*, 2013). Esto ha causado una disminución del régimen de tormentas y por consiguiente índices más bajos de erosión costera, posibilitando la estabilización de las dunas y una mayor colonización por parte de la vegetación en las últimas siete décadas (González-Villanueva *et al.*, 2013).

Las diversas morfologías y la evolución de las dunas costeras (Fig. 1) también son el resultado de la interacción entre la vegetación

y el sedimento. Los periodos con máximos aportes de arena hacen que las dunas crezcan y migren, favoreciendo una serie completa de comunidades vegetales, que va desde las comunidades anuales pioneras en la playa hasta las comunidades de vegetación arbustiva en la zona de la trasduna (Acosta *et al.*, 2008). Por el contrario, las costas con aporte deficitario presentan etapas de evolución interrumpidas, con periodos de erosión y recuperación, presentando los frentes de duna erosionados, inestables y careciendo de comunidades vegetales en la zona supramareal o en las dunas embrionarias (Ciccarelli *et al.*, 2012). La combinación del clima y la presión antrópica actual dan lugar a una tendencia en la reducción de aportes sedimentarios a las dunas a escala global (Luijendijk *et al.*, 2018). El resultado de esta tendencia es la estabilización del depósito arenoso favoreciendo el desarrollo sostenido de vegetación en las dunas costeras (Fig. 3). Así, la combinación y equilibrio entre la disminución de la velocidad del viento y del aporte de sedimentos, las precipitaciones, la temperatura atmosférica, el CO₂ y el suministro de nutrientes en las últimas décadas han favorecido el crecimiento de la vegetación de las dunas costeras a nivel global (Keenan *et al.*, 2016; Jackson *et al.*, 2019). El cambio en la estructura y sucesión de la vegetación que generan estos parámetros tiene el potencial de cambiar la morfología de las dunas. Un claro ejemplo es el caso de la costa del noroeste de los Estados Unidos donde a escala de decenas de años los cambios en la vegetación explicarían más del 60% de cambio en la amplitud del frente de duna (Zarnetske *et al.*, 2015). El aumento de la cubierta vegetal global y en particular de muchas de las dunas costeras en las últimas tres décadas (Zhu *et al.*, 2016; Jackson *et al.*, 2019), propicia una tendencia general de pérdida de movilidad de las dunas y una mayor estabilidad de los sistemas arenosos costeros en las últimas décadas.

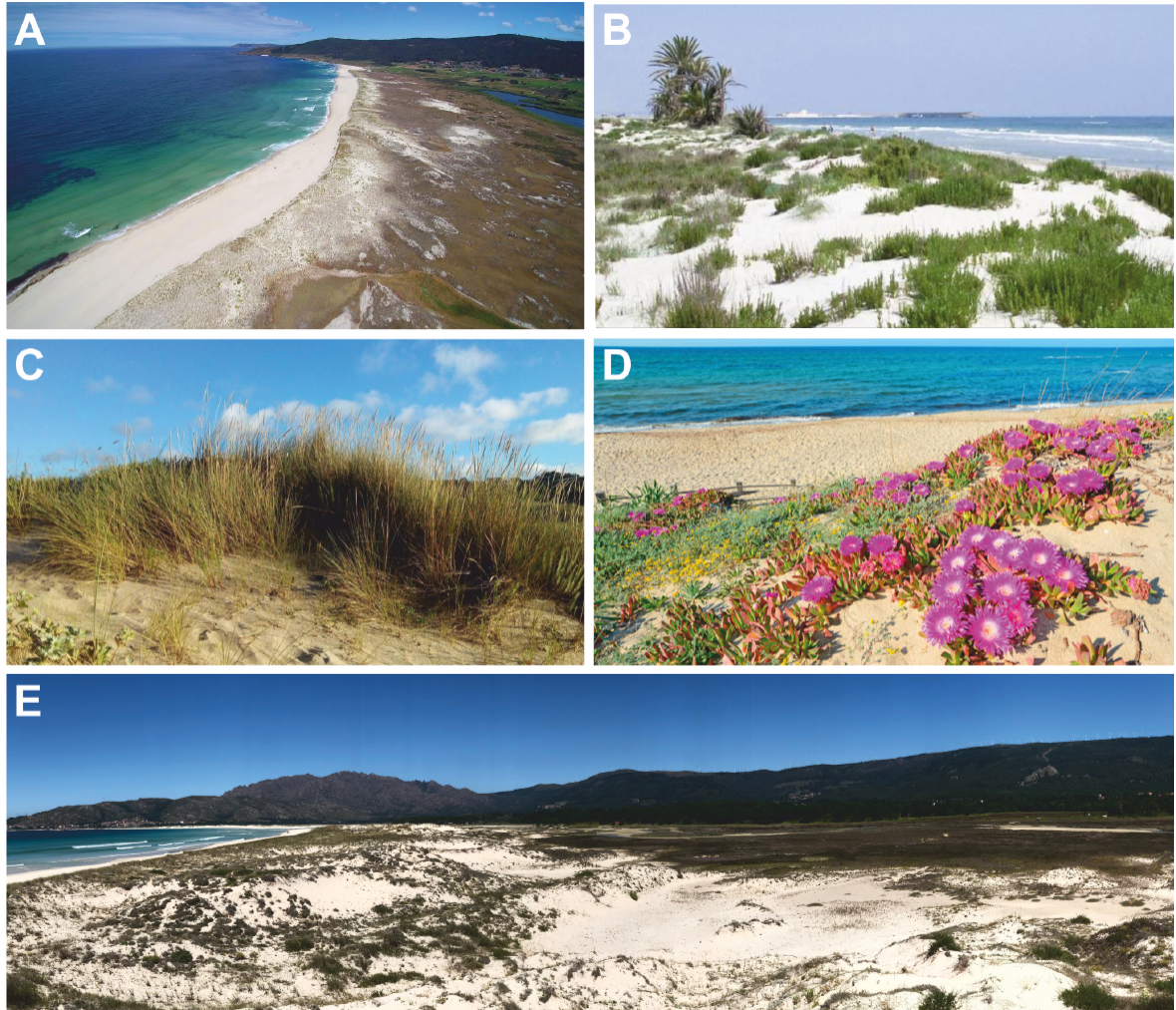


Figura 3: Distintos ejemplos y fases de vegetación dunar. A: Sistema de playa barrera de Traba (Laxe; Galicia) dónde se observa las distintas zonaciones del sistema y su vegetación. B: Vista de la vegetación dunar de la playa de Llana (San Pedro del Pinatar; Murcia) donde se observa la fuerte influencia humana en la vegetación. C: Ejemplo de especie característica (*Ammophila arenaria* (L.) Link.) de las sucesiones vegetales naturales de los sistemas dunares de la Península Ibérica. D: Ejemplo de variedad de especies característica de sistemas dunares influenciados por la gestión humana donde sobresale la especie invasora *Carpobrotus edulis* (L.) N.E. Br. E: Complejo dunar de Carnota. Nótese que en la panorámica se puede observar todo el sistema dunar desde el humedal trasbarrera hasta la línea de costa y todas sus asociaciones vegetales.

Figure 3: Different examples and phases of dune vegetation. A: Traba barrier beach system (Laxe; Galicia) showing the different zones of the system and its vegetation. B: View of the dune vegetation of Llana beach (San Pedro del Pinatar; Murcia) showing the strong human influence on the vegetation. C: Example of characteristic species (*Ammophila arenaria* (L.) Link.) of the natural plant successions of the dune systems of the Iberian Peninsula. D: Example of species variety characteristic of dune systems influenced by human management where the invasive species *Carpobrotus edulis* (L.) N.E. Br. E: Carnota dune complex. Note that in the panoramic view the entire dune system can be seen from the barrier wetland to the coastline and all its plant associations.

2.3. El clima y la vegetación dunar

Los modos de variabilidad —como por ejemplo la Oscilación del Atlántico Norte o El

Niño Oscilación del Sur (NAO y ENSO, siglas en inglés)— forman parte de la variabilidad natural del clima e inducen cambios en la precipitación, la temperatura y el régimen

de tormentas a nivel regional y global (Hernández *et al.*, 2020). Estos modos climáticos afectan, por lo tanto, a los sistemas dunares y pueden utilizarse para predecir sus cambios que pueden ser comparables en magnitud a los efectos del cambio climático antropogénico (p. ej., Scaife *et al.*, 2005; Kenyon y Hegerl, 2008; Deser *et al.*, 2012; Fereday *et al.*, 2018). Además, ya hay diversas investigaciones que también han descrito interacciones entre algunos modos de variabilidad y el cambio climático actual (Thompson *et al.*, 2011; Cai *et al.*, 2014).

Un ejemplo del impacto de estos modos de variabilidad climática es el que se produce en la costa atlántica del sector suroeste de Europa. Durante el verano, cuando el ambiente es más seco, los granos de arena quedan desagregados, al disminuir la humedad disminuye el grado de cohesión lo que facilita su transporte por los vientos favorables, que en última instancia están modulados por la combinación de los mencionados modos de variabilidad climática (González-Villanueva *et al.*, 2013; Hernández *et al.*, 2015). En consecuencia, hay combinaciones de estos modos de variabilidad que proporcionan condiciones favorables para el crecimiento o la recuperación del frente dunar (Costas *et al.*, 2012; González-Villanueva *et al.*, 2013; Costas *et al.*, 2016). En contraposición, la erosión del frente de duna está relacionada con eventos marinos extremos como las tormentas, con niveles de energía de las olas elevados, frecuentes en invierno. Estudios recientes documentan la extraordinaria serie de tormentas de alta energía en Europa occidental durante el invierno de 2013-2014, que afectó a amplias zonas costeras (Masselink *et al.*, 2016; Dodet *et al.*, 2019; Flor-Blanco *et al.*, 2021). Sin embargo, los principales modos de variabilidad climática del Atlántico Norte establecidos hasta la fecha no contribuyeron suficientemente al aumento de los niveles de energía de las olas. A partir de esta observación se

estableció un nuevo índice, la Anomalía de Presión de Europa Occidental —WEPA, siglas en inglés— (Castelle *et al.*, 2017), el cual permite representar la evolución de las olas en la costa atlántica europea. A pesar de que el conocimiento del comportamiento de estos modos de variabilidad climática es cada vez mayor, su variabilidad interna y su naturaleza no estacionaria complica su predicción (Hernández *et al.*, 2020), y por lo tanto es difícil saber cuál será su comportamiento e impacto sobre los sistemas dunares costeros en el contexto actual de CG.

Por otro lado, como ya se ha comentado, estudios previos (p. ej., Provoost *et al.*, 2011; González-Villanueva *et al.*, 2013; Jackson *et al.*, 2019) muestran que la cubierta vegetal es un factor clave, parcialmente dependiente del clima, en la evolución de las dunas costeras. Un aumento de la vegetación directamente relacionada con el CG genera una mayor estabilidad de las dunas, lo que tiene implicaciones importantes en su evolución y en el impacto de los eventos extremos (Fig. 3). Está demostrado que las dunas costeras que tienen una vegetación bien desarrollada son, como mínimo, un 30% más resilientes ante la erosión por eventos marinos extremos (Feagin *et al.*, 2015; Ajedegba *et al.*, 2019) y, por lo tanto, el aumento de la vegetación ayuda a frenar el retroceso de los sistemas dunares. Existen algunos ejemplos de estudios de la evolución de las dunas costeras de la fachada atlántica de la Península Ibérica que muestran la relación entre los cambios climáticos a lo largo del Holoceno y su relación con la vegetación y la estabilidad de dichos sistemas (p. ej. Gracia *et al.*, 2006; Costas *et al.*, 2014)

3. Los sistemas dunares como protectores de la costa

Siendo que las costas arenosas y los ecosistemas asociados son muy vulnerables a las amenazas inducidas por el CG, la presencia

de dunas costeras, físicamente resistentes a estos peligros, son cruciales para la protección de sus impactos (Rinaldo *et al.*, 2021). En cualquier contexto costero más o menos amplio, las dunas estables y fijadas por la vegetación que se puedan formar ayudan a mejorar el grado de protección estructural contra los procesos destructivos (Martínez y Psuty, 2004). Los sistemas arenosos costeros con dunas cubiertas total o parcialmente de vegetación protegen la costa de las tormentas y la erosión y ayudan a atenuar los impactos directos e indirectos del aumento del nivel del mar (Fig. 3). Así, los cambios en la vegetación observados en los campos de dunas costeros tienen un efecto amortiguador que aumentan la resistencia de la costa al impacto del CG en un grado mayor que estructuras rígidas que se puedan construir y que únicamente desvían la fuerza del oleaje. Este es un caso de retroalimentación geomorfológica y ecológica no reconocido anteriormente y mediado por el CG (Jackson *et al.*, 2019). Aun así, durante los últimos 100 años, se ha perdido casi el 50 % de los ecosistemas costeros a nivel mundial como resultado de los efectos combinados de las presiones humanas locales, el aumento del nivel del mar y los fenómenos climáticos extremos (Arkema *et al.*, 2013).

Otro factor importante a tener en cuenta son las diferencias de escala temporal en las que actúan los procesos de dinámica costera y la rápida respuesta de las barreras arenosas frente a cualquier cambio en sus condiciones de contorno o factores que modulan su evolución. Mientras que la velocidad de ascenso del nivel del mar puede cambiar a escala de siglos o milenios, un sistema costero puede registrar un ciclo sedimentario completo en referencia al cambio en la velocidad del viento y en la evolución de la cubierta vegetal (Hesp y Martínez, 2008; Clarke y Rendell, 2009), modulando a escala de entre minutos y semanas los procesos sedimentarios y erosivos. A todo ello se suma el CG que actúa a rit-

mo de décadas. Como resultado de toda esta dinámica a diferentes escalas de tiempo, las dunas costeras conforman hábitats y sistemas de protección en diversas etapas de madurez y capacidad de mitigación de impactos (Hesp, 2013; Cooper y Jackson, 2021).

4. Conservación y gestión: la protección de las dunas y de su biodiversidad

Hoy en día, los programas de adaptación a los impactos inevitables del CG, los sistemas de vigilancia y las áreas de gestión costera sostenible son prioritarios a nivel local, regional y global (Ley Vega de Seoane *et al.*, 2007). Uno de los objetivos de estos programas es fortalecer la resiliencia de las costas y entender sus particularidades en los sistemas de dunas costeras. Estos programas de gestión, a veces también de recuperación, aprovechan el conocimiento de los estudios locales (p. ej., González-Villanueva *et al.*, 2015; Costas *et al.*, 2016; Short, 2022) y de las observaciones remotas (por ejemplo, Jana *et al.*, 2014; Medina Machín *et al.*, 2019) para comprender mejor el cambio y la evolución a diferentes escalas espacio-temporales, teniendo como objetivo final mejorar la gestión de los sistemas dunares, sus usos y la planificación de las actuales y futuras infraestructuras. En consecuencia, se está prestando mucha atención a la necesidad de conservar las dunas costeras, sobre todo por los servicios ecosistémicos y de protección que prestan (Everard *et al.*, 2010; Borsje *et al.*, 2017).

Desde hace tiempo se reconoce que las interacciones humanas con las dunas costeras requieren una gestión para evitar su degradación y desestabilización (Carter *et al.*, 2007). Desde la adopción en 1993 del Convenio sobre la Biodiversidad Biológica, la conservación de la biodiversidad ha sido la práctica de gestión de los paisajes de dunas costeras más frecuente en todo el mundo. Estas políticas asumen que la estructura de la vegetación

puede cambiar debido al dinamismo natural, pero que la biodiversidad general no debe disminuir (JNCC, 2004). Otras políticas, a nivel europeo y nacional, también seleccionan especies y hábitats clave que necesitan planes de acción en función de si estas especies han sufrido un declive en años anteriores, son endémicas o están en catálogos de especies amenazadas (Duncan, 2001). Para ello se han elaborado directrices para especies dunares consideradas raras como parte de un “Programa de Recuperación de Especies” (Beebe y Denton, 1996; Moulton y Corbett, 1999).

El actual conocimiento de los procesos geodinámicos y ecológicos que actúan sobre los campos de dunas, invitan a transformar su gestión hacia formas más dinámicas y compatibles con el CG. La misma dinámica debe darse en otros entornos costeros, como las marismas, las lagunas y las playas de arena o grava. Los cambios continuos en la temperatura, la frecuencia e intensidad de las tormentas, y el nivel del mar ocurren tanto a escala local como global. El CG está afectando a las especies y a la biodiversidad en todo el planeta y la lógica apunta a la necesidad de implementar políticas para no aumentar, o mejor, minimizar, las intervenciones en los sistemas costeros para que puedan adaptarse de forma natural a las condiciones ambientales cambiantes (Cheddadi *et al.*, 2020). Si se permite que las dunas evolucionen de forma natural, existe la oportunidad de mejorar tanto la diversidad ecológica como mantener la geomorfología natural, permitiendo que las dunas costeras alcancen su mayor potencial ecológico y, por tanto, la máxima resiliencia a medida que se producen los cambios. Los gestores deben entender que los ecosistemas dunares costeros son altamente dinámicos, y los cambios de paisaje son una regla más que una excepción, por lo que las fluctuaciones naturales deben tenerse en cuenta para conservar el paisaje costero y, a su vez, la protección ante el impacto de los cada vez más

frecuentes e intensos eventos extremos en el contexto de CG.

Actualmente en muchas regiones el objetivo último y, a veces, único de la gestión de los ecosistemas dunares es maximizar la biodiversidad y preservar las especies clave (Fig. 3; JNCC, 2004), pero para ello es imprescindible la protección y conservación de los hábitats naturales en los que los organismos desarrollan su ciclo vital, en este caso los sistemas dunares costeros, como recoge a nivel europeo la Directiva Hábitats UE 92/43/CEE. Las políticas de gestión actual tienden a tener una visión estática y fija sobre los ecosistemas dunares, sin tener en cuenta las dinámicas espacio-temporales de los procesos geomorfológicos y biológicos, por lo que en ocasiones luchan contra la sucesión natural y los cambios geomorfológicos, interviniendo activamente, incluso evitando la deriva natural que sustenta los sistemas dunares costeros. Este enfoque, se puede considerar altamente intervencionista, repercutiendo artificialmente en la biodiversidad natural, así como reduciendo la resiliencia de las dunas al CG (Cooper y Jackson, 2021).

5. Consideraciones finales

La estabilización de las dunas costeras, no intervenidas por el ser humano, asociada al aumento de la cubierta vegetal observado en las últimas décadas a escala mundial y el mayor conocimiento de los efectos de los patrones climáticos sobre los complejos dunares costeros pueden amortiguar y hacer más previsibles, respectivamente, los efectos del CG. Aun así, las dunas costeras a menudo muestran respuestas complejas a las condiciones ambientales, como los cambios en el clima, en las comunidades vegetales, en la disponibilidad de sedimentos y al complejo equilibrio entre estos múltiples factores ambientales que modelan los ecosistemas dunares. Afortunadamente, la naturaleza dinámica de

las costas permite que los ecosistemas costeros persistan readaptándose a los cambios en un entorno tan variable y propenso a las perturbaciones. Como resultado, se debe considerar como fundamental el respeto y preservación de la dinámica de estos sistemas para sostener los servicios ecosistémicos y maximizar la protección de la costa. A su vez, a partir de ahora será imprescindible conocer con mucho más detalle los impactos del CG sobre los ecosistemas litorales para entender mejor los escenarios futuros y modelizar correctamente la respuesta de la costa a los mismos. Para ello, a pesar de que empiezan a surgir los primeros trabajos (p. ej., Hesp *et al.*, 2019, 2021; García-Romero *et al.*, 2021; Sanromualdo-Collado *et al.*, 2022), es urgente disponer del máximo número de datos cuantitativos sobre el crecimiento y la capacidad de captación de arena de la vegetación costera. Hasta ahora, muchos de los estudios que relacionan la influencia de la vegetación en la geomorfología de las dunas son de carácter descriptivo y cualitativo. Estos estudios registran elementos de la arquitectura vegetal y la presencia de especies en la duna, pero no hay en ellos datos cuantitativos para considerar el crecimiento y la capacidad de captación de arena de las plantas dentro del modelo de evolución costera. Esto es necesario porque las respuestas de las dunas al CG se darán, en gran medida, en función de sus comunidades vegetales.

Por lo tanto, la incorporación de una fuerte componente de monitorización con una perspectiva que integre la botánica, la ecología y la geomorfología, con una apreciación de las escalas temporales y espaciales del comportamiento del sistema a largo plazo, resulta fundamental para la comprensión de la dinámica natural de estos sistemas y paisajes costeros y el establecimiento de políticas adecuadas para su seguimiento y conservación mediante un criterio biogeomorfológico. Este enfoque más amplio resulta más necesario que nunca

en una época de rápido CG en donde resulta crucial prevenir la degradación del medio ambiente, evitar la pérdida de biodiversidad, reducir los riesgos costeros y sus impactos físicos sobre las comunidades más expuestas en las zonas costeras.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto IMPACOM (PID2019-107424RB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación. AH está financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el programa Ramón y Cajal (RYC2020-029253-I).

Referencias

- Acosta, A., Carranza, M.L., Izzi, C.F. (2008). Are there habitats that contribute best to plant species diversity in coastal dunes? *Biodiversity and Conservation*, 18(4), 1087. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9454-9>
- Ajedegba, J.O., Perotto-Baldivieso, H.L., Jones, K.D. (2019). Coastal Dune Vegetation Resilience on South Padre Island, Texas: A Spatiotemporal Evaluation of the Landscape Structure. *Journal of Coastal Research*, 35(3), 534-544. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00034.1>
- Arkema, K.K., Guannel, G., Verutes, G., Wood, S.A., Guerry, A., Ruckelshaus, M., Kareiva, P., Laca-yo, M., Silver, J.M. (2013). Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nature Climate Change*, 3(10), 913-918. <https://doi.org/10.1038/nclimate1944>
- Arribas, J., Alonso, Á., Pagés, J.L., González-Acebrón, L. (2010). Holocene transgression recorded by sand composition in the mesotidal Galician coastline (NW Spain). *The Holocene*, 20(3), 375-393. <https://doi.org/10.1177/0959683609353429>
- Bao, R., Alonso, A., Delgado, C., Pagés, J.L. (2007). Identification of the main driving mechanisms in the evolution of a small coastal wetland (Traba, Galicia, NW Spain) since its origin 5700 cal yr BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247(3), 296-312. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.10.019>

- Beebee, T., Denton, J. (Eds.). (1996). The Natterjack Toad Conservation Handbook. English Nature. Peterborough, UK. 34 pp
- Blanco-Chao, R. (2019). Beaches of Galicia. En J.A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 189-207. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_9
- Borsje, B.W., Vries, S. de, Janssen, S.K.H., Luijendijk, A.P., Vuik, V. (2017). Building with Nature as Coastal Protection Strategy in the Netherlands. En Bilkovic, D.M., Mitchell, M.M., Megan K. La Peyre, M.K., Toft, J.D. (Eds.), *Living Shorelines*, CRC Press. Boca Raton, USA, 137-155. <https://doi.org/10.1201/9781315151465-10>
- Brooks, S.M., Spencer, T., McIvor, A., Möller, I. (2016). Reconstructing and understanding the impacts of storms and surges, southern North Sea. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 855-864. <https://doi.org/10.1002/esp.3905>
- Brown, J.M., Morrissey, K., Knight, P., Prime, T.D., Almeida, L.P., Masselink, G., Bird, C.O., Dodds, D., Plater, A.J. (2018). A coastal vulnerability assessment for planning climate resilient infrastructure. *Ocean & Coastal Management*, 163, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.06.007>
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Weller, E., Wu, L., Ashok, K., Masumoto, Y., Yamagata, T. (2014). Increased frequency of extreme Indian Ocean Dipole events due to greenhouse warming. *Nature*, 510(7504), 254-258. <https://doi.org/10.1038/nature13327>
- Carter, R.W.G. (1990). The geomorphology of coastal dunes in Ireland. En Th.W. Bakker, P.D. Jungerius, J.A. Klijin (Eds.), *Dunes of the European coasts*, Catena supplement 18, 31-40.
- Carter, R.W.G., Curtis, T.G.F., Sheehy-Skeffington, M.J. (Eds.). (2007). *Coastal Dunes: Geomorphology, Ecology and Management for Conservation* (1st edition). CRC Press. Boca Raton, USA, 530 pp.
- Castelle, B., Dodet, G., Masselink, G., Scott, T. (2017). A new climate index controlling winter wave activity along the Atlantic coast of Europe: The West Europe Pressure Anomaly. *Geophysical Research Letters*, 44(3), 1384-1392. <https://doi.org/10.1002/2016GL072379>
- Cheddadi, R., Baez, S., Normand, S., Payne, D., Taberlet, P. (2020). Past plant diversity changes and future conservation issues. *Past Global Changes Magazine*, 28(1). <https://doi.org/10.22498/pages.28.1.3>
- Ciccarelli, D., Bacaro, G., Chiarucci, A. (2012). Coastline Dune Vegetation Dynamics: Evidence of No Stability. *Folia Geobotanica*, 47(3), 263-275. <https://doi.org/10.1007/s12224-011-9118-5>
- Clarke, M.L., Rendell, H.M. (2009). The impact of North Atlantic storminess on western European coasts: A review. *Quaternary International*, 195(1), 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.02.007>
- Cooper, A., Jackson, D. (2021). Dune gardening? A critical view of the contemporary coastal dune management paradigm. *Area*, 53(2), 345-352. <https://doi.org/10.1111/area.12692>
- Costas, S., Jerez, S., Trigo, R.M., Goble, R., Rebêlo, L. (2012). Sand invasion along the Portuguese coast forced by westerly shifts during cold climate events. *Quaternary Science Reviews*, 42, 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.03.008>
- Costas, S., Brito, P., FitzGerald, D., Goble, R. (2014). Climate-driven episodes of dune mobilization and barrier growth along the central coast of Portugal. *Geological Society, London, Special Publications*, 388(1), 407-427. <https://doi.org/10.1144/SP388>
- Costas, S., Naughton, F., Goble, R., Renssen, H. (2016). Windiness spells in SW Europe since the last glacial maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 436, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.023>
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B., Houser, C. (2019). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Higher Education from Cambridge University Press, Cambridge University Press, 524 pp. <https://doi.org/10.1017/9781108546126>
- Davis Jr, R.A., FitzGerald, D.M. (Eds.) (2009). *Beaches and coasts*. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ, 536 pp.
- Delgado-Fernandez, I., O'Keeffe, N., Davidson-Arnott, R.G.D. (2019). Natural and human controls on dune vegetation cover and disturbance. *Science of The Total Environment*, 672, 643-656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.494>
- Deser, C., Phillips, A.S., Tomas, R.A., Okumura, Y.M., Alexander, M.A., Capotondi, A., Scott, J.D., Kwon, Y.-O., Ohba, M. (2012). ENSO and pacific decadal variability in the community climate system model version 4. *Journal of Climate*, 25(8), 2622-2651. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00301.1>
- Dissanayake, P., Brown, J., Wisse, P., Karunarathana, H. (2015). Effects of storm clustering

- on beach/dune evolution. *Marine Geology*, 370, 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.10.010>
- Dodet, G., Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Davidson, M., Floc'h, F., Jackson, D., Suanez, S. (2019). Beach recovery from extreme storm activity during the 2013-14 winter along the Atlantic coast of Europe. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 393-401. <https://doi.org/10.1002/esp.4500>
- Doody, J.P. (2012). Sand dune conservation, management and restoration. En C.W. Finkl (Ed.). *Coastal Research Library* (Vol. 4). Springer Science & Business Media. Berlin. 324 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4731-9>
- Duncan, K. (2001). The UK Habitat Action Plan for sand dunes. In J. Houston, P.J. Rooney, S.E. Edmondson (Eds.), *Coastal dune management: Shared experience of European conservation practice*. Liverpool University Press, UK, pp. 306-315.
- Durán, O., Moore, L.J. (2013). Vegetation controls on the maximum size of coastal dunes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(43), 17217-17222. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307580110>
- Everard, M., Jones, L., Watts, B. (2010). Have we neglected the societal importance of sand dunes? An ecosystem services perspective. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 20(4), 476-487. <https://doi.org/10.1002/aqc.1114>
- Feagin, R.A., Figlus, J., Zinnert, J.C., Sigren, J., Martínez, M.L., Silva, R., Smith, W.K., Cox, D., Young, D.R., Carter, G. (2015). Going with the flow or against the grain? The promise of vegetation for protecting beaches, dunes, and barrier islands from erosion. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(4), 203-210. <https://doi.org/10.1890/140218>
- Fereday, D., Chadwick, R., Knight, J., Scaife, A.A. (2018). Atmospheric Dynamics is the Largest Source of Uncertainty in Future Winter European Rainfall. *Journal of Climate*, 31(3), 963-977. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0048.1>
- Flor, G., Flor-Blanco, G., Cedrún, P.M., Flores-Soriano, C., Borghero, C. (2019). Aeolian Dune Fields in the Coasts of Asturias and Cantabria (Spain, NW Iberian Peninsula). En J.A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 585-609. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_25
- Flor-Blanco, G., Flor, G. (2019). Cantabrian Estuaries. En J.A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 415-436. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_18
- Flor-Blanco, G., Alcántara-Carrió, J., Jackson, D.W.T., Flor, G., Flores-Soriano, C. (2021). Coastal erosion in NW Spain: Recent patterns under extreme storm wave events. *Geomorphology*, 387, 107767. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107767>
- Flor-Blanco, G., Flor, G., Pando, L. (2022). Dynamics and sedimentary assessment of a rock-bounded estuary: A case study—Tina Mayor (NW Spain, Iberian Peninsula). *Environmental Earth Sciences*, 81(13), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10471-0>
- Fraga-Santiago, P., Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., Montero, P., Otero Pérez, X.L. (2019). Trends in the Recent Evolution of Coastal Lagoons and Lakes in Galicia (NW Iberian Peninsula). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8), 272. <https://doi.org/10.3390/jmse7080272>
- Gallego-Fernández, J.B., Sánchez, I.A., Ley, C. (2011). Restoration of isolated and small coastal sand dunes on the rocky coast of northern Spain. *Ecological Engineering*, 37(11), 1822-1832. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2011.06.017>
- Gao, X., Narteau, C., Rozier, O., du Pont, S.C. (2015). Phase diagrams of dune shape and orientation depending on sand availability. *Scientific Reports*, 5(1), 14677. <https://doi.org/10.1038/srep14677>
- Garès, P.A., Pease, P. (2015). Influence of topography on wind speed over a coastal dune and blowout system at Jockey's Ridge, NC, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(7), 853-863. <https://doi.org/10.1002/esp.3670>
- Goldstein, E.B., Moore, L.J., Durán Vinent, O. (2017). Lateral vegetation growth rates exert control on coastal foredune "hummockiness" and coalescing time. *Earth Surface Dynamics*, 5(3), 417-427. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-417-2017>
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A. (2017). Vulnerabilidad de las costas de Galicia a los temporales marinos en el contexto del cambio global. *Sémata: Ciencias Sociais e Humanidades*, 29. <https://doi.org/10.15304/s.29.4210>
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., Trenhaile, A. (2021). Tracking the behavior of rocky coastal cliffs in northwestern Spain. *Environment*

- tal Earth Sciences*, 80(22), 757. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09929-4>
- González Villanueva, R., Costas, S., Pérez Arlucea, M., Alejo, I., Rial, F. (2011). Evolución del sector dunar sur del complejo de Corrubedo. *Geogaceta*, 50, 177-180. <http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/7423>
- González-Villanueva, R., Costas, S., Pérez-Arlucea, M., Jerez, S., Trigo, R. M. (2013). Impact of atmospheric circulation patterns on coastal dune dynamics, NW Spain. *Geomorphology*, 185, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.019>
- González-Villanueva, R., Pérez-Arlucea, M., Costas, S., Bao, R., Otero, X.L., Goble, R. (2015). 8000 years of environmental evolution of barrier-lagoon systems emplaced in coastal embayments (NW Iberia). *The Holocene*, 25(11), 1786-1801. <https://doi.org/10.1177/0959683615591351>
- González-Villanueva, R., Pastoriza, M., Hernández, A., Carballeira, R., Sáez, A.; Bao, R. (2023). Unbalanced effects of primary drivers on dune cover and shoreline dynamics: a model based on the Iberian Atlantic coast. *Geomorphology*, 423, 108556. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108556>
- Gornish, E.S., Miller, T.E. (2010). Effects of storm frequency on dune vegetation. *Global Change Biology*, 16(10), 2668-2675. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02144.x>
- Goudie, A.S., Livingstone, I. Stokes, S. (Eds.). (2000) *Aeolian Environments, Sediments, and Landforms*. John Wiley and Sons, New York, 336 pp.
- Gracia, J., Río, L.D., Alonso, C., Benavente, J., Anfuso, G. (2006). Historical evolution and present state of the coastal dune systems in the Atlantic coast of Cádiz (SW Spain): Palaeoclimatic and environmental implications. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 48. Coastal Geomorphology in Spain: Proceedings of the III Spanish Conference on Coastal Geomorphology, pp. 55-63.
- García-Romero, L., Hernández-Cordero, A.I., Hesp, P.A., Hernández-Calvento, L., Santana del Pino, Á. (2021). Decadal monitoring of *Traganum moquinii*'s role on foredune morphology of an human impacted arid dunefield. *Science of the Total Environment*, 758, 143802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143802>.
- Guisado-Pintado, E., Jackson, D.W.T. (2019). Coastal Impact from High-Energy Events and the Importance of Concurrent Forcing Parameters: The Cases of Storm Ophelia (2017) and Storm Hector (2018) in NW Ireland. *Frontiers in Earth Science*, 7: 190. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00190>
- Gutiérrez-Mas, J.M., Juan, C., Morales, J.A. (2009). Evidence of high-energy events in shelly layers interbedded in coastal Holocene sands in Cadiz Bay (south-west Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(6), 810-823. <https://doi.org/10.1002/esp.1770>
- Hellemaa, P. (1998). The development of coastal dunes and their vegetation in Finland. *Fennia - International Journal of Geography*, 176(1), 111-221.
- Hernández, A., Trigo, R.M., Pla-Rabes, S., Valero-Garcés, B.L., Jerez, S., Rico-Herrero, M., Vega, J.C., Jambriña-Enríquez, M., Giralt, S. (2015). Sensitivity of two Iberian lakes to North Atlantic atmospheric circulation modes. *Climate Dynamics*, 45(11), 3403-3417. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2547-8>
- Hernández, A., Martín-Puertas, C., Moffa-Sánchez, P., Moreno-Chamarro, E., Ortega, P., Blockley, S., Cobb, K.M., Comas-Bru, L., Giralt, S., Goosse, H., Luterbacher, J., Martrat, B., Muscheler, R., Parnell, A., Pla-Rabes, S., Sjolte, J., Scaife, A.A., Swingedouw, D., Wise, E., Xu, G. (2020). Modes of climate variability: Synthesis and review of proxy-based reconstructions through the Holocene. *Earth-Science Reviews*, 209, 103286. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103286>
- Hesp, P.A. (1991). Ecological processes and plant adaptations on coastal dunes. *Journal of Arid Environments*, 21(2), 165-191. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)30681-5](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)30681-5)
- Hesp, P.A. (2011). Dune Coasts. En E., Wolanski, D. McLusky, (Eds.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, pp. 193-221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00310-7>
- Hesp, P.A. (2013). Conceptual models of the evolution of transgressive dune field systems. *Geomorphology*, 199, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.014>
- Hesp, P.A., Martínez, M.L. (2008). Transverse dune trailing ridges and vegetation succession. *Geomorphology*, 99(1), 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.11.001>
- Hesp, P.A., Dong, Y., Cheng, H., Booth, J.L. (2019) Wind flow and sedimentation in artificial vegetation: Field and wind tunnel experiments. *Geomorphology*, 337, 165-182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.020>
- Hesp, P.A., Hernández-Calvento, L., Hernández-Cordero, A.I., Gallego Fernández, J.B., Gar-

- cía Romero, L., Miot da Silva, G., Ruz, M.-H. (2021) Nebkha development and sediment supply. *Science of the Total Environment*, 773, 144815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144815>
- Huang, G. (2011). Time lag between reduction of sediment supply and coastal erosion. *International Journal of Sediment Research*, 26(1), 27-35. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60073-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60073-5)
- Innocenti, R.A., Feagin, R.A., Charbonneau, B.R., Figlus, J., Lomonaco, P., Wengrove, M., Puleo, J., Huff, T.P., Rafati, Y., Hsu, T.-J., Moragues, M.V., Tsai, B., Boutton, T., Pontiki, M., Smith, J. (2021). The effects of plant structure and flow properties on the physical response of coastal dune plants to wind and wave run-up. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 261, 107556. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107556>
- IPCC (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.
- Jackson, D.W.T., Costas, S., González-Villanueva, R., Cooper, A. (2019). A global 'greening' of coastal dunes: An integrated consequence of climate change? *Global and Planetary Change*, 182, 103026. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103026>
- Jana, A., Biswas, A., Maiti, S., Bhattacharya, A. K. (2014). Shoreline changes in response to sea level rise along Digha Coast, Eastern India: An analytical approach of remote sensing, GIS and statistical techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 18(3), 145-155. <https://doi.org/10.1007/s11852-013-0297-5>
- JNCC. (2004). *Common standards monitoring guidance for sand dune habitats*: Version August 2004. Peterborough, UK: JNCC.
- Jones, M.L.M., Sowerby, A., Williams, D.L., Jones, R.E. (2008). Factors controlling soil development in sand dunes: Evidence from a coastal dune soil chronosequence. *Plant and Soil*, 307(1), 219-234. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9601-9>
- Keenan, T.F., Prentice, I.C., Canadell, J.G., Williams, C.A., Wang, H., Raupach, M., Collatz, G. J. (2016). Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Communications*, 7, 13428. <https://doi.org/10.1038/ncomms13428>
- Kenyon, J., Hegerl, G.C. (2008). Influence of Modes of Climate Variability on Global Temperature Extremes. *Journal of Climate*, 21(15), 3872-3889. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2125.1>
- Ley Vega de Seoane, C., Gallego Fernández, J.B., Vidal Pascual, C. (2007). Manual de restauración de dunas costeras. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 251 pp.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Barta, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8(1), 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Martínez, M.L., Psuty, N.P. (Eds.) (2004). *Coastal Dunes* (Ecological Studies, Vol. 171). Springer Berlin, Heidelberg. 388 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5>
- Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suarez, S., Jackson, D., Floc'h, F. (2016). Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 2135-2143. <https://doi.org/10.1002/2015GL067492>
- Maun, M.A. (2009). *The Biology of Coastal Sand Dunes*. Oxford University Press. 288 pp. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198570356.001.0001>
- McGuirk, M.T., Kennedy, D.M., Konlechner, T. (2022). The Role of Vegetation in Incipient Dune and Foredune Development and Morphology: A Review. *Journal of Coastal Research*, 38(2), 414-428. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-21-00021.1>
- Medina Machín, A., Marcello, J., Hernández-Cordero, A.I., Martín Abasolo, J., Eugenio, F. (2019). Vegetation species mapping in a coastal-dune ecosystem using high resolution satellite imagery. *GIScience & Remote Sensing*, 56(2), 210-232. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1502910>

- Miller, T.E., Gornish, E.S., Buckley, H.L. (2009). Climate and coastal dune vegetation: Disturbance, recovery, and succession. *Plant Ecology*, 206(1), 97. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9626-z>
- Molina-Gil, R., Manno, G., Re, C.L., Anfuso, G. (2022). Characterization and evolution of the beach-dune system of the Mediterranean coast of Andalusia (Spain): Influence of natural and anthropic processes. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 0, Article 0. <https://doi.org/10.18172/cig.5196>
- Moulton, N., Corbett, K. (1999). *Sand lizard conservation handbook*. English Nature. Peterborough: Northminster House, 25 pp
- Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., Nicholls, R.J. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding—A Global Assessment. *PLOS ONE*, 10(3), e0118571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Packham, J.R., Willis, A.J. 1997. *Ecology of dunes, salt marsh and shingle*. Chapman & Hall, London, 235 pp.
- Paerl, H.W., Hall, N.S., Hounshell, A.G., Luettich, R.A., Rossignol, K.L., Osburn, C.L., Bales, J. (2019). Recent increase in catastrophic tropical cyclone flooding in coastal North Carolina, USA: Long-term observations suggest a regime shift. *Scientific Reports*, 9(1), 10620. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46928-9>
- Pagán, J.I., Aragonés, L., Tenza-Abril, A.J., Pallarés, P. (2016). The influence of anthropic actions on the evolution of an urban beach: Case study of Marineta Cassiana beach, Spain. *Science of The Total Environment*, 559, 242-255. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.134>
- Pérez-Alberti, A., Gómez-Pazo, A., Otero, X.L. (2021). Natural and Anthropogenic Variations in the Large Shifting Dune in the Corrubedo Natural Park, NW Iberian Peninsula (1956-2017). *Applied Sciences*, 11(1), 34. <https://doi.org/10.3390/app11010034>
- Ponte Lira, C., Nobre Silva, A., Taborda, R., Freire de Andrade, C. (2016). Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: An integrated approach. *Earth System Science Data*, 8(1), 265-278. <https://doi.org/10.5194/essd-8-265-2016>
- Poulos, S.E., Collins, M.B. (2002). Fluvial sediment fluxes to the Mediterranean Sea: A quantitative approach and the influence of dams. En: S.J. Jones, S.J., L.E. Frostick, (Eds.). *Sediment Flux to Basins: Causes, Controls and Consequences*. Geological Society of London, Special Publications, 191(1): 227-245. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.191.01.16>
- Provoost, S., Jones, M.L.M., Edmondson, S.E. (2011). Changes in landscape and vegetation of coastal dunes in northwest Europe: A review. *Journal of Coastal Conservation*, 15(1), 207-226. <https://doi.org/10.1007/s11852-009-0068-5>
- Pye, K. (1990). Physical and human influences on coastal dune development between the Ribble and Mersey estuaries, northwest England. En K. Nordstrom, N. Psuty, R. Carter (eds), *Coastal dunes. Form and process*. Wiley, UK, pp. 339-359.
- Rinaldo, T., Ramakrishnan, K.A., Rodriguez-Iturbe, I., Durán Vinent, O. (2021). Probabilistic structure of events controlling the after-storm recovery of coastal dunes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(1), e2013254118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013254118>
- Rozema, J., Bijwaard, P., Prast, G., Broekman, R. (1985). Ecophysiological Adaptations of Coastal Halophytes from Foredues and Salt Marshes. *Vegetatio*, 62(1/3), 499-521. <https://doi.org/10.1007/BF00044777>
- Sáez, A., Carballeira, R., Pueyo, J.J., Vázquez-Loureiro, D., Leira, M., Hernández, A., Valero-Garcés, B. L., Bao, R. (2018). Formation and evolution of back-barrier perched lakes in rocky coasts: An example of a Holocene system in northwest Spain. *Sedimentology*, 65(6), 1891-1917. <https://doi.org/10.1111/sed.12451>
- Sanromualdo-Collado, A., Gallego-Fernández, J.B., Hesp, P.A., Martínez, M.L., O'Keefe, N., Ferrer-Valero, N., Hernández-Calvento, L. (2022). Environmental variables affecting an arid coastal nebkha. *Science of the Total Environment*, 815, 152868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152868>
- Scaife, A.A., Knight, J.R., Vallis, G.K., Folland, C.K. (2005). A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate. *Geophysical Research Letters*, 32(18). <https://doi.org/10.1029/2005GL023226>
- Sherman, D.J., Bauer, B.O. (1993). Dynamics of beach-dune systems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 17(4), 413-447. <https://doi.org/10.1177/030913339301700402>
- Short, A. D. (Ed.). (2000). *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley. Hoboken, NJ, 392 pp
- Short, A.D. (2005). Beaches of the Western Australian Coast: Eucla to Roebuck Bay: A guide to

- their nature, characteristics, surf and safety. Sydney University Press.
- Short, A.D. (2022). Australian beach systems: Are they at risk to climate change? *Ocean & Coastal Management*, 224, 106180. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106180>
- Thompson, D.W.J., Solomon, S., Kushner, P. J., England, M. H., Grise, K. M., Karoly, D. J. (2011). Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geoscience*, 4(11), 741-749. <https://doi.org/10.1038/ngeo1296>
- Trenhaile, A. S., Pérez Alberti, A., Martínez Cortizas, A., Costa Casais, M., Blanco Chao, R. (1999). Rock coast inheritance: An example from Galicia, northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(7), 605-621. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199907\)24:7<605:AID-ESP977>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199907)24:7<605:AID-ESP977>3.0.CO;2-1)
- Vilas, F., Arche Miralles, A., Ramos, A., Sopeña, A., Rey, L., Nombela, M.A. (1986). El complejo de playa-lagoon de Corrubedo y los submedios característicos. Galicia, NW. España. *Acta geológica hispánica*, 21(1), 233-243.
- Zarnetske, P.L., Ruggiero, P., Seabloom, E.W., Hacker, S.D. (2015). Coastal foredune evolution: The relative influence of vegetation and sand supply in the US Pacific Northwest. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(106), 20150017. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0017>
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R.B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J.G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlings-tein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T.A.M., Stocker, B.D., Viovy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S., Zeng, N. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6(8), 791-795. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>

Recibido el 3 de agosto de 2022

Aceptado el 16 de enero de 2023