



Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales

Grado en Ciencias del Mar

Trabajo de Fin de Grado

**Evolución a medio plazo del pie de duna de la
playa de Camosoto (San Fernando)**

Cristina Montes García

Tutores:

Javier Benavente González
Theocharis Plomaritis

A 15 de junio de 2021

Tabla de contenido

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | RIESGOS COSTEROS Y CAMBIO CLIMÁTICO | 1 |
| 1.2 | LOS SISTEMAS DUNARES COSTEROS..... | 3 |
| 1.2.1 | <i>Génesis y evolución dunar</i> | 3 |
| 1.2.2 | <i>Las dunas en el contexto humano</i> | 5 |
| 1.3 | LAS DUNAS EN LA COSTA SURATLÁNTICA ESPAÑOLA | 6 |
| 2 | ZONA DE ESTUDIO | 8 |
| 3 | METODOLOGÍA | 10 |
| 3.1 | OBTENCIÓN DE LOS PIES DE DUNA ENTRE 2008 Y 2014 (GPS-RTK)..... | 11 |
| 3.2 | OBTENCIÓN DE LOS PIES DE DUNA A PARTIR DE LOS VUELOS UAS..... | 12 |
| 3.3 | EVOLUCIÓN DEL PIE DE DUNA..... | 13 |
| 4 | RESULTADOS | 15 |
| 4.1 | PARÁMETROS ESTADÍSTICOS | 16 |
| 4.2 | COMPARACIÓN DE DISTINTOS PIES DE DUNA | 19 |
| 4.3 | EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS PIES DE DUNA | 20 |
| 5 | DISCUSIÓN | 22 |
| 6 | CONCLUSIONES | 25 |
| 7 | BIBLIOGRAFÍA | 26 |
| | ANEXO I | 31 |

Resumen

Durante los últimos años, en el contexto del cambio climático, procesos erosivos como los temporales marítimos han derivado en el retroceso de muchas costas a nivel global y deteriorado sus dunas. Debido a la cantidad de servicios socioeconómicos y ecosistémicos que estos sistemas ofrecen, de entre los que destaca la defensa litoral frente a riesgos costeros, su estudio es de gran trascendencia. Con el objetivo de cuantificar el retroceso observado en trabajos anteriores en las dunas de la playa de Camposoto (Cádiz), se ha realizado un estudio a corto-medio plazo de levantamientos topográficos que recogían datos del pie de duna del sector sur de la playa entre 2008 y 2018. Estos datos, tomados mediante sistemas GPS-RTK y UAS, fueron sometidos a diferentes tratamientos y analizados en base a cuatro parámetros estadísticos de cambio (NSM, SCE, EPR, LRR) que mostraron una tasa de retroceso media de 2.29 m/año, cifra superior a la obtenida hasta 2008. Esto sugiere una aceleración de la erosión que experimenta el sistema, y que ha resultado ser más intensa en la zona norte, debido a los abanicos de desbordamiento que se generan allí con mayor facilidad como consecuencia de la menor cota de sus dunas, la cual las hace más vulnerables. Esto puede ser una reacción ante los temporales marítimos, cuyo efecto supera la capacidad de respuesta del sistema playa-duna, y que junto con la carencia de aporte sedimentario de la zona conducen a la degradación y destrucción del cordón dunar. Es por tanto necesaria la revisión de las medidas protectoras que existen y el planteamiento de nuevos programas de restauración de dunas que mitiguen de manera efectiva la pérdida ecosistémica y socioeconómica que supone el deterioro de estos espacios.

Palabras clave: dunas costeras, erosión, cambio climático, riesgos costeros, temporales, morfodinámica, vegetación, rollover, Camposoto, vulnerabilidad, presión antrópica.

Abstract

Over the last years, in the context of climate change, erosive processes such as sea storms have resulted in the retreat of many coastlines in a global scale and damaging its dunes. Because of the amount of socioeconomic and ecosystem services that these systems provide, among them the natural defense against coastal hazards, the study of such processes is of a great importance. In order to quantify the retreat registered in previous works in the dunes of Camposoto beach (Cádiz), a short-medium-term analysis of topographic surveys that collected data from the dune foot of the southern sector between 2008 and 2018 has been carried out. These data, taken by GPS-RTK and UAS systems, were subjected to different treatments and analyzed focusing on four shoreline change statistical parameters (NSM, SCE, EPR, LRR), that showed an average regression rate of -2.29 m/year, a higher value than the one registered until 2008. This suggests an acceleration of the erosion suffered by the system, which has revealed to be more intense in the northern sector of the study area due to the over washes that occur more easily in there, in consequence of the lower height of its dunes that makes them more vulnerable. This could mean a reaction of the system to sea storms, whose effect overpasses the natural accommodation capacity of the beach-dune system and which, together with the lack of sediment supply, leads to the degradation and destruction of the foredunes. It is therefore necessary to review the existing protective measures, and to propose new programs for the dune restoration in order to mitigate the ecosystemic and socioeconomic loss caused by the deterioration of these spaces.

Key words: coastal dunes, erosion, climate change, coastal hazards, sea storms, morphodynamic, vegetation, *rollover*, Camposoto, vulnerability, anthropic pressure

1 Introducción

Las zonas costeras constituyen uno de los enclaves naturales más dinámicos, frágiles y complejos a nivel mundial (Alonso *et al.*, 2009). De entre los servicios que ofrecen destacan la protección del litoral frente a episodios energéticos, su importancia ecológica y los recursos naturales que concentran en ellas todo tipo de actividades económicas, culturales y recreativas (Cabrera *et al.*, 2012 y Ranasinghe, 2016). Por ello existe sobre las costas una intensa demanda espacial (Cabrera *et al.*, 2012): más del 60% de la población mundial vive a menos de 100 kilómetros del mar, y se prevé una intensificación de esta cifra debido al proceso de *litoralización* que está aconteciendo (Benavente *et al.*, 2009) y que ha dado lugar a la interrupción de los mecanismos naturales que rigen los sistemas litorales y a la mutación de sus paisajes (Ley *et al.*, 2007 y Zotano, 2014).

Esta elevada presión antrópica conduce directamente a la existencia de los riesgos costeros, procesos naturales que interfieren o amenazan de alguna forma las actividades humanas (Benavente *et al.*, 2009). En los sistemas litorales, el oleaje, las corrientes, la subida del nivel del mar, los desequilibrios sedimentarios y los temporales son los principales factores generadores de dos de los riesgos costeros más preocupantes actualmente a nivel global: la erosión costera y las inundaciones (Cheung *et al.*, 2003 Benavente *et al.*, 2009; Cooper & Pile, 2014 y Ranasinghe, 2016).

1.1 Riesgos costeros y cambio climático

Las costas arenosas deben su estabilidad al balance entre el aporte y la retirada de los sedimentos que llegan a ellas (Benavente *et al.*, 2009). La erosión supone una pérdida permanente de este material sedimentario, y rompe dicho equilibrio, provocando la migración de formaciones costeras o cambios en su morfología (Cooper & Pile, 2014).

Así mismo, los procesos erosivos pueden derivar de los agentes naturales (nivel del mar, temporales marítimos, corrientes...) o antrópicos, los cuales abarcan desde la alteración de los cursos fluviales y de su aporte sedimentario mediante la deforestación, los embalses o las prácticas agrícolas, hasta las obras de defensa costera como espigones o puertos, que interrumpen la deriva litoral y alteran el equilibrio sedimentario de las costas (Benavente *et al.*, 2009). Por tanto, es de especial importancia poder identificar y entender el proceso de erosión costera como una amenaza para el bienestar

socioeconómico de las poblaciones litorales (**Díaz-Cuevas et al., 2020**), así como la necesidad de administrar el espacio costero de cara a un uso responsable y sostenible a largo plazo (**Cabrera et al., 2012**).

Dentro de los riesgos costeros, las inundaciones que sufren muchas de las poblaciones costeras son uno de los más preocupantes a lo largo de las últimas décadas. Pueden darse inundaciones permanentes, debidas a una subida acelerada del nivel medio del mar, o episódicas, provocadas por la intensificación del oleaje y el *storm surge*¹ durante los temporales marítimos (**Ranasinghe, 2016**). En muchos casos, y en especial en las áreas altamente urbanizadas, las medidas para hacerles frente consisten en defensas duras que protegen exclusivamente las actividades humanas y las infraestructuras, de manera que las playas no disponen de mecanismos naturales de adaptación ante episodios energéticos (**Cooper & Pile, 2014**). Se genera así una retroalimentación constante: las inundaciones llevan a construir defensas que, por otro lado, aumentan la erosión de la costa, la cual a su vez propicia episodios de inundación (**Ramieri et al., 2011** y **Rutherford et al., 2020**).

Esta situación de sobrecarga urbanística y riesgos costeros hay que integrarla además en el contexto actual del cambio climático, el cual se ha convertido en una de las principales amenazas para la estabilidad global (**Rutherford et al., 2020**). Una de las consecuencias que se prevé de él es precisamente el aumento de los riesgos costeros, cuyos impactos dependerán de la proximidad de las poblaciones a la costa y serán el resultado de la interacción entre variables climáticas y no climáticas (**Small et al., 2000**; **Ramieri et al., 2011** y **Cooper & Pile, 2014**), siendo sus efectos más notorios la intensificación de los fenómenos naturales extremos y la subida acelerada del nivel del mar (**Ramieri et al., 2011** y **Cabrera et al., 2012**). Por ello, de cara a prevenir o atenuar dichos efectos, las defensas naturales de las costas cobran vital importancia: cualquier sistema natural cuenta con cierta capacidad de adaptación ante los cambios del ambiente en que se encuentra, gracias a mecanismos como el crecimiento vertical o las migraciones hacia tierra o laterales (**Ramieri et al., 2011**). Sin embargo, su eficiencia se ve mermada por las defensas artificiales que han colonizado las costas y que además tienen impactos generalmente negativos sobre los ecosistemas marinos coexistentes (**Jahangirzadeh et al., 2012**).

¹ *Storm surge* es el nombre que recibe comúnmente el conjunto de variaciones anómalas en el nivel medio del mar provocadas por los gradientes de presión, el viento y el oleaje que se dan durante los temporales marítimos (**Benavente et al., 2009**).

1.2 Los sistemas dunares costeros

Uno de los elementos naturales que juega un papel fundamental en la protección de las costas arenosas frente a eventos extremos, son las dunas: sistemas dinámicos y complejos que resultan de la interacción entre los procesos eólicos y marinos, la vegetación, la morfología del entorno y la presión humana ejercida sobre ellos (**García-Mora et al., 2001**). Los cordones dunares actúan como reservorios de arena, y constituyen gran parte del área emergida de las playas, desde donde absorben el impacto de los episodios energéticos, retrasando o evitando la intrusión de agua tierra adentro, lo cual las sitúa como la defensa más efectiva y económica contra la erosión costera (**Gómez-Pina et al., 2002; Ley et al., 2007 y Williams et al., 2018**).

1.2.1 Génesis y evolución dunar

Las dunas son acumulaciones arenosas generadas por la dinámica eólica, la cual va arrastrando los granos de arena susceptibles de ser transportados hasta que estos se topan con un obstáculo que genera una zona de sombra donde se producirá la mencionada acumulación y el posterior crecimiento de la duna (**Martínez et al., 2004 y Sanjaume et al., 2011**). Por ello, el viento se considera prácticamente el único agente responsable de la removilización de la arena y de su transporte a las zonas de posplaya donde se produce la sedimentación que da lugar a los cordones dunares (**Flor et al., 2011**). Del viento también depende la morfología de las dunas, influencia que comparte con los agentes marinos (corrientes costeras, nivel del mar, mareas, oleaje y tormentas), y que actúan como agentes erosivos (**Flor, 1990**). Además, estos factores, al incidir directamente sobre el balance sedimentario de las playas, sobre la extensión de estas expuesta al viento, y sobre otras variables como la salinidad del ambiente, resultan determinantes en el sistema sedimentario del litoral (**Sanjaume et al., 2011 y Delgado-Fernández et al., 2019**).

La vegetación tiene un papel fundamental tanto en la génesis como en el desarrollo de las dunas litorales ya que favorecen la sedimentación de los granos de arena en saltación al disminuir la velocidad del viento y su capacidad de transporte, aunque también es vulnerable ante la erosión provocada por este, pudiendo morir cuando las raíces quedan al descubierto (**Sanjaume et al., 2011 y Charbonneau et al., 2021**). Debido a las duras condiciones que las dunas ofrecen (riesgo de enterramiento, altas temperaturas, sequía y poca disponibilidad de nutrientes), la colonización vegetal resulta en una serie de comunidades específicas, muy especializadas, que se organizan en bandas paralelas al

límite de playa-duna, estabilizándose a medida que se alejan de la influencia del mar (Sanjaume *et al.*, 2011 y Davidson-Arnott *et al.*, 2018). Las dunas más cercanas a la orilla presentan poca cobertura vegetal, con especies muy tolerantes a la salinidad y al enterramiento, gracias a las cuales se produce un fenómeno de *facilitación* que permite el asentamiento, en zonas más alejadas al mar, de vegetación menos especializada y más estable que deriva incluso en la aparición de bosques (Sanjaume & Gómez-Serrano, 2009 y Sanjaume *et al.*, 2011). Esta progresiva estabilización permite diferenciar entre dunas móviles, dunas semifijas y dunas fijadas (Ley *et al.*, 2007), tal como refleja la **Figura 1**. Otra clasificación posible es la propuesta por Cooper (1967), que distingue en base a un criterio genético-evolutivo entre dunas primarias (formadas a partir de arena de playa) y dunas secundarias (formadas como consecuencia de la erosión de las primarias).

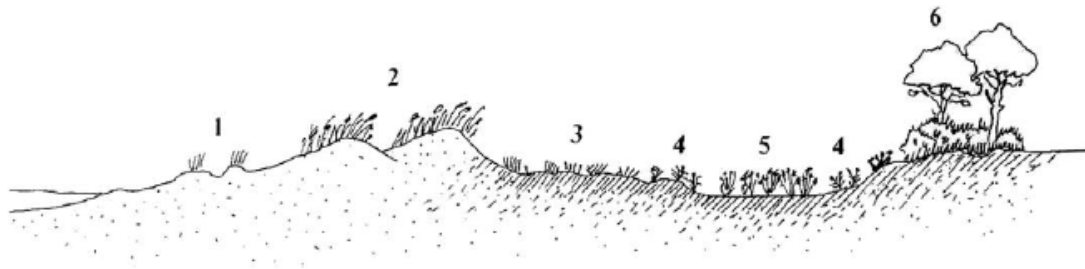


Figura 1. Sección transversal y zonación de un sistema dunar costero (Costa, 1987). Se distinguen dunas embrionarias (1), dunas móviles (2), dunas fijas (3), depresión interdunar (4 y 5) y dunas estabilizadas (6).

Algunas de las especies más comunes de estos hábitats son *Elymus farctus* (duna embrionaria), la *Ammophylla arenaria* y *Eryngium maritimum* (duna primaria y secundaria), *Pinnus pineae* (bosques) y otras especies que proliferan en las depresiones interdunares, como *Linaria tursica* o *Malcomia lacera* (Barrionuevo, 2006). Esta diversidad de especies y, por tanto, de tipología, influye directamente no solo en la formación y desarrollo de las dunas, sino también en su morfología (Sanjaume *et al.*, 2011 y Charbonneau *et al.*, 2021).

A parte de los factores previamente mencionados como son el viento o la vegetación, existen otros de igual importancia que van a controlar la presencia y el desarrollo dunar. Así, la mayoría de los complejos dunares costeros se desarrollan en ámbitos con fuerte suministro de material, un transporte litoral libre, intensos vientos marinos, precipitaciones moderadas, escasa humedad atmosférica, playas de poca pendiente y amplios rangos mareales (Sanjaume *et al.*, 2011 y Delgado-Fernández *et al.*, 2019). Además de la vegetación, la topografía de la zona continental adyacente (amplia y

plana) y la posición del nivel freático, influyen también en la cohesión de los materiales (Ley *et al.*, 2007).

1.2.2 *Las dunas en el contexto humano*

Las dunas constituyen un recurso natural de gran importancia, no solo por su influencia en la estabilidad de las playas o su elevado interés ecológico, sino también por sus valores paisajísticos, turístico-recreativos y educativos, lo cual hace de su conservación y gestión una prioridad ambiental a todos los niveles (Bonnet, 1989). Sin embargo, la presión antrópica ejercida sobre estos sistemas se ha convertido en uno de los factores principales en su deterioro y desaparición, debido al impacto negativo que tienen algunas actividades humanas sobre la vegetación dunar o la dinámica sedimentaria (Gómez-Pina *et al.*, 2002).

El turismo constituye, junto con las actividades de ocio en las playas, una de las actividades más perjudiciales para las dunas: el tránsito de personas, vehículos, la instalación de pasarelas y vayas o la construcción de parkings degradan y reducen la cubierta vegetal, así como su capacidad de regeneración, lo cual deriva en un incremento de la inestabilidad dunar, compactando el terreno (García de Lomas *et al.*, 2011 y Zotano, 2014). Otras causas del deterioro de las dunas son la limpieza de las playas, que impide el desarrollo de las dunas embrionarias, el pastoreo de ganado, la proliferación de especies invasoras, las cuales desplazan a las especies autóctonas y reducen la diversidad del sistema, las urbanizaciones cercanas o sobre los cordones dunares, que reducen la capacidad de acomodación de las playas, y la extracción de arenas (Gómez-Pina *et al.*, 2002; García de Lomas *et al.*, 2011 y Silva *et al.*, 2019).

Las consecuencias de la degradación de los cordones dunares litorales son en todos los casos negativas y contraproducentes para las propias actividades que las causan: pérdida de una de las defensas naturales más efectivas y económicas contra la erosión costera al limitar la capacidad de acomodación del sistema ante los problemas generados por el cambio climático (Gómez-Pina *et al.*, 2002), y pérdida de valor paisajístico y biodiversidad y por tanto también de su valor económico y cultural, motivo por el cual su regeneración o fortalecimiento, junto con una adecuada gestión son fundamentales hoy día (García de Lomas *et al.*, 2011).

1.3 Las dunas en la costa suratlántica española

El litoral español cuenta con una longitud de 8.000 kilómetros diferenciados en cuatro dominios marinos: Mediterráneo, Cantábrico, Atlántico peninsular y Atlántico macaronésico (CNIG, 2020). De esta cifra, 1.101 kilómetros pertenecen a la Comunidad Autónoma de Andalucía (Junta de Andalucía, 2014). Las costas andaluzas están compuestas en un 20% por acantilados, y en un 65% por playas, y se subdividen en dos secciones: la mediterránea y la atlántica, destacando esta última por ser una costa dinámica, fundamentalmente baja y arenosa, interrumpida a menudo por marismas y estuarios asociados a las desembocaduras los ríos (De la Hera, 1998). En los últimos 60 años, estos espacios han experimentado un proceso de ocupación intensivo, derivado fundamentalmente del turismo y la agricultura, que amenaza los sistemas litorales haciéndolos más vulnerables ante los riesgos costeros y el cambio climático (Zotano, 2014).

Esta franja del litoral reúne las condiciones idóneas para la formación de una cantidad considerable de edificios dunares costeros, los cuales forman parte del principal elemento medioambiental sobre el que se basa el sector turístico de la Comunidad Autónoma: amplias playas arenosas de granulometría fina que soportan oleajes de energía media-baja y rango de mareas de tipo mesomareal, e importantes aportes sedimentarios procedentes de grandes ríos como el Guadalquivir y el Guadalete, cuyo material descargado al mar es distribuido a lo largo de la costa por la deriva litoral (Benavente *et al.*, 2002, Gracia *et al.*, 2011 y Zotano, 2014). Sin embargo, el aporte sedimentario de los ríos se ha visto significativamente reducido durante el siglo XX debido a la antropización que han venido sufriendo a lo largo de la historia (embalses, agricultura, dragas, etc.) (Gracia *et al.*, 2006). Esto, junto con la pérdida de vegetación derivada de las actividades humanas implantadas comúnmente sobre las dunas² o en sus alrededores ha provocado un aumento en la erosión de estas, y en algunos casos, su retroceso o desaparición (Gómez-Pina *et al.*, 2002).

La Ley 2/2013, de 29 de mayo, de Protección y Uso Sostenible del Litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, sitúa las dunas españolas bajo la protección del Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT) al integrarse, desde la Ley de Costas de 1988, en la definición de playas. No obstante, hasta 1988, las dunas del litoral español estuvieron completamente desprotegidas a efectos legales, ya que en

² Esta práctica actualmente está prohibida (LPUSL 2/2013, de 29 de mayo), pero fue legal y muy común hasta 1988, año en que se modificó la ley de Costas de 1969.

la anterior Ley 28/1969, de 26 de abril, sobre Costas, no se consideraban parte de las playas, y por tanto tampoco del DPMT (**LC 28/1969, de 26 de abril y Gómez-Pina *et al.*, 2002**).

Actualmente, Andalucía cuenta con el Plan de Recuperación y Conservación de Especies de dunas, arenales y acantilados costeros, enfocado a la protección de las especies vegetales que pueblan los arenales andaluces, de las cuales más del 50% son endemismos (**Zotano, 2014 y Junta de Andalucía, 2015**). Además, la mayoría de los sistemas dunares andaluces, diferenciados en dunas mediterráneas y dunas atlánticas, forman parte del listado de Hábitats de Interés Comunitario (HIC) publicado en la Directiva 92/43/CEE (Directiva Hábitats) (**García de Lomas *et al.*, 2011**). Otros documentos jurídicos relativos a la conservación y uso sostenible del patrimonio natural son la Ley 42/2007 de Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, el Catálogo Español de Hábitats en Peligro de Desaparición y los espacios protegidos de la Red Natura 2000 (**García de Lomas *et al.*, 2011**).

No obstante, actualmente el estado de los sistemas dunares costeros atlánticos de Andalucía depende de las tendencias de avance y retroceso de las playas que los alimentan y que, sin embargo, no ha sido suficientemente cuantificado (**Gracia *et al.*, 2011 y Zotano, 2014**).

Dada esta situación actual de los sistemas dunares, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la evolución del sistema dunar del sector sur de la playa de Camposoto, centrandose en estudio en la evolución de su posición a lo largo de los últimos 10 años. Dicha evolución permitirá identificar cuál es la tendencia a medio plazo que está mostrando el sistema. Para ello se han marcado tres objetivos parciales:

- a. Recopilación y extracción del pie de duna de las campañas topográficas preexistentes.
- b. Recopilación y extracción del pie de duna de las campañas realizadas mediante drones durante el periodo de estudio.
- c. Creación de una base de datos de todos los pies de duna y análisis de su evolución

2 Zona de estudio

La playa de Camposoto está situada en la sección Norte de la flecha de Sancti Petri (localidad de San Fernando, Cádiz) (**Figura 2**), la cual se extiende a lo largo de aproximadamente 5 kilómetros en dirección NNO-SSE gracias a la acción de la deriva litoral que actúa en dirección SE (**Gracia *et al.*, 2011** y **Talavera, 2019**).

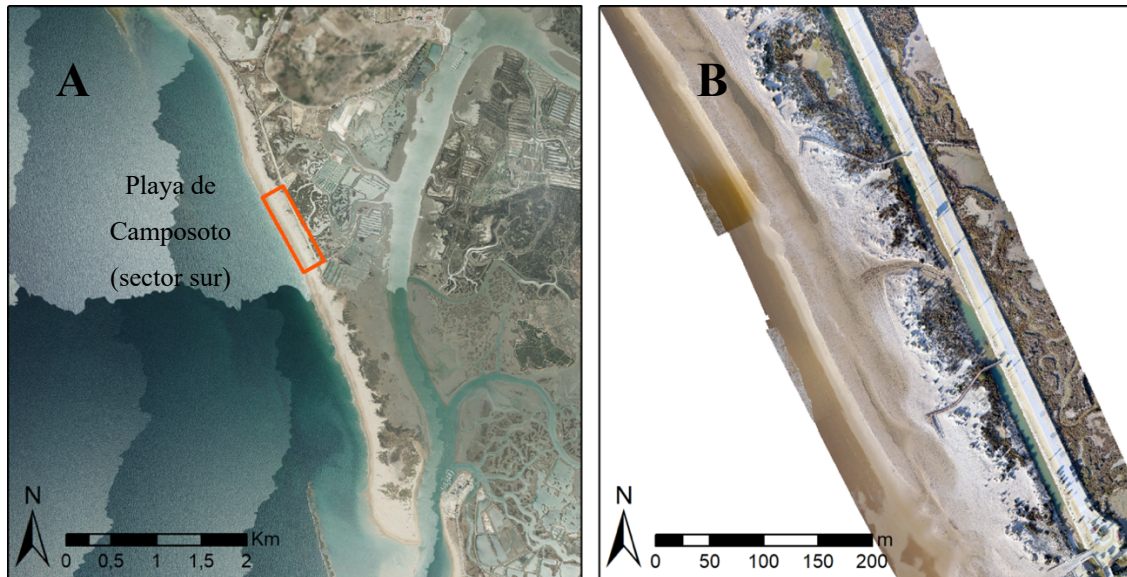


Figura 2. (A) Visión general de la flecha de Sancti Petri; (B) Detalle de la zona de estudio (sector sur de la playa de Camposoto). Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA, 2019) y vuelo con sistema UAS (2017).

Se trata de una playa arenosa respaldada por un cordón dunar de escasa altura y vegetado, interrumpido por varios abanicos de desbordamiento, cuya variedad ecosistémica y su atractivo turístico e histórico justifican su pertenencia al Parque Natural Bahía de Cádiz (**Del Río *et al.*, 2012** y **Talavera, 2019**). Un canal artificial y una carretera separan las dunas de las marismas que se extienden en su parte posterior (**Del Río *et al.*, 2012**).

La playa arenosa presenta un perfil dinámico, que fluctúa estacionalmente entre intermedio y disipativo según las condiciones climáticas sean de baja o alta energía, respectivamente (**Plomaritis *et al.*, 2009**), y que soporta en general condiciones energéticas bajas (el 70% del oleaje que recibe no supera el metro de altura) (**Benavente *et al.*, 2013**). Las mareas son de carácter semidiurno, con un rango mesomareal que oscila entre los 0,75 y los 3,5 metros (**Aboitiz *et al.*, 2008**). La dirección predominante del oleaje es del oeste (**Figura 3A**) y los mayores temporales por los que se ve afectada llegan desde el oeste-suroeste y durante el invierno (**Benavente *et al.*, 2013**). El número y la magnitud de las tormentas se ve afectada por la circulación atmosférica, y

específicamente por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO); cuando el signo de esta es negativo, ocurren más tormentas en el Golfo de Cádiz (**Rangel-Buitrago & Anfuso, 2013** y **Plomaritis et al., 2015**).

En cuanto a las dunas, pese a que los vientos de levante que soplan en esta región (**Figura 3B**) reúnen más condiciones favorables para su formación (bajo contenido en humedad y velocidades altas), su capacidad generadora se ve limitada al soplar en dirección prácticamente paralela a la costa, de manera que son los vientos de poniente los que, al soplar perpendicularmente a ella, forman la mayoría de los cordones dunares del litoral gaditano (cordones muy continuos pero de desarrollo vertical modesto debido al alto grado de humedad de estos vientos) (**Gracia et al., 2006** y **Gracia et al., 2011**).

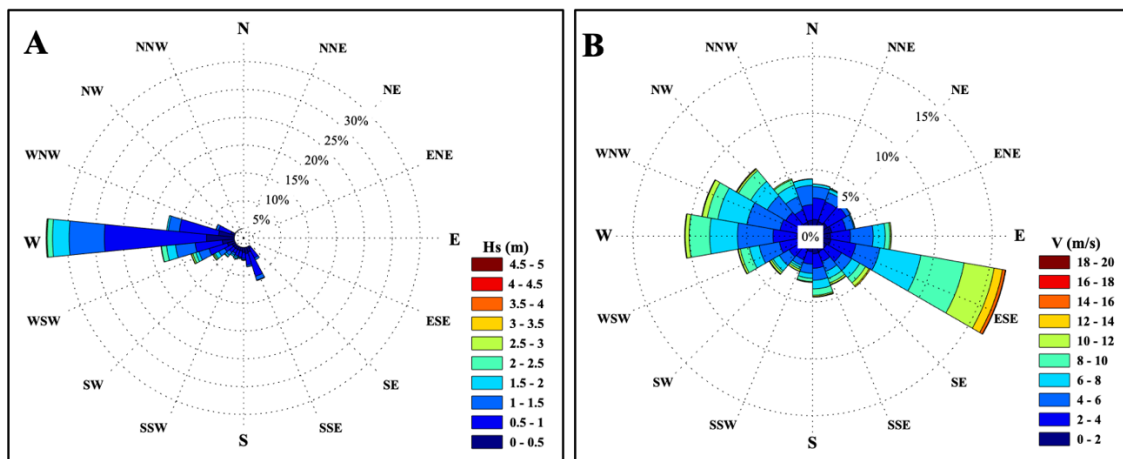


Figura 3. (A) Rosa de oleaje que presenta la dirección predominante del mismo y la escala de alturas significantes (Hs) y (B) rosa de viento con su dirección predominante y la escala de velocidades (V).

De acuerdo con la Directiva Hábitats, las dunas de la playa de Camposoto, englobadas en el sistema dunar de “El Chato-Sancti Petri”, cuentan con cuatro Hábitats de Interés Comunitario: dunas móviles embrionarias (HCI 2110), dunas móviles del litoral con *Ammophila arenaria* o dunas blancas (HCI 2120), depresiones intradunares húmedas (HCI 2190), y dunas con *Pinnus pinae* y *Pinnus pinaster* (HCI 2270), aunque este último no se encuentra en la playa de Camposoto (**García de Lomas et al., 2011**). Las características morfológicas de las dunas que se encuentran en la zona de estudio son variables: en la sección norte de la playa, las dunas son más bajas y menos vegetadas que en la región central-sur, las cuales se encuentran más estabilizadas.

Por otro lado, las dunas de Camposoto están clasificadas según el DVS (*Dune Vulnerability System*) desarrollado por **García-Mora et al., (2001)** como dunas del Grupo III, las cuales deben su vulnerabilidad principalmente a las condiciones

geomorfológicas del sistema y a la influencia marina, aunque presentan una importante contribución del estado de la vegetación y de la dinámica eólica.

No obstante, existe cierta presión humana debida a actividades principalmente turísticas, especialmente durante el verano, responsables de la presencia de elementos antrópicos tales como accesos y pasarelas de madera colocados sobre las dunas, parkings, una carretera (Talavera, 2019) y un paseo contiguo construido en los últimos años que actualmente continúa en obras por problemas de estabilidad y daños causados por los temporales (Talavera *et al.*, 2018). Además, durante la época estival se instalan infraestructuras desmontables sobre la parte alta de la playa para dar servicio al ingente influjo de usuarios (Talavera, 2019).

En cómputo general, tal como se determinó en los estudios de Del Río *et al.* (2013), Puig *et al.* (2016) y Talavera *et al.* (2018), Camposoto se trata de una playa especialmente expuesta en la que predomina una erosión costera media-alta y que sufre desde hace muchos años un proceso de *rollover* con unas tasas de retroceso de en torno a 1 metro al año (Del Río *et al.*, 2013), proceso que implica la migración de la barrera hacia tierra mediante la deposición del material erosionado detrás del cordón dunar, formándose así los mencionados abanicos de desbordamiento (Masselink & Russell, 2013). Este comportamiento es natural en las flechas e islas barrera a nivel mundial debido al cambio climático que aumenta y acelera los procesos erosivos que sufren. (Ranasinghe, 2016). Otras evidencias de este fenómeno son el afloramiento de antiguos depósitos de marismas en la zona intermareal tras eventos energéticos (Del Río *et al.*, 2003 y Alonso *et al.*, 2009) y el retroceso del pie de duna registrado entre 1956 y 2008 y descrito por Del Río *et al.* (2013).

3 Metodología

Para el estudio de la evolución del cordón dunar de la playa de Camposoto se ha elegido como indicador el pie de duna del mismo. Su determinación es posible gracias a levantamientos topográficos realizados con un sistema GPS-RTK, y a imágenes obtenidas en vuelos de dron (UAS, Unmanned Aerial System) del servicio de Drones de la Universidad de Cádiz, cuyo conjunto recoge los cambios que tienen lugar en la zona de estudio entre 2008 y 2018. En función de estos dos tipos de metodología (Figura 4), el proceso se puede dividir en dos fases: la primera incluye el tratamiento de los datos obtenidos con el GPS-RTK y abarca desde octubre de 2008 hasta enero de 2014, y la segunda los vuelos del UAS que proporcionan datos entre enero de 2017 y enero de

2018. En la **Tabla 1** del Anexo I se recoge un listado de las fechas de cada pie de duna, junto con el equipo usado para medir cada uno de ellos.

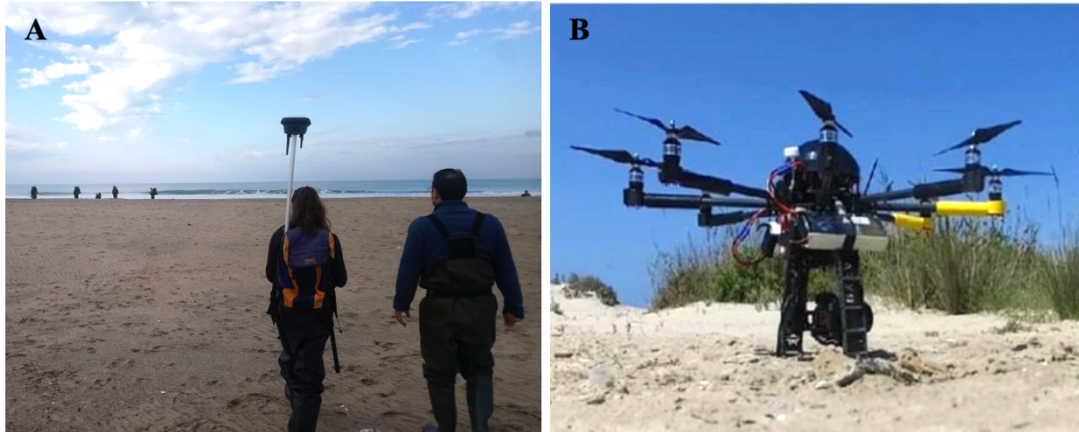


Figura 4. (A) Imagen tomada durante una campaña de levantamiento topográfico con GPS-RTK en la playa de Camposoto, y (B) fotografía del Octocóptero utilizado para los vuelos UAS (Talavera, 2019).

En ambas fases el objetivo es común: obtener el pie de duna, para lo cual en la fase primera se han revisado todas las campañas, y se han seleccionado aquellas en las que se había realizado el posicionamiento y levantamiento de la línea marcada por el citado pie. Por otro lado, en la segunda fase se han analizado las imágenes de los vuelos, con un tratamiento diferente, que consistió en la identificación del pie de duna de forma manual.

3.1 Obtención de los pies de duna entre 2008 y 2014 (GPS-RTK)

Las campañas de los levantamientos topográficos se realizaron durante el periodo mencionado, utilizando el equipo GPS-RTK Leica 900. En estas campañas, se tomaron medidas del perfil de la playa, y en algunas de ellas, también del pie del cordón dunar. Los datos proporcionados por el GPS-RTK se procesan después en forma de puntos, con coordenadas X, Y, Z, correspondientes a latitud, longitud y elevación o altura (referido al elipsoide y posteriormente trasladado al datum del Zero hidrográfico local), respectivamente.

El primer paso consistió en revisar cada una de las campañas para filtrar solo las que proporcionasen datos del pie de duna. Así, se obtuvieron 36 campañas que cubren el periodo de tiempo comprendido entre octubre de 2008 y enero de 2014. Puesto que los datos que se buscaban aparecían junto con los perfiles de playa, se les aplicó una rutina de MATLAB®, con la que se depuró cada una de las campañas filtradas de manera que solo presentasen los puntos correspondientes al pie de duna. Una vez realizada la limpieza, los pies de duna se ordenaron cronológicamente. De cada uno de ellos se

calculó, con una nueva rutina de MATLAB®, su altura media, mínima y máxima, y su desviación estándar. Adicionalmente, se elaboró una base de datos en la que se registra cada pie de duna con su respectiva fecha y con los datos de altura y estadísticos referidos anteriormente.

3.2 Obtención de los pies de duna a partir de los vuelos UAS

El servicio de UAS, (Unmanned Aerial System) de la Universidad de Cádiz realizó para el trabajo de **Talavera (2019)** una serie de vuelos con el objetivo de estudiar la flecha de Sancti Petri en su conjunto.

Estos abarcan un área mayor que la presente zona de estudio, dividida en tramos del 1 al 8. Por ello, se seleccionaron solo los tramos 4, 5 y 6, que son los que cubren el área de estudio del presente trabajo (**Figura 2B**). Para esto se utilizó una ortofoto de la zona obtenida del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), la cual se cargó en el software ArcGIS®, junto con los perfiles de playa que servían de guía para delimitar el área de estudio. Los vuelos seleccionados comprenden el periodo de tiempo transcurrido entre enero de 2017 y enero de 2018.

En esta fase, la determinación del pie de duna es manual: se cargaron los mosaicos de cada vuelo junto con una máscara que registra los datos de elevación de estos (DSM), y sobre ellos se trazó una línea que marcaba el pie de duna, siguiendo un criterio propio de la forma más homogénea posible. En este caso se tomó como referencia la vegetación de las dunas como límite exterior del cordón, de manera que se incluyera dicha vegetación en él, ya que este fue el criterio que se usó al medir el pie de duna con el GPS-RTK. En aquellas zonas donde no había vegetación, pero se apreciaban morfologías dunares claras, con una elevación considerable y con morfologías eólicas, estas fueron consideradas dunas embrionarias y por tanto se incluyeron también. Los lugares donde la máscara del DSM mostraba cierta elevación, pero no existían ni vegetación ni morfologías claras, no se incluyeron. Tampoco lo hicieron los puntos donde se veían costras de arena por considerarse que esta formación es propia de sedimento no movilizable por el viento, ni las bermas y escarpes.

En general, se mantuvo una escala constante, entre 1:200 y 1:300, para conservar el criterio visual lo más intacto posible en cada uno de los vuelos. En lugares donde hubo incertidumbre, la escala se amplió o se redujo según se consideró necesario de forma puntual para tomar perspectiva a la hora del marcaje.

Una vez se trazaron todos los pies de duna, se realizó una revisión para comprobar la uniformidad del criterio seguido, teniendo que modificarse algunos de ellos. En el programa (ArcGIS®) se trazaron las líneas como “polilíneas”, las cuales se componen de una serie de “vértices” sin valores numéricos. Para obtener dichos valores y poder manejar posteriormente los pies de duna, primero se comprobó que las polilíneas estaban ordenadas de forma espacial y numeradas correctamente: la primera debía ser la situada más al norte, y la última la situada más al sur. La existencia de varias polilíneas en un solo pie de duna se debe a los cortes realizados a lo largo del mismo, y las anomalías en el orden espacial se deben a las modificaciones realizadas. Una vez ordenadas, los vértices pasaron a ser puntos, y se guardaron. Fue preciso comprobar que los puntos nuevos aparecían correctamente sobre la polilínea, y que están ordenados de igual forma. Tras ello, se procedió al cálculo de las coordenadas X e Y de cada punto (coordenadas geométricas). Para el cálculo de la coordenada Z (altura), se usaron los datos de la elevación superficial correspondiente a los mismos desde el DSM. Se generó así una máscara nueva que recogía las tres coordenadas. Una vez se comprobó que los puntos estaban correctamente ordenados y que su valor en la DSM se correspondía con el valor calculado para Z, se exportaron las columnas que contenían los datos de X, Y, Z. Tras este paso, los archivos de Excel resultantes estaban listos para ser tratados con la rutina de MATLAB® anteriormente mencionada, de forma similar a los pies de duna tomados mediante el GPS-RTK. De esta forma se consiguió que todos los datos fueran comparables.

3.3 Evolución del pie de duna

El conjunto de los 44 pies de duna obtenidos con los métodos anteriores hubo de acompañarse con una tabla adicional que recogía las fechas en forma vectorial (año, mes, día, hora, minutos, segundos), y se guardaron todos ellos como un espacio de trabajo sobre el que se realizaron los posteriores cálculos.

Puesto que el objetivo es detectar movimientos de retroceso o avance en el pie de duna a lo largo del periodo de estudio, es preciso calcular la distancia a la que este se encuentra respecto a una base fija que sirve como referencia. Esta base fue una línea recta, colocada con la misma orientación que la línea de costa (NO-SE, a 155°), y por detrás (hacia tierra) del cordón dunar. La longitud de la línea de base se estableció en 480 metros, y sobre ella se situaron 24 nodos, distribuidos uniformemente y separados entre

sí 20 metros. De cada uno de ellos, y perpendiculares a la línea de base, se proyectaron 24 perfiles.

Este sistema tiene como finalidad el cálculo de la distancia entre cada uno de los pies de duna y la línea de base. No obstante, estos vienen expresados en forma de puntos. Para solventar esto y poder encontrar los cortes entre los perfiles y los pies de duna, se creó una rutina que interpolaba los puntos de cada pie, de manera que se creaba una línea continua. De esta forma todos los perfiles cortaban en algún momento los pies de duna, tal como se muestra en la **Figura 5**.

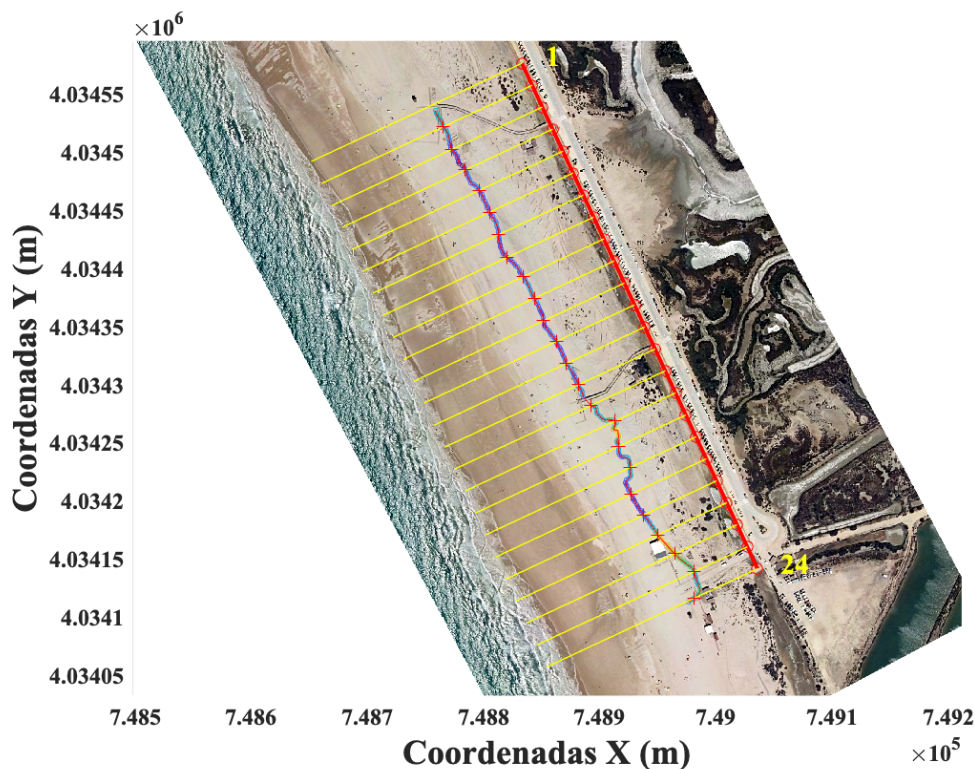


Figura 5. Ejemplo en el que se muestra el pie de duna n° 21 (febrero de 2010) junto con la línea de base en rojo y los 24 perfiles perpendiculares a ella en amarillo. Los distintos colores que aparecen a lo largo del pie de duna se deben a los valores de la altura (coordenada Z) de los puntos que lo conforman. Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía aérea (PNOA, 2019).

Además de calcular las distancias a la línea de base, las cuales se organizaron en una tabla, se han calculado los valores de cuatro parámetros estadísticos de cambio: el *Net Shoreline Movement* (NSM), el *Shoreline Change Envelope* (SCE), el *End Point Rate* (EPR), y la *Linear Regression Rate* (LRR) (Himmelstoss *et al.*, 2018) siguiendo el modelo del Digital Shoreline Analysis System (DSAS). El primero (*Net Shoreline Movement*) expresa la distancia en metros entre el pie de duna más antiguo y el más reciente. Representa la distancia de cambio neta, y no tiene en cuenta las transformaciones que hayan podido ocurrir en las fechas intermedias. El *Shoreline Change Envelope*, por su parte, expresa la distancia en metros entre el pie de duna más

cercano a la línea de base, y el más lejano, representado así la máxima variabilidad del pie de duna a lo largo del periodo de estudio, independientemente de las fechas en que se hayan producido los cambios, o el signo de estos (erosión/acreción). El *End Point Rate* o *tasa de punto final*, solo tiene en cuenta el primer pie de duna y el último, y expresa la tasa (en metros por año) de retroceso (valores negativos) o avance (valores positivos) entre ellos. Por último, la *Linear Regression Rate* o *tasa de regresión lineal* representa la tasa (en metros por año) de cambio (retroceso/avance) del pie de duna durante el periodo de estudio, teniendo en cuenta todos ellos. Es la medida más utilizada para expresar las velocidades de cambio costero (Himmelstoss *et al.*, 2018). Al igual que en el EPR, valores negativos indican retroceso o erosión, y valores positivos indican avance o acreción.

En adición a las distancias a la línea de base y los parámetros anteriores, se ha calculado también la altura del pie de duna en cada punto de corte con cada perfil, y se han organizado igualmente en una tabla para las posteriores representaciones gráficas.

De forma complementaria, se representaron gráficamente las tendencias de cada estadístico, junto con una comparación entre los pies de duna número 1 (10 de octubre de 2008), 18 (21 de diciembre de 2009), 21 (2 de febrero de 2010), 22 (4 de marzo de 2010) y 44 (19 de enero de 2018).

Finalmente, con el objetivo de caracterizar la evolución temporal completa de todos los pies de duna se ha tenido en cuenta la evolución de dos variables: la distancia a la línea de base, y la altura. En ambos casos, se han filtrado para cada fecha los valores máximos y mínimos de cada variable, y la diferencia entre estos valores obteniendo así la variabilidad. Conjuntamente, se calculó el valor medio de las variables para cada pie de duna para observar la tendencia que estas variables han seguido.

4 Resultados

En primer lugar se van a mostrar los resultados obtenidos para los diferentes estadísticos mencionados en el apartado anterior en función de su distribución espacial. Para la correcta interpretación de las siguientes gráficas ha de tenerse en cuenta que los perfiles se distribuyen del 1 al 24 por orden espacial sobre la línea de base, en dirección NO-SE, siendo el 1 el situado más al norte y el 24 el situado más al sur.

4.1 Parámetros estadísticos

Por un lado, el *Net Shoreline Movement* (NSM) y el *Shoreline Change Envelope* (SCE) ofrecen valores netos del cambio en el pie de duna.

El NSM (**Figura 6**) muestra en su representación diferentes tendencias a lo largo de los perfiles. Por un lado, entre el 1 y el 5 (sector más al norte), el pie de duna presenta un retroceso neto de hasta -30 metros. No obstante, a partir del perfil 12, el retroceso es menor y oscila entre los -15 y los -2 metros. Cabe destacar la existencia de un pico en el perfil 14, con un valor positivo de 10 que indicaría acreción. Para el conjunto de los perfiles, el retroceso medio reflejado por el NSM es de 13.37 metros.

El SCE de la **Figura 7**, por su parte, revela una variabilidad máxima de 55 metros, localizada en el perfil 5. En general, de forma similar al NSM, los valores altos de variabilidad se sitúan en el sector norte, entre los perfiles 1 y 8, y a partir de este sus valores descienden notablemente, alcanzando su mínimo en el perfil 11. Existe un pico en torno al perfil 23 donde se alcanza una variabilidad grande, cercana a la máxima. Entre los perfiles 13 y 22, el SCE se mantiene relativamente estable en torno a los 30 metros. La variabilidad media del estadístico a lo largo de todos los perfiles es de 35.66 metros.

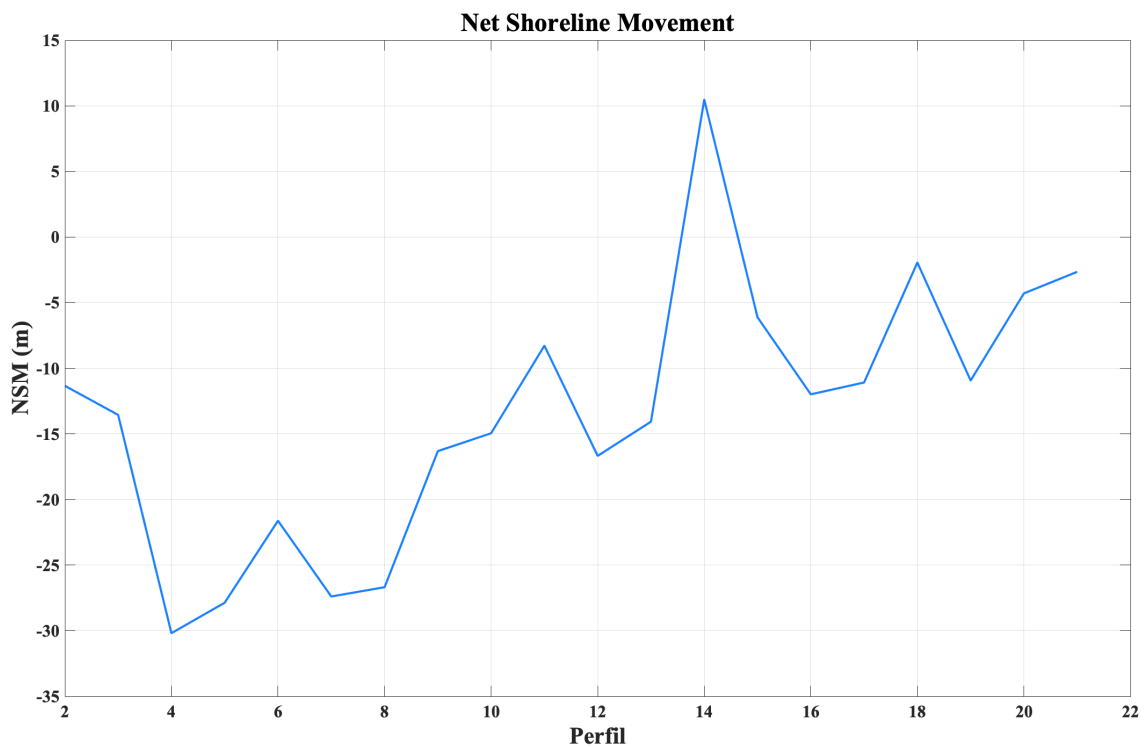


Figura 6. *Net Shoreline Movement* (NSM). Calculado para cada perfil a partir del primer pie de duna (octubre de 2008) y el último (enero de 2018). Valores negativos indican erosión, y valores positivos indican acreción.

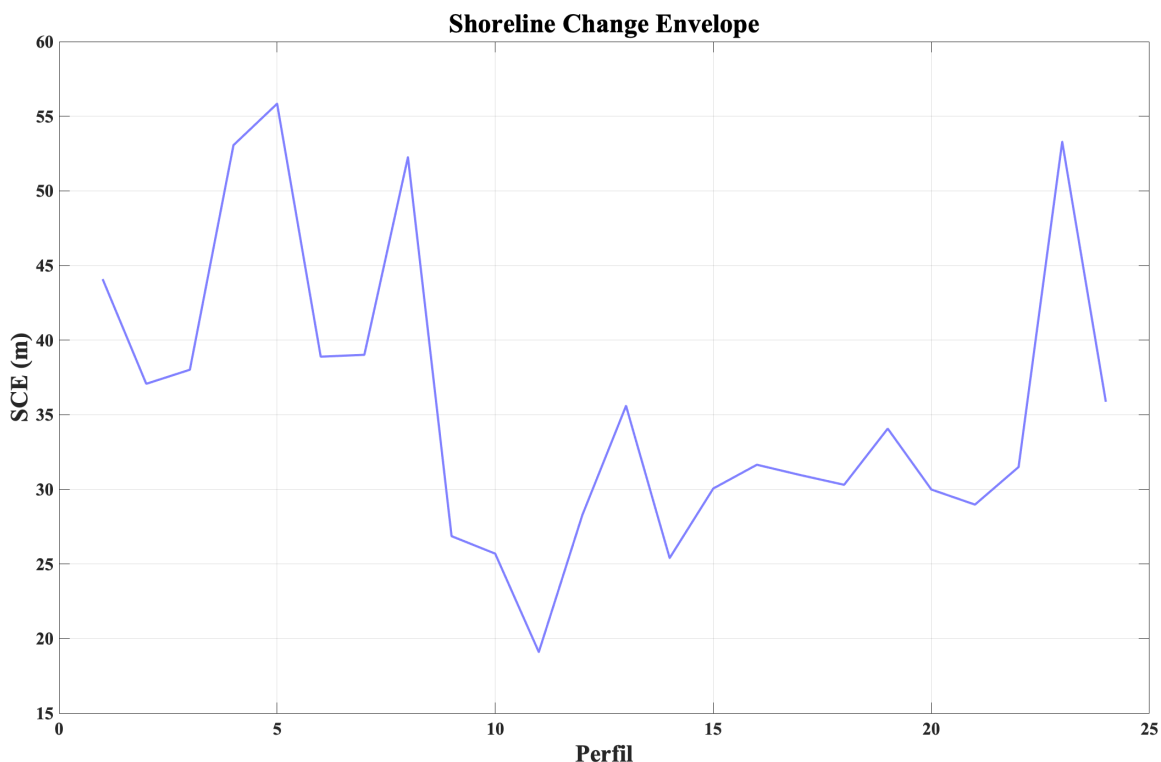


Figura 7. *Shoreline Change Envelope* (SCE) calculado para cada perfil a partir del pie de duna más lejano y el pie de duna más cercano a la línea de base. Puesto que representa una variabilidad, todos sus valores son positivos.

Por otro lado, las tasas de cambio anuales de los pies de duna vienen representadas por el *End Point Rate* (EPR) y el *Linear Regression Rate* (LRR).

La gráfica del EPR (**Figura 8**) muestra una tendencia ascendente de la tasa de cambio a lo largo de los perfiles. En los primeros perfiles (del 3 al 8), alcanza unos valores negativos altos de hasta -3,24 m/año (perfil 4). A partir del perfil 10, la tasa refleja un retroceso menor, cercano al equilibrio del perfil 18 en adelante, y con un valor positivo de 1.13 m/año en el perfil 14 que indicaría acreción. El valor medio del EPR es de -1.44 m/año.

En la **Figura 9** se muestra la tasa de regresión lineal (LRR). Todos sus valores a lo largo de los 24 perfiles son negativos, indicando esto una tendencia general de erosión, que alcanza sus valores máximos en el perfil 5 con una tasa de retroceso de -4 m/año, y sus valores mínimos en el perfil 14, con una tasa de retroceso de -0.30 m/año. No obstante, hay una diferencia clara entre los primeros perfiles (del 1 al 10) y el resto de ellos. La tasa de regresión lineal media es de -2.29 m/año (erosión).

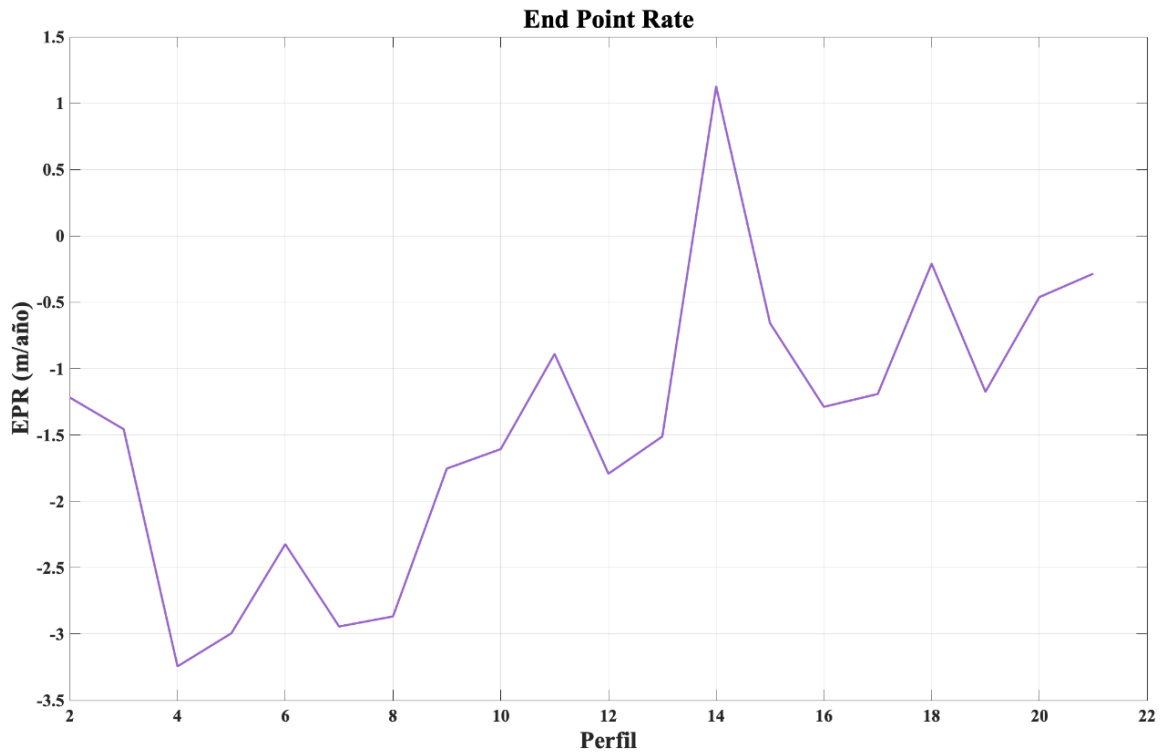


Figura 8. *End Point Rate* (EPR) calculada para el primer pic de duna y el último. Valores negativos indican erosión y valores positivos indican acreción.



Figura 9. *Linear Regression Rate* (LRR) calculada para los 47 pies de duna del estudio. Valores negativos indican erosión, y valores positivos indican acreción.

4.2 Comparación de distintos pies de duna

Si se contrastan varios pies de duna, tal como muestra la **Figura 10**, es evidente un retroceso del último pie (enero de 2018) con respecto al de 2008. Se aprecia una mayor diferencia entre ambos en el sector norte, mientras que en el sector sur esta diferencia es mucho más pequeña o incluso nula en algunos puntos. Por otra parte, el pie de duna correspondiente a diciembre de 2009 se encuentra por delante o encima del de 2008, mientras que las líneas de febrero y marzo de 2010 marcan un retroceso acusado del pie de duna con respecto a 2009.

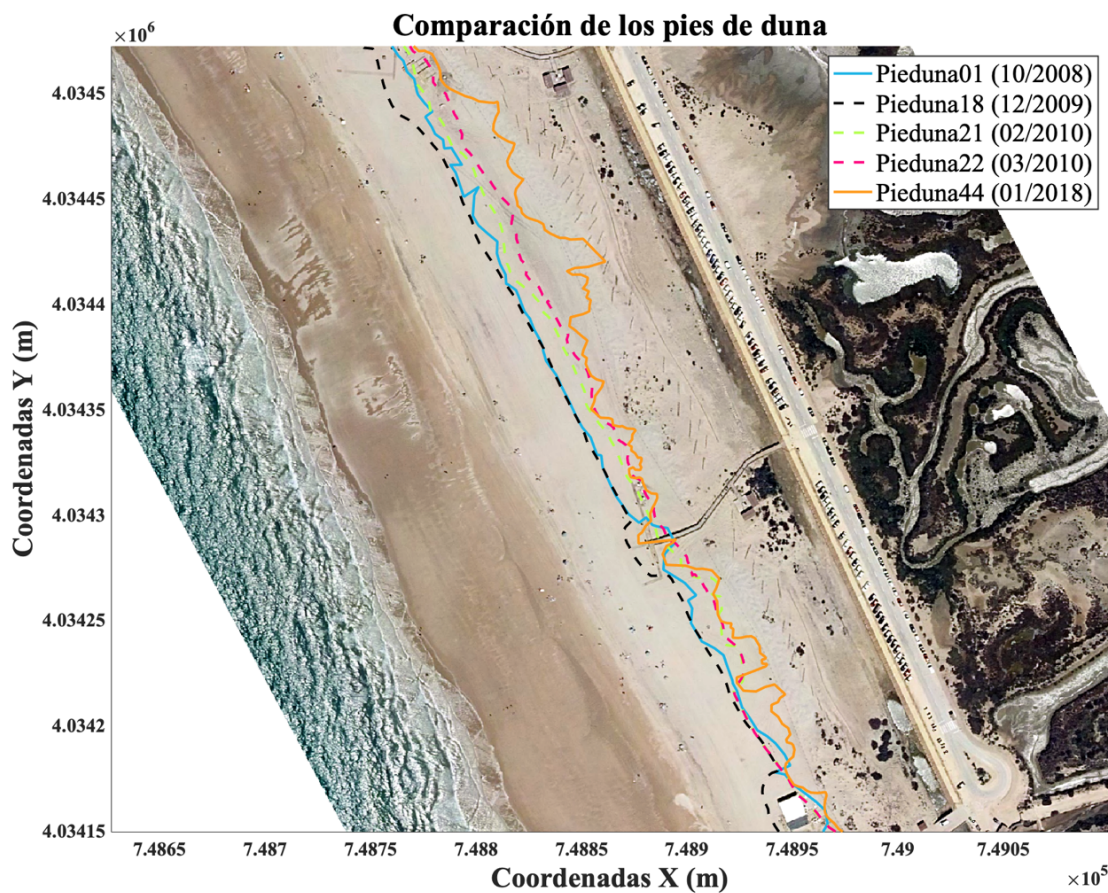


Figura 10. Representación de cinco pies de duna: el primero (octubre de 2008), el último (enero de 2018) y tres intermedios correspondientes a diciembre de 2009, y febrero y marzo de 2010, periodo en que hubo un temporal marítimo de grandes dimensiones (Xynthia).

Al comparar las alturas de los pies de duna anteriores (**Figura 11**), no se observa una tendencia clara a lo largo de los perfiles, aunque los valores más bajos se concentran en general en la primera mitad de los perfiles. En los últimos cinco, por el contrario, existe una ganancia de altura. Sí se aprecia una disminución de la altura de las dunas con el tiempo, salvo en el caso de marzo de 2010. También destaca la mayor variabilidad

espacial en el pie de duna de 2018 con respecto al de 2008 y el claro rebajamiento de la cota.

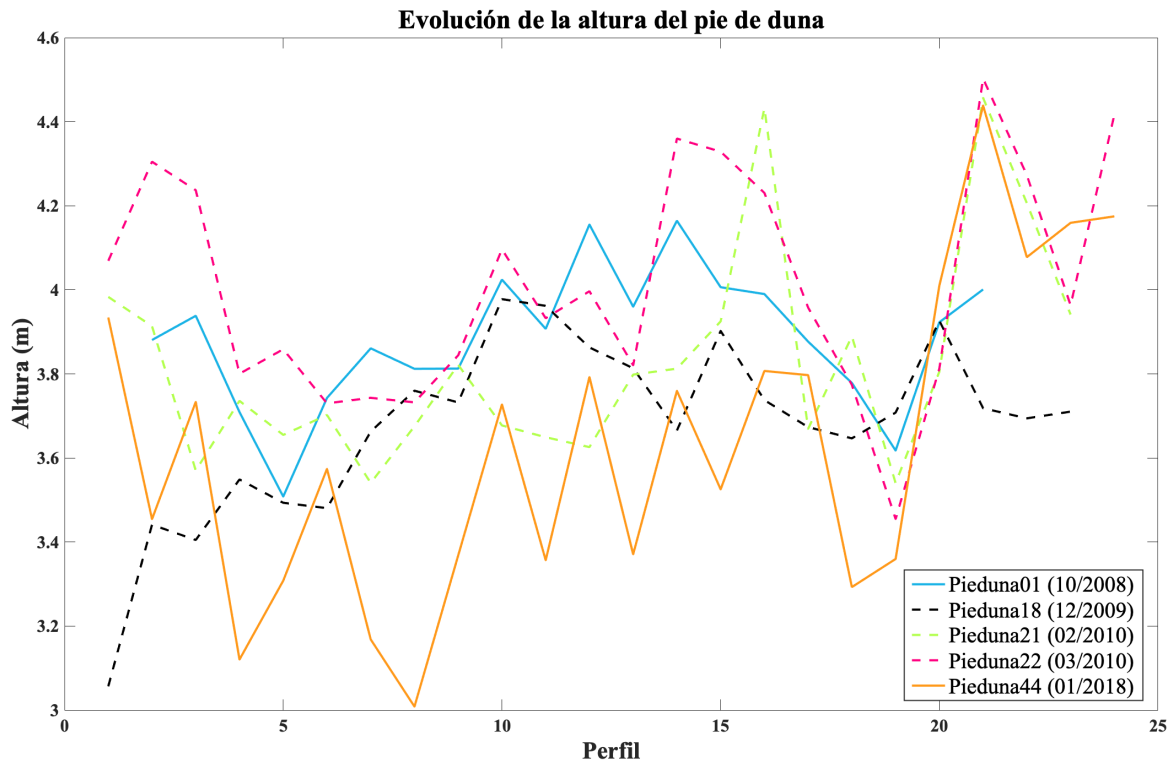


Figura 11. Comparación entre las alturas de los pies de duna de octubre de 2008 (primero), diciembre de 2009, febrero y marzo de 2010, y enero de 2018 (último) a lo largo de los 24 perfiles.

4.3 Evolución temporal de los pies de duna

En la evolución temporal de la distancia de los pies de duna a la línea de base (**Figura 12**) se aprecia sobre todo un aumento de la variabilidad entre las distancias mínimas y máximas de cada pie de duna con el tiempo, así como una tendencia descendente de la misma, indicando un claro retroceso de todo el pie de duna. No obstante, al observar la **Figura 13**, que presenta la evolución igualmente temporal, pero de las alturas de los pies de duna, aunque existe aumento en la variabilidad entre los valores máximos y mínimos, no se aprecia una tendencia clara de aumento o descenso de la variable, lo que indica que a pesar de las grandes variaciones ha permanecido prácticamente constante.

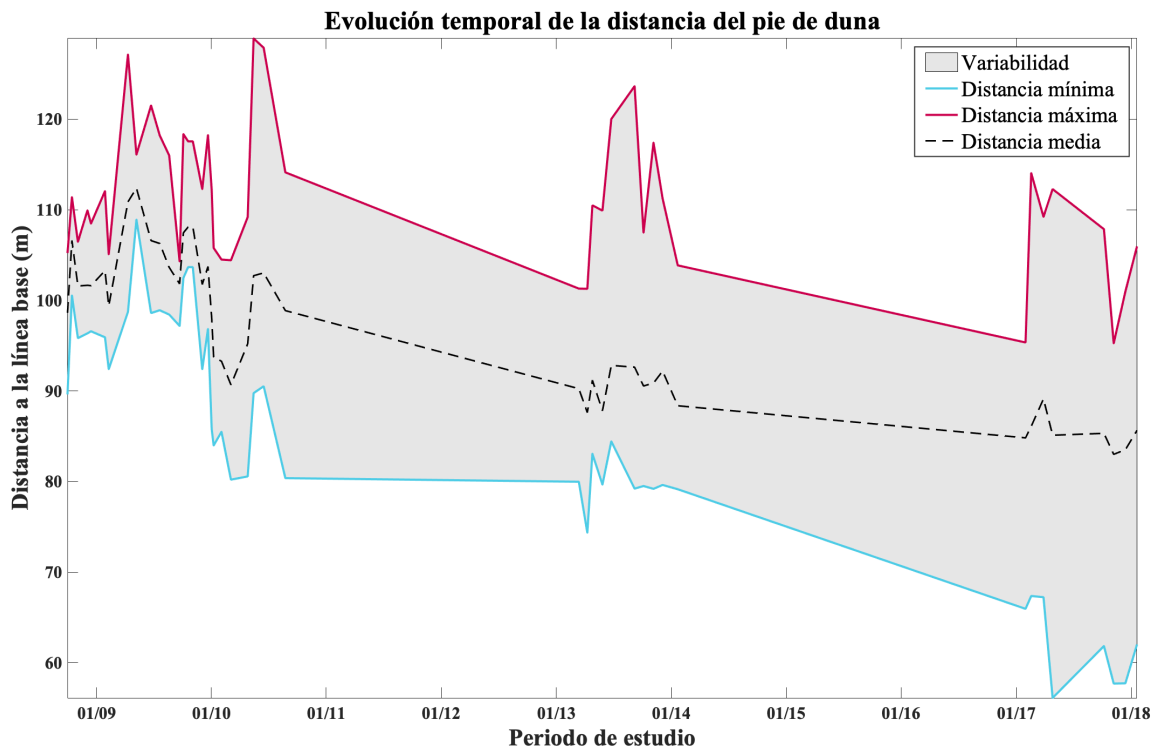


Figura 12. Evolución, a lo largo del periodo de estudio, de la distancia a la línea de base de los pies de duna. Se muestra la distancia mínima y máxima de cada uno, y su diferencia o variabilidad coloreada en gris, junto con la distancia media. Los fragmentos que aparecen como líneas rectas se corresponden con periodos sin datos.

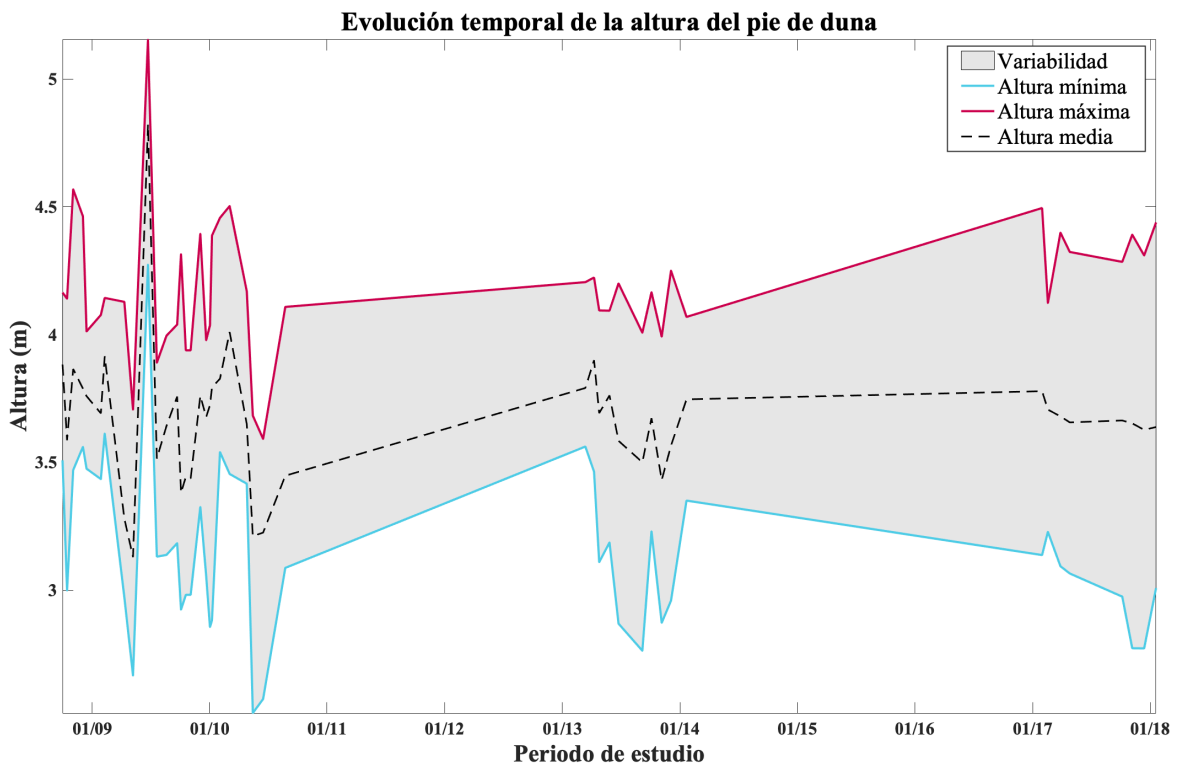


Figura 13. Evolución, a lo largo del periodo de estudio, de las alturas de cada pie de duna. Para ello se presentan las alturas máximas y mínimas de cada uno de ellos, y su diferencia o variabilidad coloreada en gris, así como la altura media. Los fragmentos de las líneas que aparecen como líneas rectas se corresponden con periodos sin datos.

5 Discusión

Al interpretar los resultados obtenidos, se pueden diferenciar dos cuestiones importantes relacionadas con la caracterización y evolución del sistema dunar. Por un lado, el retroceso general del pie de duna durante el periodo estudiado, y por otro las diferencias registradas en su evolución entre el tramo norte del área de estudio, y el tramo sur.

Las tasas mediante las que se ha cuantificado el cambio en la línea del pie de duna son notablemente diferentes: el EPR, al solo comparar dos pies de duna, no es tan representativo como el LRR a la hora de describir su evolución temporal. De hecho, ambos presentan valores alejados (-1.44 y -2.29 m/año), aunque sí coinciden en signo (erosión). Uno de los motivos de esta diferencia es la existencia del pico registrado en el perfil 14 (ver **Figura 8**), el cual presenta un valor positivo, de acreción. Sin embargo, tras revisar ortofotos de la zona, se ha visto que el perfil de dicho punto coincide con una pasarela de acceso a la playa. La presencia de esta estructura puede implicar la acumulación de arenas a su alrededor, ya que crea una zona de sombra y disminuiría la energía de las olas que la alcanzaran, al chocar estas contra las estacas que la sujetan. Es por ello que los datos obtenidos del perfil 14 no son representativos del cordón dunar en sí. Así lo corrobora la LRR, ya que todos sus valores a lo largo de los perfiles son negativos, por lo que se puede afirmar que la tendencia general del sistema dunar de la playa es erosiva. Esta tendencia se venía observando en trabajos anteriores sobre la zona (**Del Río et al., 2013; Puig et al., 2016**), en los que se determinan tasas de retroceso medio de la flecha de Sancti Petri de entre 1 y 1.7 m/año, respectivamente. Dichas tasas cubren un periodo comprendido entre 1956 y 2010, de manera que conforme a los resultados del LRR del presente trabajo se puede diagnosticar una aceleración del proceso erosivo que está sufriendo la playa de Camposoto.

Los distintos comportamientos existentes entre el pie de duna del sector norte del área de estudio y el del sector sur, obligan a hacer una diferenciación entre ambos. Como puede verse en la **Figura 9**, la mitad norte de los perfiles concentra en ella los valores más altos de la tasa de retroceso, mientras que en la zona sur estos son menos elevados. Esta tendencia es similar en todos los parámetros, no solo en las tasas (LRR y EPR): el SCE presenta los valores más altos de variabilidad de la distancia a la línea de base también en la zona norte (**Figura 7**), y de igual forma el NSM registra los valores más altos de retroceso en dicho sector (**Figura 6**). Estas diferencias de comportamiento podrían explicarse en dos situaciones diferentes: un cordón dunar sin presión antrópica,

en el que todos los cambios que se producen son fruto exclusivamente de la naturaleza de este y de los agentes naturales que sobre él actúan, o un cordón dunar con presión antrópica, donde se dan alteraciones e intervenciones humanas que influyen directamente en la dinámica del sistema. Así, en el primer caso, el diferente comportamiento de dos tramos de cordón dunar en un área de estudio no muy extensa como la presente, se explicaría principalmente en diferencias entre la estabilidad de las dunas que lo componen. Aquellas que fueran más estables o de mayores dimensiones, experimentarían una erosión menor que las dunas más pequeñas y peor estabilizadas, las cuales se verían sobrepasadas más fácilmente por las olas de los temporales que azotan la costa todos los años. De acuerdo con esto, la playa de Camposoto tendría, en su sector norte, dunas de menor altura o menos estables que en su sector sur, tal como muestra la **Figura 11**. Además, la mayor variabilidad en los valores de dicha figura indica que las dunas de 2018 son, con respecto a las de 2008, menos estables, hecho que queda remarcado también por presentar todo el pie una cota menor o cercana a los 3.5 metros, el límite de pleamar viva (**Aboitiz et al., 2008**). No obstante, la zona de estudio no está exenta de la presión antrópica mencionada. Como se ha descrito anteriormente, presenta varias infraestructuras fijas, y chiringuitos y otros servicios desmontables durante la época estival, para los cuales se realizan operaciones de relleno con arenas. El tramo meridional del cordón dunar analizado en este trabajo coincide con la ubicación de un chiringuito, para cuya instalación se realiza un levantamiento con arena de forma puntual, acción que podría influir en la estabilidad de esa zona de la playa, dotando a las dunas de un posible aporte de arena.

Otro punto importante es el aumento en la variabilidad, tanto de la altura de las dunas, como de la distancia a la línea de base, obtenido en los diferentes análisis. Se produce a lo largo del tiempo para ambos casos y podría deberse precisamente a la ya mencionada variación espacial del pie de duna. Así, en la **Figura 10** se puede ver cómo la línea que marca el pie de duna de octubre de 2008 es más lineal que la de 2018. Sugiere que prácticamente todo el cordón se encuentra al mismo nivel, con un ligero receso en el último tramo. El siguiente pie de duna representado (diciembre de 2009), marca el final de un periodo de estabilidad costera durante el cual no hubo temporales marítimos fuertes que generasen episodios drásticos de erosión. Por ello, este pie de duna aparece por delante del primero, evidenciando una época de acreción y crecimiento aparente del cordón dunar. No obstante, en tan breve periodo de tiempo no se puede formar una duna estable (**Sanjaume et al., 2011**), por lo que este avance será muy vulnerable ante un

temporal marítimo. De hecho, en los meses siguientes impactó en la costa gaditana el episodio energético más importante que se había registrado hasta entonces en los 50 años previos: la tormenta Xynthia (**Garnier et al., 2018**). En él reside la explicación para el retroceso del pie de duna apreciable entre la línea de diciembre de 2009, y la de marzo de 2010, mes en que finalizó el grupo de temporales. De todas las tormentas que lo conformaron, la acaecida entre febrero y marzo fue la más importante, generando por sí sola el retroceso observado en la **Figura 10** entre las líneas de febrero y marzo de 2010. En todos los pies de duna posteriores a 2008, se van apreciando ya las dos dinámicas del cordón dunar. Lo más probable es que la erosión evidenciada por todos los resultados sea una consecuencia de los temporales marítimos que alcanzan la costa, combinados con una falta de aporte sedimentario al sistema y que se explica en los numerosos embalses y demás modificaciones de los grandes ríos que desembocan en la zona (**Benavente et al., 2002**). Por otro lado, el retroceso episódico de las dunas es un comportamiento normal: una vez que el temporal alcanza la duna comienzan el régimen de colisión (**Sallenger, 2000**), la erosión dunar y la generación de abanicos de desbordamiento (**Matias et al., 2008**). Estas morfologías indican el transporte de sedimento hacia el interior, contribuyendo al *rollover* de la flecha (**Masselink & Russell, 2013**). De esta forma, a medida que transcurren los años y los temporales fuertes van alcanzando la playa, la sección norte se va erosionando a mayor ritmo que la sección sur generando a su vez esa variabilidad creciente recogida en la **Figura 12** y en la **Figura 13** y que se puede relacionar con la presencia de los abanicos de desbordamiento que se producen en las zonas más bajas, aumentando también su vulnerabilidad. Todo ello deriva en un progresivo deterioro del cordón dunar a un ritmo que supera la capacidad de respuesta de este, lo que resulta en un sistema playa-duna que cada vez es más susceptible a los episodios energéticos debido a una falta de estabilidad y aporte sedimentario importante (**Delgado-Fernández et al., 2019**).

En base a los resultados obtenidos se muestra urgente un cambio en las políticas que actualmente se están aplicando para la estabilización y mejora de la playa de Camposoto y que han de pasar por la restauración del cordón dunar. Así, se proponen las siguientes recomendaciones con miras a mejorar la situación del sistema:

- Replantar la efectividad de las restauraciones dunares realizadas hasta la fecha creando planes de restauración que impliquen la re-vegetación o introducción de

especies pioneras con miras a estabilizar mejor las dunas más cercanas a la línea de costa, e incluso la introducción de una duna embrionaria delante del cordón.

- Mejorar la protección actual de las dunas, modificando el emplazamiento de las estacas y los cercos para evitar así el pisoteo de los montículos o dunas embrionarias que puedan formarse en la parte alta de la playa, especialmente durante la época estival.
- Reducir la presión antrópica del entorno, punto que resulta ya difícil en tanto que, en lugar de llevar a cabo una operación de retranqueo, se ha reformado la carretera situada detrás de las dunas y que a día de hoy cuenta con más plazas de parking y un paseo cimentado.
- Fomentar la difusión de información sobre los beneficios de los sistemas dunares, su valor ecosistémico y la importancia de su mantenimiento, así como sobre las amenazas que sufren y sus consecuencias para el bienestar medioambiental y socioeconómico, de cara a concienciar a la población que visita estos enclaves e incentivar su colaboración en el cuidado de estos enclaves.

6 Conclusiones

El análisis realizado sobre el cordón dunar del sector sur de la playa de Camposoto ha mostrado una aceleración del proceso erosivo que se había observado en trabajos previos, con una tasa media de -2.29 m/año.

Se ha observado que este retroceso no es homogéneo espacialmente siendo más intenso en la zona norte del área de estudio, con valores netos de 30 metros y tasas de hasta -4 m/año, mientras que la zona sur presenta valores mucho más bajos.

Esta diferencia puede atribuirse a la variabilidad en la altura de las dunas, siendo la zona sur la que presenta una mayor cota y además la que sufre menor erosión.

En función de los resultados obtenidos parece urgente la adopción de nuevas medidas encaminadas a restaurar y reforzar el cordón dunar, fundamentalmente en su tramo septentrional.

7 Bibliografía

- ABOITIZ, A., TEJEDOR, B., MUÑOZ, J. J., & ABARCA, J. M. (2008). Relation between daily variations in sea level and meteorological forcing in Sancti Petri Channel (SW Spain). *Ciencias Marinas*, 34(4), 491-501.
- ALONSO VILLALOBOS, C., GARCÍA PRIETO, F. J., & BENAVENTE, J. (2009). Evolución histórica de la línea de costa en el sector meridional de la Bahía de Cádiz.
- BARRIONUEVO, J. C. B., (2006). Flora y vegetación de las costas de Andalucía, problemática y perspectivas de conservación. *SPIN CERO*, 2006(10), 50-51.
- BENAVENTE, J.; DEL RÍO, L.; ANFUSO, G.; GRACIA, F.J. & REYES, J.L. (2002). Utility of morphodynamic characterization in the prediction of beach damage by storms. In: COOPER, J.A.G. and JACKSON, D.W.T. (eds.), *International Coastal Symposium*. Journal of Coastal Research Special Issue No. 36, pp. 56 - 64.
- BENAVENTE, J., DEL RÍO, L., & GRACIA, F. J. (2009). Riesgos litorales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 277-283.
- BENAVENTE, J., RÍO, L. D., PLOMARITIS, T. A., & MENAPACE, W. (2013). Impact of coastal storms in a sandy barrier (Sancti Petri, Spain). *Journal of Coastal Research*, (65), 666-671.
- BONNET, J. (1989). Aspects of conservation and management of the sand-dune areas in Spain. In F. Van der Meulen, et al. (Eds.), *Perspectives in coastal dune management: Towards a dynamic approach* (pp. 269–275). Hague: SPB Academic Publishing.
- CABRERA, J. A., MORALES, M., ALCÁNTARA, J., CORREA, I., PÉREZ, R., & MOYA, B. V. (2012). Los riesgos litorales en el contexto del manejo integrado costero. *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral*, 415-438.
- CENTRO NACIONAL DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, (2020). *España, 8000 kilómetros de costa: actividad recomendada para alumnos de Bachillerato (16-18 años)*. Recuperado de <https://www.ign.es/web/ign/portal/publicaciones-ign>
- CHARBONNEAU, B. R., DOHNER, S. M., WNEK, J. P., BARBER, D., ZARNETSKY, P., & CASPER, B. B. (2021). Vegetation effects on coastal foredune initiation: Wind tunnel experiments and field validation for three dune-building plants. *Geomorphology*, 378, 107594.
- CHEUNG, K. F., PHADKE, A. C., WEI, Y., ROJAS, R., DOUYERE, Y. M., MARTINO, C. D., ... & NAKAZAKI, E. (2003). Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management. *Ocean Engineering*, 30(11), 1353-1386.
- COOPER, W. S. (1967). *Coastal dunes of California* (Vol. 104). Geological Society of America.
- COOPER, J. A. G., & PILE, J. (2014). The adaptation-resistance spectrum: a classification of contemporary adaptation approaches to climate-related coastal change. *Ocean & Coastal Management*, 94, 90-98.

- COSTA, M. (1987). La vegetación. *El Medio Ambiente en la Comunidad Valenciana*. Valencia: Generalitat Valenciana, 56-63.
- CUMBRERA, M. G., & LARA, E. L. (2010). Consecuencias del turismo de masas en el litoral de Andalucía (España). *Cuaderno Virtual de Turismo*, 10(1), 125-135.
- DAVIDSON-ARNOTT RGD, HESP PA, OLLERHEAD J, WALKER I, BAUER BO, DELGADO-FERNANDEZ I, SMYTH TAG (2018). Sediment budget controls on foredune height: comparing simulation model results with field data. *Earth Surf Proc Land*.
- DE LA HERA, G. (1998). Transformaciones del litoral desde mediados del siglo XX. *BAGE: Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (26), 109-120.
- DEL RÍO, L., BENAVENTE, J., GRACIA, F., ANFUSO, G., & MARTÍNEZ, J. (2003). Cuantificación de procesos de erosión costera en el litoral Suratlántico español. Primeros resultados. Dpto. de Geodinámica. *Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz-Puerto Real. España. Geogaceta*, 33, 3.
- DEL RÍO, L., PLOMARITIS, T. A., BENAVENTE, J., VALLADARES, M., & RIBERA, P. (2012). Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast. *Geomorphology*, 143, 13-23.
- DEL RÍO, L., GRACIA, F. J., & BENAVENTE, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252-266.
- DELGADO-FERNÁNDEZ, I., DAVIDSON-ARNOTT, R. G., & HESP, P. A. (2019). Is 're-mobilisation' nature restoration or nature destruction? A commentary. *Journal of Coastal Conservation*, 23(6), 1093-1103.
- DÍAZ-CUEVAS, P., PRIETO-CAMPOS, A., & OJEDA-ZÚJAR, J. (2020). Developing a beach erosion sensitivity indicator using relational spatial databases and Analytic Hierarchy Process. *Ocean & Coastal Management*, 189, 105146.
- FLOR, G. (1990). Tipología de dunas eólicas. Procesos de erosión-sedimentación costera y evolución litoral de la provincia de Huelva (Golfo de Cádiz occidental, Sur de España). *Estudios Geológicos*, 46(1-2), 99-109.
- FLOR, G., CEDRÚN, P. M., & BLANCO, G. F. (2011). Campos dunares de Asturias, Cantabria y País Vasco. *Las dunas en España* (pp. 127-159). Sociedad española de geomorfología.
- GARCÍA DE LOMAS, J., PRIETO, F. J. G., & GARCÍA, C. M. (2011). Las dunas como hábitats de interés comunitario. Problemas de conservación. *Las dunas en España* (pp. 585-606). Sociedad Española de Geomorfología.
- GARCÍA-MORA, M. R., GALLEGO-FERNÁNDEZ, J. B., WILLIAMS, A. T., & GARCÍA-NOVO, F. (2001). A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of coastal research*, 802-811.

- GARNIER, E., CIAVOLA, P., SPENCER, T., FERREIRA, O., ARMAROLI, C., & MCIVOR, A. (2018). Historical analysis of storm events: Case studies in France, England, Portugal and Italy. *Coastal Engineering*, 134, 10-23.
- GÓMEZ-PINA, G., MUÑOZ-PÉREZ, J. J., RAMÍREZ, J. L., & LEY, C. (2002). Sand dune management problems and techniques, Spain. *Journal of Coastal Research*, (36), 325-332.
- 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*, 55-63.
- GRACIA, J., BENAVENTE GONZÁLEZ, J., ALONSO VILLALOBOS, C., DEL RÍO RODRÍGUEZ, L., ABARCA, J. M., ANFUSO MELFI, G., & GARCÍA DE LOMAS BARRIONUEVO, J. (2011). Las dunas del litoral gaditano. *Las dunas en España*, 359-384.
- HIMMELSTOSS, E.A., HENDERSON, R.E., KRATZMANN, M.G., AND FARRIS, A.S. (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179, pp 48, 49, <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
- JAHANGIRZADEH, A., AKIB, S., KAMALI, B., SHAMSUDIN, N. S., & KIMIAEI, K. (2012). Effects of construction of coastal structure on ecosystem.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (2014). Medioambiente en Andalucía, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, p 3.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (2015). Plan de recuperación y conservación de especies de dunas, arenales y acantilados costeros. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb>
- Ley 28/1969, de 26 de abril, sobre Costas. *Boletín Oficial del Estado*, 101, de 28 de abril de 1969, 6358 a 6361.
- Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas. *Boletín Oficial del Estado*, 181, del 29 de julio de 1988, 23386 a 23401
- Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas. *Boletín Oficial del Estado*, 129, de 30 de mayo de 2013, 40691 a 40736.
- LEY, C., GALLEGU-FERNÁNDEZ, J. B. Y PASCUAL, C. (2007): *Manual de restauración de dunas costeras*. Dirección General de Costas, Madrid. 240 pp.
- MARTÍNEZ, M.L., PSUTY, N.P. & LUBKE R.A. (2004). Perspective on coastal dunes. *Coastal dunes: Ecology and Conservation*, 3-10.
- MASSELINK, G., & RUSSELL, P. (2013). Impacts of climate change on coastal erosion. *MCCIP Science Review*, 2013, 71-86.
- MATIAS, A., FERREIRA, O., VILA-CONCEJO, A., GARCIA, T., & DIAS, J. A. (2008). Classification of washover dynamics in barrier islands. *Geomorphology*, 97(3-4), 655-674. doi: 10.1016/j.geomorph.2007.09.010

- PLAN NACIONAL DE ORTOFOTOGRAFÍA AÉREA (2019). Obtenido de <https://pnoa.ign.es>
- PLOMARITIS, T. A., ANFUSO, G., BENAVENTE, J., & DEL RÍO, L. (2009). Storm impact and recovery patterns in natural and urbanised beaches in Cádiz (SW Spain). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 1409).
- PLOMARITIS, T. A., BENAVENTE, J., LAIZ, I., & DEL RIO, L. (2015). Variability in storm climate along the Gulf of Cadiz: the role of large-scale atmospheric forcing and implications to coastal hazards. *Climate Dynamics*, 45(9-10), 2499-2514. doi: 10.1007/s00382-015-2486-4
- PUIG, M., RÍO, L. D., PLOMARITIS, T. A., & BENAVENTE, J. (2016). Contribution of storms to shoreline changes in mesotidal dissipative beaches: case study in the Gulf of Cádiz (SW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2543-2557.
- RANASINGHE, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-science reviews*, 160, 320-332.
- RANGEL-BUITRAGO, N., & ANFUSO, G. (2013). Winter wave climate, storms and regional cycles: the SW Spanish Atlantic coast. *International Journal of Climatology*, 33(9), 2142-2156. doi: 10.1002/joc.3579
- RAMIERI, E., HARTLEY, A., BARBANTI, A., SANTOS, F. D., GOMES, A., HILDEN, M., ... & SANTINI, M. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. *ETC CCA Technical Paper*, 1(2011), 1-93.
- RUTHERFORD, V. E., HILLS, J. M., & LE TISSIER, M. D. A. (2020). Comparative analysis of adaptation strategies for coastal climate change in North West Europe. *Marine Policy*, 111, 102478.
- SALLENGER, A. H. (2000). Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3), 890-895.
- SANJAUME, E., & GÓMEZ-SERRANO, M. Á. (2009). Dunas con bosques de *Pinus pinea* y/o *Pinus pinaster*.
- SANJAUME, E., GRACIA, F. J., FLOR, G. (2011). Introducción a la geomorfología de sistemas dunares. *Las dunas de España*, 13-63.
- SILVA, F. G., WIJNBERG, K. M., DE GROOT, A. V., & HULSCHER, S. J. (2019). The effects of beach width variability on coastal dune development at decadal scales. *Geomorphology*, 329, 58-69.
- SMALL, C., GORNITZ, V., & COHEN, J. E. (2000). Coastal hazards and the global distribution of human population. *Environmental Geosciences*, 7(1), 3-12.
- TALAVERA, L. (2019). *Uas-based monitoring of sandy coasts in the Bay of Cadiz (SW Spain)* (Doctoral dissertation, Universidad de Cádiz).

- TALAVERA, L., DEL RÍO, L., BENAVENTE, J., BARBERO, L., & LÓPEZ-RAMÍREZ, J. A. (2018). UAS as tools for rapid detection of storm-induced morphodynamic changes at Camposoto beach, SW Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 5550-5567.
- WILLIAMS, A. T., RANGEL-BUITRAGO, N., PRANZINI, E., & ANFUSO, G. (2018). The management of coastal erosion. *Ocean & coastal management*, 156, 4-20.
- ZOTANO, J. G. (2014). La degradación de dunas litorales en Andalucía: aproximación geohistórica y multiescalar. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (62), 23-39.

ANEXO I

Tabla 1. Caracterización de los pies de duna trabajados según la fecha y el equipo utilizado. En negrita aparecen resaltados los pies de duna usados para la elaboración de las gráficas de comparación entre varios pies de duna.

| Nombre | Año | Mes | Día | Equipo |
|------------------|------|-----|-----|-----------|
| pieguna01 | 2008 | 10 | 1 | Leica 900 |
| pieguna02 | 2008 | 10 | 15 | Leica 900 |
| pieguna03 | 2008 | 11 | 3 | Leica 900 |
| pieguna04 | 2008 | 12 | 3 | Leica 900 |
| pieguna05 | 2008 | 12 | 15 | Leica 900 |
| pieguna06 | 2009 | 1 | 28 | Leica 900 |
| pieguna07 | 2009 | 2 | 9 | Leica 900 |
| pieguna08 | 2009 | 4 | 11 | Leica 900 |
| pieguna09 | 2009 | 5 | 8 | Leica 900 |
| pieguna10 | 2009 | 6 | 23 | Leica 900 |
| pieguna11 | 2009 | 7 | 21 | Leica 900 |
| pieguna12 | 2009 | 8 | 20 | Leica 900 |
| pieguna13 | 2009 | 9 | 22 | Leica 900 |
| pieguna14 | 2009 | 10 | 4 | Leica 900 |
| pieguna15 | 2009 | 10 | 19 | Leica 900 |
| pieguna16 | 2009 | 11 | 3 | Leica 900 |
| pieguna17 | 2009 | 12 | 3 | Leica 900 |
| pieguna18 | 2009 | 12 | 21 | Leica 900 |
| pieguna19 | 2010 | 1 | 2 | Leica 900 |
| pieguna20 | 2010 | 1 | 8 | Leica 900 |
| pieguna21 | 2010 | 2 | 2 | Leica 900 |
| pieguna22 | 2010 | 3 | 4 | Leica 900 |
| pieguna23 | 2010 | 4 | 26 | Leica 900 |
| pieguna24 | 2010 | 5 | 15 | Leica 900 |
| pieguna25 | 2010 | 6 | 16 | Leica 900 |
| pieguna26 | 2010 | 8 | 24 | Leica 900 |
| pieguna27 | 2013 | 3 | 13 | Leica 900 |
| pieguna28 | 2013 | 4 | 9 | Leica 900 |
| pieguna29 | 2013 | 4 | 25 | Leica 900 |
| pieguna30 | 2013 | 5 | 27 | Leica 900 |
| pieguna31 | 2013 | 6 | 24 | Leica 900 |
| pieguna32 | 2013 | 9 | 6 | Leica 900 |
| pieguna33 | 2013 | 10 | 4 | Leica 900 |
| pieguna34 | 2013 | 11 | 5 | Leica 900 |

| | | | | |
|-----------------|------|----|----|-----------|
| peduna35 | 2013 | 12 | 4 | Leica 900 |
| peduna36 | 2014 | 1 | 21 | Leica 900 |
| peduna37 | 2017 | 1 | 30 | UAS |
| peduna38 | 2017 | 2 | 17 | UAS |
| peduna39 | 2017 | 3 | 28 | UAS |
| peduna40 | 2017 | 4 | 26 | UAS |
| peduna41 | 2017 | 10 | 6 | UAS |
| peduna42 | 2017 | 11 | 6 | UAS |
| peduna43 | 2017 | 12 | 13 | UAS |
| peduna44 | 2018 | 1 | 19 | UAS |