Nº 69, enero-junio de 2018, pp. 119-136.
ISSN: 0213-4691. eISSN: 1989-9890.
DOI: 10.14198/INGEO2018.69.08

Investigaciones Geográficas
Instituto Interuniversitario de Geografía
Universidad de Alicante

Cita bibliográfica: Roig-Munar, F. X., Martín Prieto, J. A., Rodríguez Perea, A. & Blàzquez Salom, M. (2018). Restauración de sistemas dunares en las islas Baleares (2000-2017): una visión crítica. *Investigaciones Geográficas,* (69), 119-136. https://doi.org/10.14198/INGEO2018.69.08

Restauración de sistemas dunares en las islas Baleares (2000-2017): una visión crítica[1]

A critical view of the restoration of dune systems in the Balearic Islands (2000-2017)

Francesc Xavier Roig-Munar[2]
José Ángel Martín Prieto[3]
Antonio Rodríguez Perea[4]
Macià Blàzquez Salom[5]

Resumen

En las últimas décadas, se han aplicado a lo largo del litoral del estado español diferentes técnicas de gestión litoral con el fin de restaurar, mantener y proteger los sistemas playa-duna. Estas técnicas se han basado en la emulación artificial de los procesos naturales que favorecen la recuperación del sistema, mientras en otras se ha basado en la instalación de servicios que evitan la frecuentación y pisoteo de los sistemas dunares. La falta de criterios geomorfológicos en algunas actuaciones realizadas en las islas Baleares han generado y agravado procesos erosivos sobre aquellos que se pretendían recuperar, o bien se han fijado de forma artificial sistemas dinámicos. Este trabajo ejemplifica algunas técnicas aplicadas sin criterios geomorfológicos sobre sistemas dunares.

Palabras clave: Islas Baleares; restauración; sistemas playa-duna; gestión; erosión.

Abstract

In recent decades, different coastal management techniques have been used along the Spanish coast in order to restore, maintain and protect beach-dune systems. These techniques are based on the artificial emulation of natural processes that favour the recovery of the system, while others have been based on the setting up of services that avoid the frequenting and trampling of the dune systems. The lack of geomorphological criteria in some management activities carried out in the Balearic Islands, has caused and aggravated erosion on the systems that were supposed to be recovered, or they have artificially established those dynamic systems. This paper illustrates some techniques applied without geomorphological criteria on dune systems.

Key words: Balearic Islands; beach restoration; beach-dune system; management; erosion.

1. Introducción

El consumo del medio litoral se ha enfocado como un producto con diversidad de ofertas de ocio, persiguiendo la satisfacción de las expectativas del usuario, sin prestar atención a sus características como sistema, trasformando sus atributos naturales en un recurso económico, convirtiendo estos espa-

1 Este artículo contribuye parcialmente al desarrollo del proyecto "Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español" (CSO2015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).
2 Consultor ambiental. Carrer Carritxaret, 18-6, 07749, Es Migjorn Gran, Menorca, Islas Baleares, España. xiscoroig@gmail.com
3 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universitat de les Illes Balears, España. Consultor ambiental. Carrer Carritxaret, 18-6, 07749, Es Migjorn Gran, Menorca, Islas Baleares, España. josean33@gmail.com
4 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universitat de les Illes Balears, España. arperea2@gmail.com
5 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universitat de les Illes Balears, España. mblazquez@uib.cat

Recepción: 27/08/2017. **Aceptación:** 24/01/2018. **Publicación:** 13/06/2018.

Este trabajo se publica bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

cios dinámicos en subjetivos, relativos, funcionales y adaptados a la temporalidad del mercado turístico litoral (Yepes y Medina, 2005). Las dunas costeras representan sistemas morfológicos frágiles y dinámicos fundamentales para el equilibrio del litoral arenoso, proporcionando funciones de protección contra la erosión y siendo importantes sistemas ecológicos. Sin embargo estas morfologías están ubicadas en entornos frágiles amenazados por factores naturales y humanos, con procesos de degradación que suponen la pérdida de sus valores geoambientales y de los bienes y servicios que representa el ecosistema.

En los últimos años se toma conciencia del constante deterioro de los ecosistemas naturales, entre los que destacan los sistemas litorales. La estabilidad y equilibrio de las morfologías dunares quedan determinadas por diferentes factores, como el suministro de arena, la tasa de transporte sedimentario (Delgado-Fernández, 2011), las fuerzas del oleaje y el viento (Walker, Hesp, Davidson-Arnott y Ollerhead, 2006), el estado de la playa a largo plazo (Davidson-Arnott, MacQuarrie y Aagaard, 2005), la ocurrencia y la magnitud de tormentas, y la vegetación (Miot da Silva, Hesp, Peixoto, y Dillenburg, 2008). El impacto humano sobre estas morfologías ha sido ampliamente estudiado y descrito, apuntando las causas de degradación al desarrollo turístico masivo, a la construcción de paseos marítimos, a una elevada presión antrópica, a la instalación de servicios y a medidas incorrectas que generan impactos (Carter, 1988; Nordstrom, 2008; Gómez-Piña, Muñoz-Pérez, Ramírez y Ley, 2002).

Para paliar estos procesos, focalizados en la pérdida de playas, morfologías y vegetación, se han aplicado históricamente estrategias de adaptación mediante la gestión y/o defensa de la costa, que han condicionado su evolución a lo largo de las últimas décadas (Lithgow *et al*,. 2013). Según Roig-Munar (2011) las actuaciones de carácter intervencionista están determinadas por las condiciones genéticas de cada espacio, destacando:

1.- Actuaciones duras, se trata de estructuras que tienen por objetivo resistir la energía del oleaje, como escolleras y espigones, con el objetivo de retener sedimento y evitar la erosión de la costa.

2.- Actuaciones blandas, que según Charlier y De Meyer (1989) se basan en el "respeto" al medio ambiente, como son las regeneraciones artificiales de playas. Este método, denominado suave por los ingenieros, genera impactos de tipo erosivo en las zonas de préstamo, ya sea zonas sumergidas o emergidas, y un impacto que genera desequilibrios en la zona de actuación (Rodríguez-Perea, Servera y Martín-Prieto, 2000).

3.- Actuaciones sostenibles, basadas en emular los procesos naturales del sistema. El objetivo final es la restauración del equilibrio dinámico entre la playa emergida y el sector dunar, que sólo tendrán éxito en espacios que permitan el desarrollo de morfologías dunares y colonización vegetal, sin aportación de material sedimentario exógeno (Roig-Munar, Rodríguez-Perea, Martín-Prieto y Pons, 2009). Las actuaciones sostenibles son las más adecuadas para preservar y recuperar el sistema playa-duna, aunque socioeconómicamente pueden ser complejas de implementar, ya que requieren amplios espacios donde recuperar morfologías y tiempos prolongados en su restauración.

La principal fuente de ingresos de las islas Baleares proviene de la actividad turística, que en el año 2014 supuso el 44.8% del PIB balear, con un total de 12.003 millones de € y un gasto público del 14.9% (IMPACTUR, 2014). Esta actividad se concentra en su litoral arenoso, playas, calas y sistemas playa-duna, representando un importante recurso económico, donde se generan impactos ambientales. El desconocimiento de su dinámica natural por parte de gestores, públicos y privados, ha dado lugar a actuaciones agresivas sobre el medio, alterando estos frágiles y dinámicos ecosistemas. A este factor hay que sumar las diferentes administraciones en la planificación, ordenación y gestión, lo que dificulta la aplicación de criterios adaptados a cada sistema (Pons, 2015).

1.1. Descripción general de los sistemas playa-duna en las islas baleares

A grandes rasgos la estructura general de los sistemas playa-duna de Baleares comprende desde la zona sumergida hasta la parte emergida (figura 1), y pueden describirse basándose en cinco zonificaciones, descritas por Servera (1997), Rodríguez-Perea *et al.* (2000) y Balaguer y Roig-Munar (2016).

1.1.1. Zona sumergida

Se diferencia el sector distal, el más profundo y lejano de la línea de costa (-40 m aproximadamente) donde se desarrollan las praderas de fanerógamas marinas (*Posidonia oceanica*), y el sector proximal, el

más cercano a la línea de costa y donde se produce una redistribución y transporte del sedimento hacia la playa emergida. Es una zona de elevado dinamismo y fragilidad, caracterizada por la formación de barras sumergidas, donde se inician los procesos de intercambio sedimentario para asegurar el mantenimiento del sistema playa-duna. El origen del sedimento es un factor condicionante en los sistemas dunares de Baleares, donde las praderas de Posidonia juegan un importante papel en la producción de sedimento, con más de un 80 % de origen biológico (Rodríguez-Perea *et al.*, 2000). Es por tanto necesario mantener las condiciones ambientales que permiten el desarrollo de estas en la zona de transferencia de sedimentos entre playa sumergida y playa emergida, ya que constituyen una de las variables principales a tener en cuenta en la gestión.

1.1.2. Zona de playa

La zona de playa es el área comúnmente más frecuentada, y es donde se suelen llevar a cabo buena parte de las acciones de gestión y mantenimiento para asegurar un buen estado para el uso y disfrute de los usuarios (Balaguer y Roig-Munar, 2016). Es la zona que manifiesta de manera más visible el balance sedimentario del área sumergida con los sectores emergidos (Woodroffe, 2002), y en ella se diferencia el sector de playa baja y la playa alta (figura 1). La playa baja presenta una alternancia de procesos marinos y eólicos, mientras que su sector alto se caracteriza por un dominio de procesos eólicos y de acumulación, solo afectada por la dinámica marina durante episodios de oleaje de régimen extraordinario. En este sector aparecen las primeras formas eólicas de carácter efímero (dunas embrionarias) con vegetación pionera.

1.1.3. Zona del primer cordón dunar, foredune

Es el área posterior a la playa alta y es la zona en la que se pueden observar las primeras formaciones dunares permanentes debido a que el sedimento es atrapado por la vegetación herbácea. Cualquier alteración de su cobertura vegetal puede provocar su rápida desestabilización y erosión, dando lugar a lóbulos de deflación o *blowouts* (Hesp, 2002). Estas formas dunares, en tanto que reservorios de sedimento, pueden asegurar el equilibrio de la playa en episodios de fuertes temporales y cuando las olas alcancen su base, permitiendo de forma natural la recuperación de la superficie de la playa (Mir-Gual y Pons, 2011). También amortiguan la fuerza del viento y reducen el transporte de spray marino hacia el interior del sistema, favoreciendo el desarrollo de vegetación arbórea en la parte posterior.

1.1.4. Zona de dunas móviles y semiestabilizadas

Tras las dunas del primer cordón dunar y separadas por una depresión interdunar, *runnel*, se encuentran las dunas móviles del sistema. Estas se van fijando hacia el interior por la vegetación, configurando la zona de dunas semiestabilizadas, donde las condiciones para el crecimiento vegetal son más adecuadas y el desarrollo de la vegetación permite la creación de una capa de humus que contribuye a la formación del suelo. La extensión de esta zona no es uniforme y suele estar condicionada al estado de conservación/degradación del primer cordón dunar (Hesp, 1988) y a la topografía del terreno, de ello depende el desarrollo de diferentes tipos de morfologías en Baleares (Servera, 1997).

1.1.5. Zona de dunas estabilizadas

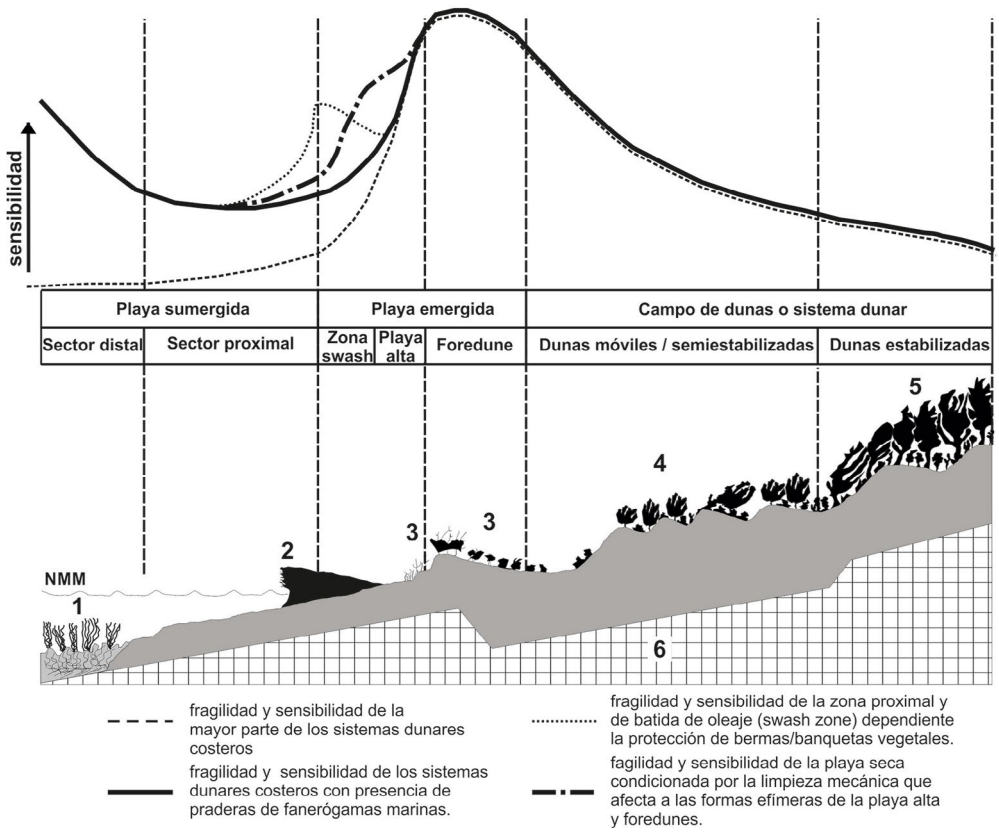
La creación de suelo aumenta a medida que se adentran tierra adentro, donde los procesos de deflación eólica son menores, y las dunas se encuentran estabilizadas por vegetación de porte arbustivo y arbóreo. Hay poca aportación de arena y esta solo tiene lugar durante episodios de fuertes vientos, o condicionado al estado ambiental del frente dunar (Lynch, Jackson, y Cooper, 2010). Frecuentemente la vegetación de estas zonas en Baleares está conformada por la acción humana, asociadas a procesos de siembra y reforestación (Mayol, 2006).

Basándonos en estas cinco zonificaciones (figura 1) los modelos de interacción playa-duna pueden ser herramientas evaluables para los gestores en aras de aplicar estrategias de gestión. En este sentido Short y Hesp (1982) estudiaron la interacción playa-duna con énfasis en la morfodinámica y en su respuesta a la energía del viento y oleaje. Los modelos de Psuty (1990) proporcionaron un punto de partida para identificar las variables más importantes como el suministro de sedimento entre playa-duna para predecir el comportamiento de las *foredunes*. Hesp (2002) realizó una clasificación morfoecológica basada

en los diferentes estados de conservación de la *foredune*, donde el estadio 1 representa máxima estabilidad y naturalidad mientras que el estadio 5 representa la erosión con tendencia a la desaparición del sistema dunar delantero. Sin embargo este conocimiento está lejos de ser utilizado por los responsables en la gestión y planificación litoral que se centran más en aspectos socioeconómicos (Ariza *et al.*, 2010). No tener presente estas interacciones puede conducir a una mala gestión, donde los problemas de erosión se agravan de forma continuada a lo largo del tiempo, presentando dificultades para mantener el estado natural los sistemas playa-duna (Rodríguez-Perea *et al.*, 2000; Roig-Munar, 2011).

El grado de sensibilidad morfodinámica de los sistemas playa-duna presenta diferentes sectores de interrelación (figura 1) y sobre cada uno pueden darse una serie de medidas que afectan la estabilidad del sistema en conjunto. Estos puntos de sensibilidad han sido definidos a partir de las afectaciones asociadas a una incorrecta gestión sobre ellos. La primera curva de sensibilidad, y asociada a los sistemas playa-duna de Baleares, fue descrita por Rodríguez-Perea *et al.* (2000), y se sitúa sobre las praderas de *Posidonia oceanica* como hábitat productor de sedimento, estabilizador de la playa sumergida y disipador de la energía del oleaje. La segunda curva de sensibilidad, establecida por Roig-Munar y Martín-Prieto (2005), se sitúa sobre las bermas acumuladas de *Posidonia oceanica* sobre el *swash*, por su importancia como sector de transferencia sedimentaria entre los sectores emergido y sumergido, como aporte de sedimentos y aporte de materia orgánica entre la playa y las comunidades vegetales dunares, básicas para la estabilización, así como elemento amortiguador de la fuerza de los temporales. Las retirada mecánica de estas bermas dan lugar a la erosión continua del sistema playa. La tercera curva de sensibilizad se encuentra sobre la playa emergida, donde las actuaciones mecánicas de limpieza afectan a las morfologías efímeras de playa alta y a la desestabilización de taludes en los frentes dunares (Roig-Munar, 2004). La cuarta de las curvas se sitúa sobre los primeros cordones dunares, que define su debilitación, erosión y/o desaparición del conjunto playa-duna (Brown y McLachan, 1990; Rodríguez-Perea *et al.*, 2000) y que se ve afectada por la urbanización, por la frecuentación de usuarios, por la presencia de servicios sobre el sistema y por la degradación de la vegetación dunar.

Figura 1. Sectores de la playa-duna y sus diferentes grados de sensibilidad geoambiental



Fuente: Balaguer y Roig-Munar (2016), modificada de Roig-Munar (2004), Rodríguez-Perea et al. (2000) y Brown y McLachan (1990).

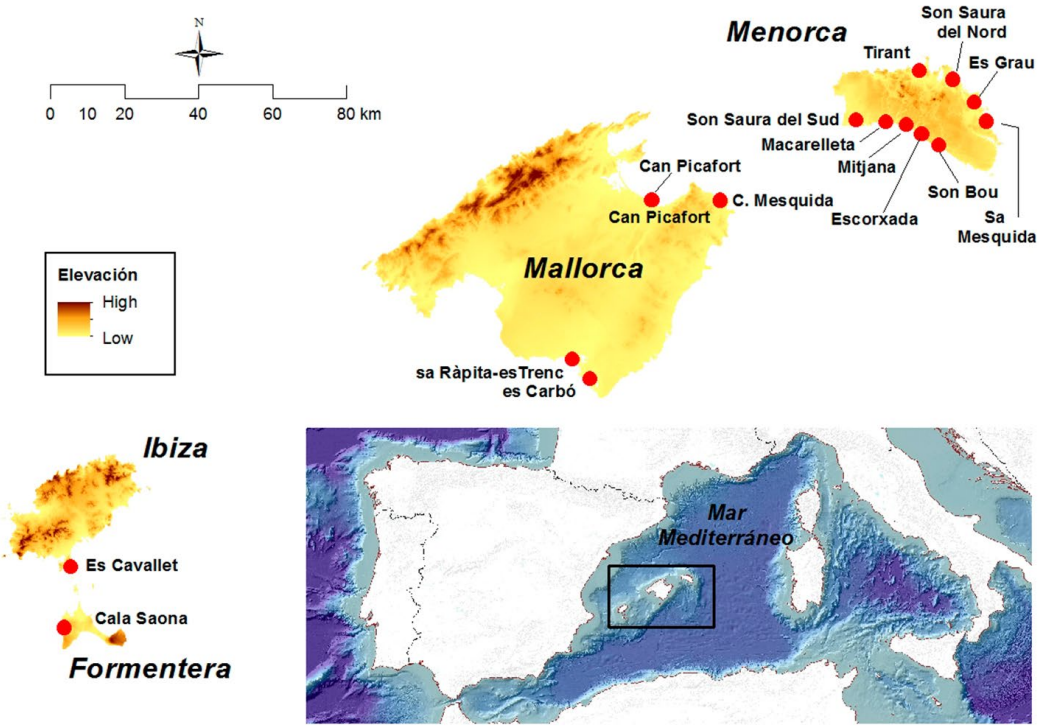
De esta manera es posible diferenciar cuatro puntos críticos en el grado de sensibilidad del perfil playa-duna, siendo el sector dunar delantero el que da lugar a la estabilidad del conjunto (Hesp, 2002; Mir-Gual y Pons, 2011). No tener presentes estos puntos ha supuesto pérdidas de superficies y volúmenes de playa y duna, e incluso su desaparición. Revertir estas tendencias mediante actuaciones basadas en la aplicación de criterios geomorfológicos permite la recuperación del sistema, pero actuar sin criterios adaptados a cada espacio puede agravar los procesos erosivos que se pretenden paliar. En este sentido el objetivo de este trabajo es la evaluación de diferentes técnicas de gestión sobre los sistemas dunares de las islas Baleares.

2. Metodología

Desde la aprobación en 2002 de la Recomendación Europea sobre la Gestión Integrada de la Zonas Costeras (2002/413/CE), tanto la administración estatal, como las administraciones autonómicas con competencias en el litoral, han desarrollado políticas de gestión litoral integrada. A partir de esta recomendación, el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) elaboró un documento que recoge los elementos clave que definen la estrategia para implantar un modelo de gestión basado en principios, objetivos e instrumentos fijados por la Unión Europea a través de su recomendación (MMA, 2005).

A lo largo de las últimas décadas se han aplicado diferentes tipos de actuaciones en el litoral español (Gallego-Fernández, Sánchez, y Ley, 2011; Gómez-Piña *et al.*, 2002) con el fin de restaurar sistemas playa-duna. Sin embargo, la falta de criterios geomorfológicos en la aplicación de estas técnicas ha generado procesos erosivos sobre aquellos sistemas que se pretendían restaurar y/o recuperar. La restauración de dunas debe tener en cuenta la escala espacial y temporal de su evolución, sus diferentes morfologías, estructuras y funciones (Boak y Turner 2005; Martín-Prieto, Roig-Munar, Rodríguez-Perea y Pons, 2010), con un enfoque local en los planes de restauración (Gallego-Fernández *et al.*, 2011), adaptado a las características geomorfológicas de cada espacio de actuación teniendo en cuenta sus sectores morfológicos clave (Roig-Munar *et al.*, 2009). A pesar de ser conocidas las causas que originan los procesos erosivos y las consecuencias negativas de estas en los frentes dunares, la corrección de estos procesos es reciente, y en muchas ocasiones las medidas son deficientes sin tener presentes las características de cada espacio.

Figura 2. Localización de los sistemas dunares con actuaciones llevadas a cabo en las islas Baleares valoradas en este trabajo



Elaboración propia.

Los métodos que permiten la restauración, estabilización, recuperación y rehabilitación de sistemas dunares mediante procesos naturales se centran en diferentes técnicas de actuación y protección, siendo las más empleadas las trampas de interferencia eólica, las pasarelas elevadas sobre dunas, los cerramientos perimetrales de frentes dunares, la eliminación del uso recreativo sobre dunas y/o la revegetación, dando resultados satisfactorios en las últimas décadas (Gómez-Piña *et al.*, 2002; Lithgow *et al.*, 2013). Se trata de actuaciones poco costosas en las que la inversión económica realizada es pequeña en relación con los resultados que se obtienen (Roig-Munar *et al.*, 2009). Las técnicas de restauración dunar han de ser realizadas previo análisis de la evolución espacio-temporal del sistema, siendo la estrategia de restauración la identificación de los impactos, las causas y los efectos, así como los elementos naturales y/o antrópicos que favorecen su erosión (Hesp y Walker, 2012). La implantación de medidas correctoras y protectoras sirven para paliar, reducir y evitar el incremento de procesos erosivos.

Tabla 1. Cuadro sinoptico de las medidas de restauración aplicadas en los frentes dunares de los sistemas dunares de las islas Baleares y las propuestas realizadas en el Manual

Técnicas de restauración dunar aplicadas sobre el sistema dunar delantero	
Barreras de interferencia eólica	Técnica que consiste en emular, mediante materiales naturales, el papel que ejercen las comunidades vegetales pioneras de frente dunar. La acumulación de arena se produce debido a la reducción en la velocidad del viento en el área próxima a la barrera (Miller, Thetford y Yager, 2001), permitiendo el depósito del sedimento a sotavento y barlovento de la barrera con estimaciones de entre 5 y 10 veces su altura. Su uso representa un bajo coste, facilidad de instalación, gran eficiencia en la formación artificial de depósitos arenosos y facilidad para controlar las tasas de erosión y/o deposición. La influencia de las trampas en un régimen de vientos local dependerá de las condiciones que incluyen el flujo de entrada, la topografía local y el tipo de sedimento (Ellis y Sherman, 2013). Ley *et al.* (2007) proponen el uso de tres tipos de barreras: captadores de mimbre, de espartina y de tablas, para utilizar en diferentes tipologías de gestión dunar y proponiendo su mantenimiento una vez que los captadores hayan sido sobresedimentados o deteriorados para valorar la ubicación de nuevas barreras sobre formas recuperadas.
Revegetación	La pérdida de cobertura vegetal es una de las causas de desestabilización y causante de movilizaciones de arena hacia el interior del sistema, creando morfologías erosivas que progradantes hacia tierra. De forma natural estas morfologías erosivas son estabilizadas mediante recolonización en sus estadios erosivos incipientes (Martínez, Hesp y Gallego-Fernández, 2011). En sistemas con elevados índices de erosión, se opta por la revegetación artificial para acelerar el proceso de sellado, con el objeto de recuperar la cubierta vegetal del frente dunar. Ley *et al.* (2007) proponen las tareas de siembra previo estudio de las características de la vegetación del entorno, las diferencias en la disponibilidad sedimentaria y en la estabilidad del substrato, que imponen diferencias en la distribución de especies (García-Mora Gallego-Fernández y García-Novo, 1999).
Cerramientos	Una de las causas en la degradación y desaparición de la cubierta vegetal es el pisoteo sobre la vegetación o el uso de las dunas como áreas de reposo, para evitarlo se precisa la instalación de cerramientos para proteger y limitar la afluencia de visitantes (Acosta, Jucker, Prisco y Santoro, 2011). Existen muchos tipos de cerramiento para proteger los cordones dunares en función de la presión que soportan y de la estética que se pretenda conseguir (Miller *et al.*, 2001). Ley *et al.* (2007) proponen tres tipos de cerramientos; cerramientos de madera y valla metálica, de madera y de madera y cuerda.
Pasarelas	Las pasarelas tienen por objeto facilitar a los usuarios el acceso a la playa con el objeto de evitar daños por pisoteo y fragmentación del sistema. Los sistemas más recomendables para evitar estos procesos consisten en pasarelas de madera elevadas sobre el sustrato y soportadas mediante pilones, ya que al quedar un espacio suficiente entre la estructura y la duna se permite el transporte eólico y la colonización vegetal. Ley *et al.* (2007) proponen cuatro tipos de pasarelas; pasarelas de madera llanas sin barandilla, de madera llanas con barandilla, de madera en escalera con barandilla y de madera adaptadas a discapacitados físicos.
Mantenimiento	Según Ley *et al.* (2007) las obras de restauración dunar sostenible necesitan, a diferencia de la obra civil, un tiempo a partir de la ejecución durante el cual van actuando los procesos naturales, influenciados por múltiples factores que determinan procesos no siempre predecibles. Estos factores condicionan el éxito y la homogeneidad de los resultados. En períodos estivales la afluencia de visitantes puede incrementar los deterioros de las instalaciones, lo que conlleva la necesidad de prever tareas de mantenimiento y reparación que garanticen la viabilidad. Las labores de mantenimiento consisten fundamentalmente en controlar y la evolución y desarrollo de la restauración, manteniendo unas condiciones de conservación y dinámica adecuadas. Es necesario realizar un continuado seguimiento del estado de los captadores de arena durante su fase funcional, y del estado general de conservación de las instalaciones como pasarelas o cerramiento, reparando los desperfectos en la medida que puedan surgir. Ley *et al.*, (2007) considera que anualmente se producen deterioros en aproximadamente el 10% de las labores de restauración realizadas.

Fuente: Basado y ampliado de Ley *et al.*, 2007. Elaboración propia.

La Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) elaboró el *Manual restauración sostenible de los sistemas-playa-duna* (Ley, Gallego-Fernández y Vidal, 2007). El Manual se basa en experiencias de gestión sostenibles realizadas a nivel estatal, con el objetivo de dotar de información necesaria que permitiera proponer medidas y técnicas para conseguir la recuperación de los ecosistemas dunares degradados o destruidos, y cuya meta era la recuperación de sus valores intrínsecos, elementos bióticos y abióticos y la restauración de su funcionamiento y dinámica (tabla 1).

El Manual en ningún momento cita la necesidad de limitar, regular o definir los criterios que afectan la playa alta y la zona de batida de oleaje (figura 1), como son las retiradas de restos de fanerógamas marinas o las limpiezas mecánicas en toda la extensión de playa. Estas tareas afectan al sector de intercambio sedimentario entre playa y duna, así como al equilibrio por la erradicación de morfologías efímeras y vegetación asociada. Desde el año 2004, previo al Manual, se han realizado actuaciones en diferentes sistemas playa-duna de Baleares siguiendo las técnicas propuestas en la tabla 1.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar la gestión realizada a lo largo de las últimas décadas sobre el sector de dunas delanteras (figura 1) en diferentes sistemas dunares de Baleares por parte del MAGRAMA (figura 2), valorando sus consecuencias geomorfológicas y su evolución temporal a partir de la clasificación morfoecológica de Hesp (2002). Las fuentes utilizadas se basan en el trabajo de campo realizado en diferentes campañas realizadas por los autores en los sistemas analizados (figura 2) entre los años 2000 y 2017. El trabajo describe y analiza diferentes técnicas de restauración llevadas a cabo en 15 sistemas dunares (figura 2) todos ellos con actuaciones consideradas sostenibles sobre la curva de sensibilidad del sistema dunar delantero (figura 1) y valorando las técnicas y recomendaciones del Manual (tabla 1).

Una vez expuestos los resultados se analizará la evolución de los 15 sistemas dunares delanteros a partir de la clasificación morfoecológica de Hesp (2002). Esta clasificación está basada en el trabajo de Hesp (1988), que estableció cinco estadios morfoecológicos de *foredunes* basandose en Carter (1988) y Arens y Wiersma (1994), valorando las *foredunes* de acuerdo a su estado de acreción, estabilidad y/o erosión en respuesta a diferentes factores ambientales. Según Hesp (2002) es poco probable que un estadio 5 pueda migrar a un estadio 1 en condiciones naturales, sin embargo sí es razonable esperar que un estadio 5 pueda regresar al 4 si las condiciones ambientales son adecuadas, con un posible avance hacia un estadio 3. En los estadios 1, 2 y 3, las *foredunes* continúan formándose lentamente mientras que la etapa 5 es altamente erosiva con tendencia a desaparecer.

3. Resultados

Se realizan las valoraciones cualitativas, acompañadas de imágenes, de las diferentes técnicas de gestión sostenible aplicadas en los sistemas dunares de Baleares (figura 2) a partir de cada técnica aplicada por el MAGRAMA y descrita en la tabla 1. Así mismo se realiza una descripción de las consecuencias geomorfológicas sobre el sistema objeto de actuación.

3.1. Barreras de interferencia eólica

La recuperación y estabilización de dunas utilizando barreras artificiales es una técnica ampliamente desarrollada en todo el mundo y con resultados contrastados (Lithgow *et al.*, 2013). Esto se debe principalmente a varias causas: es un método que proporciona flexibilidad, es económico, es reutilizable y posteriormente puede ser estabilizado e integrado en el medio. Esta técnica se ha utilizado desde la Edad Media en países como Dinamarca o Inglaterra, sin embargo no es hasta las décadas de 1950 y de 1960 cuando se utiliza en las costas americanas, holandesas y británicas (Grafals-Soto y Nordstrom, 2009). En España esta técnica se ha empleado en los litorales de Huelva, Cádiz, Valencia, Cataluña, Galicia y Baleares, obteniendo resultados dispares entre ellos. Esto se debe a la falta de un detallado análisis previo de cada sistema, y a la aplicación de técnicas estandarizadas contempladas en el Manual y no adaptadas a las características geoambientales del espaio, hechos que han conllevado a la falta de resultados esperados.

Son varios los sistemas playa-duna del litoral balear en los que se ha empleado esta técnica (figura 2), algunos con resultados positivos, sin embargo y a pesar de estos éxitos parciales, el fracaso también ha estado presente, básicamente debido a:

1.- Falta de caracterización geomorfológica y eólica de cada área, básica para realizar una gestión de interferencia eólica adecuada con finalidad de recuperación. En la figura 3 se pueden observar algunos

ejemplos en la instalación de barreras de retención eólica. Estas actuaciones lejos de favorecer la retención sedimentaria y la recuperación de morfologías dunares delanteras han dado lugar a distorsiones eólicas que han agravado en algunos casos el estado erosivo del sistema. Se presentan ejemplos que muestran la gestión dunar sin aplicación de criterios adaptados a las particularidades del medio gestionado. En la figura 3 A se observa una actuación en cala Macarelleta (Menorca) con la instalación de una barrera de altura superior a las morfologías dunares a recuperar, sin apenas porosidad, con el método de zig-zag aplicable solo a espacios muy dinámicos y con varios vientos dominantes, y la instalación de barreras sobre morfologías erosivas internas de *foredune*, consolidando de este modo los procesos erosivos. En la figura 3 B se puede apreciar una doble barrera sobre la playa de Ca'n Picafort (Mallorca) con una insuficiente separación entre ellas y la instalación de otra barrera al pie de la *foredune,* afectando a las morfologías efímeras de playa alta. En este caso no se han regido por la evolución temporal de la línea dunar delantera, ni se prioriza la recuperación de su frente, aplicando métodos sobre el sistema de playa alta que interfieren la llegada de sedimento óptimo para la recuperación del frente dunar.

En la figura 3 C puede verse como la instalación de una barrera eólica en el frente dunar de sa Rápita y es Trenc (Mallorca) no siguió la continuidad lineal de la *foredune* en su estado natural. Esta instalación de barreras favorece la continuidad de procesos erosivos de dunas delanteras y su migración hacia el interior del sistema alcanzando las dunas semiestabilizadas e incrementando, a corto plazo, la superficie de playa en detrimento de la *foredune*. En la figura 3 D, es Cavallet (Eivissa), se realizó un parcelamiento mediante barreras de interferencia en el interior del sistema dunar erosionado. No se actuó en el frente dunar, permitiendo la consolidación de morfologías *blowout* de tipo regresivo, previas a la actuación, así como el adose de las nuevas morfologías dunares delanteras al frente de las trampas ubicadas en el interior de las cubetas de deflación.

Figura 3. Ejemplos que muestran una gestión dunar con trampas de interferencia eólica sin criterios técnicos ni estudios de dinámica eólica y sedimentaria del sistema

A: Cala Macarelleta (Menorca) trampas superiores a la forma a recuperar. B: Ca'n Picafort (Mallorca) secuencias de trampeo que no permiten la creación de formas efímeras. C: Es Trenc (Mallorca), ubicación de trampas en los sectores erosionados de foredune. D: Es Cavallet (Eivissa), parcelaciones dentro del sector de morfologías erosivas internas del sistema.

Fotografías de los autores.

2.- La falta de seguimiento y mantenimiento es uno de los aspectos que más se repiten a lo largo de los sistemas analizados. Esto puede llevar a crear distorsiones eólicas que causan efectos erosivos no deseados sobre los sistemas que inicialmente tenían que ser recuperados. La presencia de elementos deteriorados

sobre el sistema da lugar a la creación de morfologías erosivas incipientes, que con el paso del tiempo, y favorecido por la dinámica eólica, genera procesos de reactivación de morfologías erosivas aparentemente gestionadas. En la figura 4 se presentan dos ejemplos que muestran la falta de mantenimiento en algunos sistemas dunares, creando cuerpos sólidos por abandono que favorecen la distorsión eólica asociada a estos obstáculos. En la figura 4 A, en la playa de es Trenc (Mallorca), se muestra el deterioro de los materiales empleados para la recuperación del sistema dunar delantero, trampas de interferencia y barreras disuasorias que debido a la falta de mantenimiento dejan de ser funcionales, pasando a ser elementos erosivos. En la figura 4 B, en la playa de es Carbó (Mallorca), un arenal natural de baja frecuentación y donde no era necesaria ninguna actuación debido a su buen estado de conservación, se instalaron trampas de interferencia que no han sido revisadas y que inician procesos erosivos sobre un frente dunar delantero inicialmente estable.

Figura 4. Ejemplos que muestran la falta de mantenimiento de las instacaciones

A: playa de es Trenc (Mallorca). B: playa de es Carbó (Mallorca), convietiéndose estas instalaciones en elementos que favorecen procesos erosivos en el frente dunar.

Fotografías de los autores.

De las actuaciones realizadas sobre estos sistemas se puede concluir que no se han seguido las medidas y tipologías de trampeo prupuestas por Ley *et al.* (2007). Se ha observado que en las actuaciones realizadas en Baleares no ha habido un análisis detallado del estado primigenio ni la utilización de materiales, ubicación, orientaciónones o potencias adecuadas de trampas, no dando resultados inicialmente previstos, como se observa en las figuras 3 y 4. Cabe destacar que las tareas de gestión y reposición de materiales se han realizado en todos los casos entre los meses de abril y mayo, sin mantener las instalaciones en los períodos de máxina influencia eólica y baja frecuentación en invierno.

3.2. Revegetación

Esta técnica, recientemente extendida en Baleares, se ha llevado a cabo fundamentalmente en cala Mesquida (Mallorca) y sa Mesquida (Menorca), con un resultado positivo en algunos sectores del sistema dunar gracias a la estabilización de morfologías creadas mediante trampas barrera, pero con resultados negativos en otros sectores por no crear formas previas. La falta de mantenimiento sumada al nulo control de cabras sobre las morfologías revegetadas, que eliminan las plántulas de los sistemas restaurados y afectan a la estabilidad del sistema, no favorecen el éxito de la medida en cala Mesquida (figura 5 A). En el caso de sa Mesquida, la solución adoptada fue la roturación del sistema de playa alta y la siembra de *Amophila arenaria* sobre el sector correspondiente al sistema dunar delantero desaparecido, sin previa creación de morfologías delanteras. El resultado fue la compactación del suelo y la creación de concreciones carbonatadas debido a la fijación de la vegetación sobre un sustrato compuesto por un sedimento mayoritariamente carbonatado. Este proceso impidió la retención de sedimento y generó la creación de morfologías incipientes en la parte posterior de la siembra, alterando su perfil natural (figura 5 B).

Actualmente la práctica de revegetación se extiende en muchas tareas de restauración, lo que lleva en ocasiones a la fijación de los procesos dinámicos del sistema, a una disminución de la biodiversidad e incluso a la reintroducción de especies alóctonas, favoreciendo una excesiva estabilidad de los sistemas

playa-duna. En este caso, no se han seguido las recomendaciones del Manual, no realizando tareas previas de ganancias sedimentarias, para la creación de formas dunares.

Figura 5. Ejemplos de tareas de revegetación dunar

A: Presencia de cabras remoneando la *Ammophila arenaria*, favoreciendo la erosión del sistema delantero, donde se aprecia una falta de mantenimiento (Cala Mesquida, Mallorca). B: Revegetación de la playa de sa Mesquida (Menorca) con la creación de morfologías dunares en la parte posterior de la actuación.

Fotografías de los autores.

3.3. Cerramientos

La colocación de estacas unidas mediante cuerdas para impedir el paso de usuarios hacia el interior de los sistemas permite una recuperación lenta pero progresiva de morfologías dunares y su vegetación asociada. En aquellos casos de recuperación del frente dunar, se ha llegado a avanzar el cerramiento hacia la playa para recuperar estas morfologías en su posición original. Cabe destacar que algunas actuaciones han sido de carácter regresivo ya que se realizan sin criterios adecuados, no siguiendo la línea original de contacto entre playa y duna, forzando la recuperación de dunas más allá de su situación original, hecho que conlleva a la erosión del conjunto del sistema dunar delantero. En la figura 6 A, se puede observar como la falta de criterio técnico basado en el Manual dio lugar a una protección sectorial, en lugar de centrarse en el conjunto del sistema playa-duna. Se acotaron zonas por las que el vallado cruzaba dunas móviles, dejando el resto del sistema sin proteger, favoreciendo el pisoteo y la fragmentación. En el segundo ejemplo (figura 6 B) se muestra como el vallado se sitúa detrás de la barrera, hecho que pone de manifiesto el desconocimiento de la dinámica del conjunto y la funcionalidad de cada una de las técnicas aplicadas.

Figura 6. Ejemplos que muestran errores en los cerramientos ejecutados en el sistema playa-duna de es Trenc (Mallorca)

A: Cerramiento que fragmenta la duna interior semiestabilizada. B: Actuación sectorial de cerramiento ubicado detrás de la barrera de interferencia eólica.

Fotografías de los autores.

3.4. Pasarelas

Las pasarelas tienen por objetivo concentrar los flujos de usuarios sobre morfologías dunares. Estas pasarelas deben ser ubicadas y alzadas sobre el sistema dunar en caso de no existir más alternativas de acceso a las playas y siempre con criterios de elevación y orientación. Se puede observar algunos ejemplos de pasarelas instaladas en Baleares, es el caso de son Saura del Nord (Menorca) (figura 7 A), donde se construyó la pasarela sin tener en cuenta la dinámica eólica, al situarla sobre un sustrato arenoso correspondiente a una morfología erosiva *blowout* progradante tierra adentro con valores de avance de 2,5 m anuales (Roig-Munar, Comas-Lamarca, Martín-Prieto y Rodíguez-Perea, 2006). El resultado fue que en pocos meses quedó parcialmente enterrada en algunos tramos y descalzada en otros debido a la aceleración del flujo eólico, ya que la pasarela está orientada hacia el viento dominante, la Tramuntana, facilitando su canalización, e incrementando los flujos eólicos en el interior del sistema con avances de lóbulos dinámicos y el descalce de taludes laterales.

La construcción de una pasarela sobre la *foredune* de son Bou (Menorca) (figura 7 B), supone una actuación que aumenta los procesos erosivos y acentúa la fragmentación del sistema dunar interno debido al uso del propio sustrato como acceso, favoreciendo el pisoteo de la vegetación, la compactación y la removilización sobre un sector dunar que presentaba un buen estado de conservación. La ubicación de pasarelas sobre morfologías dunares parcialmente estables genera más impactos que los que se pretendían corregir, como es el caso de cala Mitjana (fig. 7 C) o Escorxada (Menorca), donde la infraestructura genera procesos erosivos en sus bases, formando morfologías *blowout* que fragmentan el sistema estable.

Figura 7. Ejemplos que muestran errores de instalación de pasarelas en diferentes sistemas dunares

A: Instalación de una pasarela sin tener presente la dirección del viento dominante (Son Saura del Nord, Menorca). B: Pasarela costruida sobre la foredune estable (Son Bou, Menorca). C: Pasarela que fragmenta el cordón dunar, generando procesos de deflación en sus bases. (Cala Mitjana, Menorca).

Fotografías de los autores.

3.5. Mantenimiento y seguimiento

En las obras de restauración dunar los efectos no se manifiestan inmediatamente, sino que se necesita un cierto tiempo para que los captadores actúen y se establezca una relación equilibrada entre la nueva morfología y la colonización vegetal. Estas particularidades introducen un componente elástico que es necesario abordar para perfeccionar y optimizar las técnicas utilizadas. Para ello se requiere la realización de seguimientos desde el comienzo de la actuación y con continuidad estacional o anual; ya que durante la etapa posterior de restauración es fundamental para comprender los procesos y mejorar las técnicas de gestión. El seguimiento permite una visión objetiva y crítica de los objetivos establecidos y de los resultados obtenidos en las actuaciones, así como la respuesta de los sistemas dunares. Con esta finalidad se hace necesario elaborar un índice de vulnerabilidad específico (Williams *et al.*, 2001), que debe contar con variables geomorfológicas de uso y gestión (Roig-Munar *et al.*, 2006).

Algunas de estas medidas de mantenimiento van acompañadas de cartelería sobre la restauración dunar o la prohibición de acceso sobre el sistema. Si estas están mal ubicadas o bien quedan inmersas dentro de las morfologías dunares recuperadas, como es el caso de la figura 8 A y B llegan a generar nuevos procesos erosivos sobre la duna recuperada.

Figura 8. Ejemplos de incorrectas ubicaciones de cartelería enunciativa de restauración dunar

A: Cartel dentro del runnel del sistema dunar de Tirant (Menorca). B: Cartelería dentro de caminos en fase de restauración del sistema dunar de Son Saura del Sud (Menorca).

Fotografías de los autores.

3.6. Actuaciones pasivas

En algunos sistemas dunares las actuaciones se han basado exclusivamente en el control de usuarios y la limitación o eliminación de las actuaciones mecanizadas en los frentes dunares y playa aérea. Estas medidas se focalizan en la instalación de cordones disuasorios en el frente dunar siguiendo la línea de costa a partir de la fotografía aérea de 1956. Los casos de es Grau y cala Saona son ejemplos de intervención pasiva, sin uso de medidas mediante trampas y revegetación. En estos ejemplos, se elaboró un programa de seguimiento y mantenimiento que permitió la corrección de procesos erosivos asociados al sistema o a fenómenos naturales que lo afectan. En casos puntuales de retirada de restos de *Posidonia oceanica* ha sido incorporada al sistema dunar aportando sedimento intercalado y materia orgánica que facilita el desarrollo de vegetación natural (Roig-Munar *et al.*, 2009). La instalación de cordones disuasorios, junto a la restricción de la limpieza mecánica y la retirada de *Posidonia oceanica* han invertido en estos dos sistemas su tendencia regresiva.

El resultado ha sido la recuperación de morfologías erosivas y un incremento de la superficie vegetal de forma natural, además de un aumento del volumen de la *foredune*. Se puede observar en la figura 9 A y B como el sistema dunar delantero de ambas calas se ha estabilizado con recolonización de vegetación psammófila, con ganancias sedimentarias sin necesidad de intervenciones mediante barreras, hecho que ha supuesto el adelanto progresivo de la línea de cordones disuasorios para recuperar la primogénita línea de *foredune*. Un ejemplo similar se dio en cala Mitjana, pero en este caso la instalación de la pasarela una

vez recuperado el frente dunar, ha generado la fragmentación del sistema mediante procesos erosivos en su base (figura 7C).

Figura 9. Estabiización natural del sistema dunar delantero mediante cerramientos y restricción de actuaciones mecanizadas

A: Sistema de es Grau (Menorca). B: sistema de cala Saona (Formentera).

Fotografías de los autores.

4. Discusión de los resultados

A partir de los resultados expuestos en el apartado anterior, se analiza la evolución de los 15 sistemas dunares delanteros a partir de la clasificación morfoecológica de Hesp (2002).

Las medidas obtenidas para cada área analizada, por años y por sistema, determinan la evolución y la tendencia asociada a medidas de gestión encaminadas a su recuperación (Tabla 2). Se parte del análisis en el año 2000, previo a las actuaciones de restauración, y posteriormente de los años 2006, 2012 y 2017. La tendencia evolutiva de cada sistema, según los criterios aplicados y descritos de restauración, tendría que dar como resultado una tendencia de valores altos (estadios más erosivos) hacia valores bajos (menos erosivos), con el objetivo final de recuperar las morfologías en su estado original.

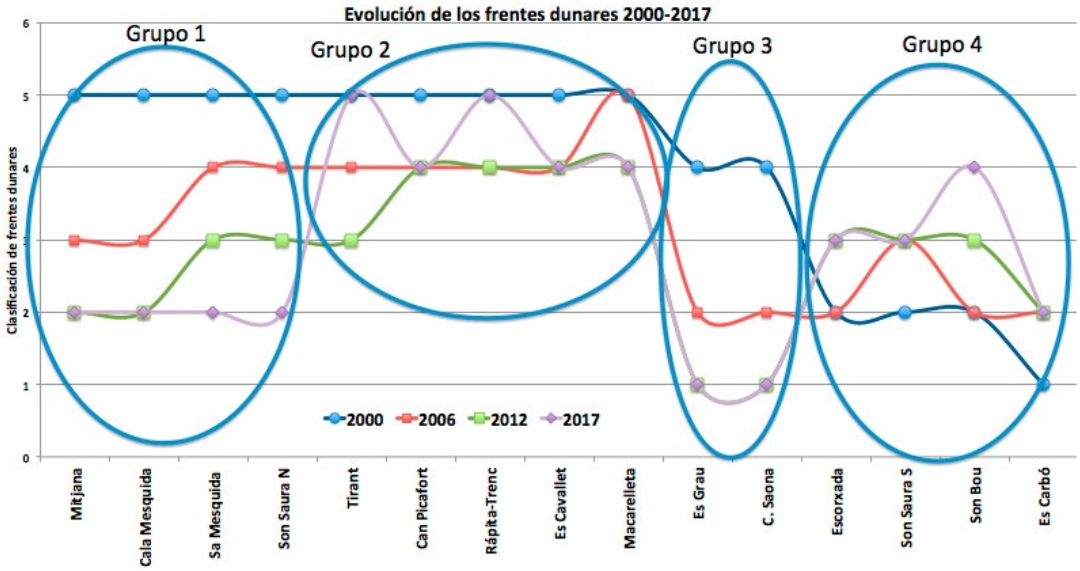
Tabla 2. Valoración de la evolución de los sistemas dunares dalanteros analizados basado en la clasificación morfoecológica de Hesp (2002)

Sistema\Año	2000	2006	2012	2017	Media Sistema
Sa Mesquida	5	4	3	2	3,5
Es Grau	4	2	1	1	2
Son Saura N	5	4	3	2	3,5
Tirant	5	4	3	5	4,2
Son Saura S	2	3	4	3	3
Macarelleta	5	5	4	4	4,5
Escorxada	2	2	3	3	2,5
Son Bou	2	2	3	4	2,7
Mitjana	5	3	2	2	3
Can Picafort	5	4	4	4	4,25
Cala Mesquida	5	3	2	2	3
Es Carbó	1	2	2	2	1,75
Rápita-Trenc	5	4	4	5	4,5
Es Cavallet	5	4	4	4	4,2
C. Saona	4	2	1	1	2
Media Años	4,0	3,2	2,9	2,9	

Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran diferentes patrones de comportamiento morfológico asociados a las medidas de gestión y técnicas aplicadas. En términos generales, la tendencia ha sido hacia la renaturalización del conjunto, partiendo de un valor medio de 4 en el año 2000 a valores medios de recuperación de frentes dunares de 2,9 en el año 2017 (tabla 2). Sin embargo, los resultados analizados por cada uno de los sistemas no reflejan una tendencia tan positiva, teniendo en cuenta el período de actuación, 11 años, y las técnicas utilizadas. Así, entre los años 2012 y 2017, la media se sitúa para ambos en 2.9, sin mostrar la evolución positiva, como ocurrió entre los años 2000 y 2006, que se sitúa en 3.2. Si esta gestión hubiese sido adecuada, la tendencia de recuperación hubiese tendido hacia un valor más cercano a 1, pero los resultados nos demuestran lo contrario, un estancamiento, lo cual pone de manifiesto que no se han aplicado las diferentes técnicas de forma adecuada y adaptadas a cada sistema.

Figura 10. Evolución morfoecológica del frente dunar de los 15 sistemas dunares analizados



Elaboración propia.

En la figura 10 es posible observar la evolución de los diferentes sistemas, donde destacan 4 tipos de comportamientos asociados a la gestión realizada sobre el sistema delantero, clave para la estabilidad del conjunto del sistema playa-duna (figura 1). De estos comportamientos morfoecológicos cabe destacar:

Grupo 1: Aquellos sistemas que parten de una situación de degradación del sistema dunar delantero en su conjunto y que han pasado de un estadio morfológico de 5 a 2. En general presentan estados puntuales de erosión debido a mala gestión o bien escaso mantenimiento, como es el caso de Mitjana, cala Mesquida, sa Mesquida o Son Saura N. El caso de sa Mesquida y cala Mesquida presentan un estadio de equilibrio que cabe poner en duda ya que se han dado procesos de fijación de morfologías mediante revegetación, perdiendo el sistema su función dinámica, hecho que repercute en su biodiversidad.

Grupo 2: Se trata de 5 sistemas que presentaban un estadio inicial más erosivo (estadio 5) y que a pesar de las medidas de gestión no se han equilibrado ni recuperado, alcanzando un valor medio de 4 en 2017. A pesar de la aplicación de medidas de gestión, su evolución ha sido similar a los procesos de renaturalización descritos por Hesp (2002) en un sistema natural, por tanto las medidas no han favorecido la recuperación y mantenimiento del sistema. Destaca el sistema dunar de Tirant, que con la utilización de diferentes medidas de gestión (cerramiento y barreras) llegó a alcanzar el estadio 3, evolucionando hacia la recuperación. Sin embargo, en el año 2017 retorna un estadio 5 con la reactivación de morfologías erosivas en todo el sistema dunar, debido a un abandono en la gestión. Los sistemas dunares de sa Rápita-es Trenc, ca'n Picafort, es Cavallet y Macarelleta, a pesar de los esfuerzos económicos en la instalación de trampas y cerramientos, no han recuperado en ningún caso una cierta continuidad de su frente dunar, alcanzando un estadio 4, de carácter erosivo. La utilización de trampas de interferencia eólica solo han creado una barrera visual, sin generar los procesos de acumulación ni revegetación natural deseados (figura 3).

Grupo 3: En este grupo destacan dos sistemas, es Grau y cala Saona (figura 9), que han pasado de un estadio inicial 4, con elevados grados de alteración, a un estadio 1. Lo más destacable de ambos es que solo se utilizaron técnicas de intervención pasiva sobre sus morfologías, con únicamente medidas de control de usuarios mediante cerramientos y limitación de actuaciones mecanizadas. La ausencia de instalaciones de barreras ha facilitado la naturalidad del sistema sin procesos asociados a núcleos erosivos derivados de la falta de mantenimiento y al abandono de las infraestructuras instaladas en períodos invernales (figura 4).

Grupo 4: Los sistemas dunares de Son Saura del S, Escorxada, cala'n Carbó y Son Bou presentaban un estadio medio de conservación de 1,75 en sus frentes dunares en el año 2000, mientras que en 2017 este valor medio es de 3, con una tendencia erosiva asociada a las medidas de gestión aplicadas en sus *foredunes*. La aplicación de técnicas en sistemas equilibrados da lugar a la desestabilización, alteración e incrementos de usos sobre ellos reactivando y alterando los procesos naturales.

5. Conclusiones

La tendencia de recuperación presenta una evolución positiva en términos generales dentro del contexto del sistema dunar delantero, aunque en todos ellos se han de destacar puntos de reactivación o debilitación, asociados a la gestión realizada.

La implementación de un Manual de restauración de dunas costeras por parte del Ministerio de Medio Ambiente (Ley *et al*., 2007), con ideas precisas y concretas sobre restauración y regeneración de sistemas playa-duna no han sido aplicadas, con un resultado desfavorable sobre sus frentes dunares. En el caso de los sistemas dunares de Baleares no se ha tenido en cuenta la observación de periodos de tiempo largos, superiores a 30 años, con la finalidad de realizar un diagnóstico fiable sobre el comportamiento evolutivo de la línea de costa y su relación con los sistemas dunares delanteros (Boak y Turner, 2005; Martín-Prieto, Roig-Munar y Rodríguez-Perea, 2008).

La restauración dunar requiere un esfuerzo importante de seguimiento y mantenimiento, así como la combinación e integración de diferentes criterios geoambientales ya que de este modo se maximizan los beneficios y los servicios que estas aportan. Los intentos de restauración dunar han sido parciales en los sistemas playa-duna descritos en este trabajo, ya que en general, no se han tenido presentes los aspectos geomorfológicos de cada sistema. Los principales motivos de esta mala implementación de las técnicas de restauración utilizadas se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Los resultados denotan una falta en el análisis de la dinámica eólica, sedimentaria y geomorfológica del sistema a escala multitemporal. El desconocimiento de la dinámica eólica ha generado procesos erosivos asociados a las medidas aplicadas, como es el caso de accesos o trampas de interferencia en el interior de morfologías erosivas internas.
- No se han aplicado correctamente los criterios del Manual en la instalación de barreras de interferencia eólica, sin tener presentes la sectorización de cada playa, las interferencias que pueden ocasionar las mismas, revegetación y/o pasarelas con las morfologías existentes.
- Los criterios en la ubicación de cordones disuasorios no han sido los adecuados, sin seguir la línea natural de la morfología dunar delantera y consolidando procesos erosivos que favorecen a corto plazo mayor superficies de playa en detrimento del sistema dunar.
- Hay una falta en la aplicación de criterios en la instalación de pasarelas, por desconocimiento de la dinámica eólica y procesos sedimentarios, que llevan en unos casos a la fragmentación del frente dunar e incrementar los procesos erosivos y en otros al enterramiento de la propia infraestructura.
- No ha habido un seguimiento ni un mantenimiento adecuados de las actuaciones, favoreciendo una mala imagen a los usuarios, generando distorsión eólica que agrava procesos erosivos por su falta de mantenimiento e instalación en períodos invernales.

En general, la implementación de las medidas llevadas en las islas Baleares son aptas para cumplir con los objetivos de regeneración y restauración dunar inicialmente planteados. Son técnicas ampliamente aplicadas y de éxito si se basan en criterios geomorfológicos y análisis geoambientales de cada sistema dunar. Su coste es bajo, de fácil aplicabilidad, reutilizables en muchos casos, se sirven de la naturaleza para su propósito e incluso, aún en el caso de cometer errores, estos pueden ser reversibles con su mantenimiento. Es importante tener presente que, debido a la naturaleza dinámica de estos sistemas, la restauración

morfológica dunar en el litoral y su vegetación asociada, pueden tardar en recuperarse en periodos de tiempo que en algunos sistemas superan los 10 años. En general, la restauración dunar basada en criterios sostenibles suele ser una acción recurrente en el tiempo (Hesp y Hilton, 2011), de aquí la importancia de su seguimiento y mantenimiento.

A pesar de ser medidas válidas con el objetivo de recuperación y renaturalización de los sistemas dunares, el trabajo concluye que estas han tenido un carácter marcadamente estético, ya que no se han seguido los criterios marcados en el Manual. Esto se pone de manifiesto al comprobar que una de las medidas más efectivas para la recuperación del sistema, la instalación y corrección de barreras de interferencia eólica, no son colocadas o bien se colocan justo antes de la temporada turística sin previos estudios de aptitud ni de seguimiento para su posible modificación, y que normalmente son desatendidas en los períodos invernales (fig. 4). También se ha constatado que las actuaciones llevadas a cabo en los últimos años han sido mínimas sobre las curvas de sensibilidad geoambiental del sistema, justificadas algunas en la crisis económica.

La correcta gestión de estos sistemas dunares mediante las medidas de gestión sostenibles aplicadas habrían sido efectivas siguiendo los criterios del manual de gestión dunar de Ley *et al*. (2007) y era suficiente adaptarlas a las características de las islas Baleares. Estos trabajos de restauración habrían sido más efectivos con la realización de estudios espacio-temporales de cada sistema playa-duna, la aplicación de criterios geomorfológicos sobre el sistema dunar delantero y un plan de seguimiento, mantenimiento y análisis evolutivo de la restauración, que hubiera facilitado en gran medida la recuperación de los sistemas dunares tratados, e incluso el cambio de metodologías o emplazamientos de las actuaciones, partiendo de estadios erosivos hacia estadios recuperados y estables.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer las sugerencias y los comentarios realizados por los editores de la revista y de los dos revisores anónimos, las cuales han contribuido a una mejora respecto a la versión original. Este artículo contribuye parcialmente al desarrollo del proyecto “Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español” (CSO2015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

Acosta, A. T., Jucker T., Prisco, I. y Santoro, R. (2011). Passive recovery of Mediterranean coastal dunes following limitations to human trampling. En M. L. Martínez, J. B. Gallego-Fernández y P. A. Hesp (Eds.), *Restoration of coastal dunes* (pp. 188-198). https://doi.org/10.1007/978-3-642-33445-0_12

Arens, S.M. y Wiersma, J. (1994). The Dutch foredunes: inventory and classification. *Journal of Coastal Research*, (10), 189-202.

Ariza, E., Jiménez, J.A., Sardà, R., Villares, M., Pinto, J., Fraguell, R., … y Fluvi_a, M. (2010). Proposal for an integral quality index for urban and urbanized beaches. *Environmental Management*, (45), 998-1013. http://dx.doi.org/10.1007/s00267-010-9472-8

Balaguer, P. y Roig-Munar, F. X. (2016). Coastal Dune Systems and the concept of Integrated Coastal and Marine Management (ICMM). En F. X. Roig-Munar y F. J. Quintana (Eds.) *Restauración y Gestión de Sistemas Dunares. Estudio de casos* (201-220). Càtedra d’Ecosistemes Litorals Mediterranis.

Boak, E. y Turner, L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research,* 21 (4), 688-703. https://doi.org/10.2112/03-0071.1

Brown, A. y McLachlan, A. (1990). Ecology of sandy shores. *Elseiver, Hardbound.*

Carter, R. (1988). *Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines.* London: Academic Press.

Charlier, R. H. y De Meyer, C.P. (1989). Coastal defense and beach renovation. *Ocean and Shorline Management*, (12), 525-543. https://doi.org/10.1016/0951-8312(89)90029-5

Davidson-Arnott, R., MacQuarrie K. y Aagaard, T. (2005). The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on a beach. *Geomorphology,* (68,) 115-129. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.04.008

Delgado-Fernández, I. (2011). Meso-escale modelling of aeolian sediment imput to coastal dune. *Geomorphology*, (130), 230-243. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.001

Ellis, J. T. y Sherman D. J. (2013). Fundamentals of Aeolian Sediment Transport: Wind-Blown Sand. En Shroder, J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology* (pp. 85-108). San Diego: Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00299-2

Gallego-Fernández, J.B., Sánchez, I.A. y Ley, C. (2011). Restoration of isolated and small coastal sand dunes on the rocky coast of northern Spain. *Ecological Engineering*, (37), 1822-1832. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.017

García-Mora, M.R., J.B. Gallego-Fernández, y F. García-Novo. (1999). Plant functional types in relation to foredune dynamics and the main coastal stresses. *Journal of Vegetation Science*, (10), 27-34. https://doi.org/10.2307/3237157

Gómez-Piña, G., Muñoz-Pérez, J.J., Ramírez, J.L. y Ley, C. (2002). Sand dune management problems and techniques, Spain. *Journal of Coastal Research*, (36), 325-332. https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.325

Grafals-Soto, R. y Nordstrom, K. (2009). Sand fences in the coastal zone: intended and unintended effects. *Environmental Management*, (44), 420-429. https://doi.org/10.1007/s00267-009-9331-7

Hesp, P. A. (1988). Surfzone, beach and foredune interactions on the Australian southeast coast. En Psuty, N. (Ed.), *Journal of Coastal Research Special Issue, (vol. 3)*, 15-25.

Hesp, P. A. (2002). Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology, and dynamics. *Geomorphology*, (48), 245-268. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8

Hesp, P. A. y Hilton, M. (2011). Restoration of Foredunes and Transgressive Dunefields: Case Studies from New Zealand. En M. L. Martínez, J. B. Gallego-Fernández y P. A. Hesp (Eds.), *Restoration of coastal dunes* (pp. 67-92).

Hesp, P. A. y Walker, I. J. (2012). Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Aeolian Research, (3)*, 389-399. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.09.002

IMPACTUR (2014). *Estudio del Impacto Económico del Turismo.* Conselleria de Turisme i Esports. Govern de les Illes Balears. Recuperado de: http://www.caib.es/sites/estadistiquesdelturisme/f/224873

Ley, C., Gallego-Fernández J. y Vidal, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino. Recuperado de http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0652461.pdf

Lithgow, D., Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., Hesp, P. A., Flores, P., Gachuz, S., … y Álvarez-Molina, L. L. (2013). Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology*, (199), 214-224. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.007

Lynch, K., Jackson, D. W. y Cooper, J. A. (2010). Coastal foredune topography as a control on secondary airflow regimes under offshore winds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (3), 344-353. https://doi.org/10.1002/esp.1925

Martín-Prieto, J. A., Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A y Pons, G. X. (2010). Evaluació de la línea de costa de la platja de es Trenc (S. Mallorca). En J. Mayol, Ll. Muntaner, y O. Rullán (Eds.), *Homenatge a Bartomeu Barceló i Pons, geògraf* (pp. 423-440). Palma.

Martínez, M. L., Hesp, P. A, y Gallego-Fernández, J. B. (2011). Coastal dunes: human impact and need for restoration. En M. L. Martínez, J. B. Gallego-Fernández y P. A. Hesp (Eds.), *Restoration of coastal dunes* (pp. 1-16).

Mayol, J. (2006). Un gran projecte de postguerra: La repoblació forestal de les dunes de Formentera. *Revista Eivisssa*, (44-45), 9-16.

Miller, D. L., Thetford, M. y Yager, L. (2001). Evaluation of sand fence and vegetation for dune building following overwash by Hurricane Opal on Santa Rosa Island, Florida. *Journal of Coastal Research*, (17), 936-948.

Miot da Silva, G., Hesp, P. A., Peixoto, J. y Dillenburg, S. R. (2008). Foredune vegetation patterns and alongshore environmental gradients: Moçambique beach, Santa Catarina Island, Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, (33), 1557-1578. https://doi.org/10.1002/esp.1633

Mir-Gual, M. y Pons, G. X. (2011). Coast sandy strip fragmentation of a protected zone in the N of Mallorca (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research SI,* 64 (*1*), 1367-1371.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2005). *Hacia una gestión sostenible del litoral español*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente.

Nordstrom, K. F. (2008). *Beach and dune restoration*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511535925

Pons, F. (2015). *El nuevo régimen jurídico de las costas. ¿Contribuirá de forma eficaz a la protección y al uso sostenible del litoral?*. Thomson Reuters Aranzadi.

Psuty, N. (1990). Foredune mobility and stability, Fire Island, New York. En K. Norstrom, N. Psuty, y B. Carter (Eds.), *Coastal Dunes: Form and Process* (pp. 159-178). London: John Wiley Interscience.

Rodríguez-Perea, A., Servera, J. y Martín-Prieto, J. A. (2000). *Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regeneració artificial: Informe METADONA*. Universitat de les Illes Balears: Col·lecció Pedagogia Ambiental,10.

Roig-Munar, F. X. y Martín-Prieto, J. A. (2005). Efectos de la retirada de bermas vegetales de Posidonia oceánica sobre playas de las islas Baleares: consecuencias de la presión turística. *Investigaciones geográficas de México*, (57), 39-52. http://dx.doi.org/10.14350/rig.30080

Roig-Munar F. X., Martín-Prieto J. A., Comas-Lamarca, E. y Rodríguez-Perea, A. (2006). Space-time analysis (1956-2004) of human use and management of the beach dune systems of Menorca (Balearic I.). *Journal of Coastal Research; Special Issue 48*, (107-111). https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2551.2408

Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J. A. y Pons, G. X. (2009). Soft Management of Beach-Dune Systems as a Tool for their Sustainability. *Journal of Coastal Research, SI 56*, (1284-1288). https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4173.2569

Roig-Munar, F. X. (2011). *Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears*. Tesis doctoral inédita. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les illes Balears, 366p (en catalán).

Servera, J. (1997). Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, 904p (en catalán).

Short, A. D. y Hesp, P. A. (1982). Wave, beach and dune interactions in southeast Australia. *Marine Geology,* (48), 259-284. https://doi.org/10.1016/0025-3227(82)90100-1

Walker, I. J., Hesp, P. A., Davidson-Arnott, R. G. y Ollerhead, J. (2006). Topographic steering of alongshore airflow over a vegetaded foredune: Greenwich Dunes, Prince Edward island, Canada. *Journal of Costal Research,* 22 (*5*), 1279-1291. https://doi.org/10.2112/06A-0010.1

Williams, A. T., Alverinho-Dias J., García Novo, F., García Mora, M. R., Curr, R. y Pereira, A (2001). Integrated coastal dune management: checklist. *Continental Shell Research,* (21), 1937-1960. https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00036-X

Woodroffe, C. D. (2002). *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.

Yepes, V. y Medina, J. R. (2005). Land use tourism models in Spanish coastal areas. A case study of the Valencia region. *Journal of Coastal Research Special Issue*, (49), 83-88.