

**Evaluación de los cambios recientes en  
un sistema de playa y dunas móviles:  
Punta del Boquerón (San Fernando, Cádiz)**



**Daniel Ramírez Torres**

**Tutora: Dr. Laura Del Río Rodríguez**

**Puerto Real, Curso 2015-2016**

***Evaluación de los cambios recientes en un sistema de playa y dunas móviles:***

***Punta del Boquerón (San Fernando, Cádiz)***

Trabajo de fin de grado realizado y presentado por Daniel Ramírez Torres para optar al título de Graduado en Ciencias del Mar de la Universidad de Cádiz, en la Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales en el Campus de Puerto Real, Cádiz (España).

*Curso académico 2015 - 2016*

Fdo:

La memoria que se presenta ha sido tutorizada por Laura del Río Rodríguez

Tutora:

Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales  
Departamento de Ciencias de la Tierra

Grado Ciencias del Mar  
Universidad de Cádiz

# Índice

<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Objetivos</b>	2
<b>3. Antecedentes bibliográficos</b>	2
<b>4. Zona de estudio</b>	3
4.1. Localización	3
4.2. Climatología	5
4.3. Marco hidrodinámico	6
4.4. Características geomorfológicas	6
4.5. Fauna y flora	8
<b>5. Material y métodos</b>	9
5.1. Fuentes de información empleadas	9
5.1.1. Fotografías aéreas y ortofotografías	9
5.1.2. Datos LIDAR	10
5.2. Georreferenciación	11
5.3. Digitalización	12
5.4. Cálculo de tasas de cambio	13
5.5. Cálculo de diferencias de alturas entre MDTs	15
<b>6. Resultados</b>	15
6.1. Marca de agua	15
6.2. Pie de duna	18
6.3. Diferencias de alturas entre MDTs	21
<b>7. Discusión</b>	23
<b>8. Conclusiones</b>	26
<b>9. Bibliografía</b>	28

## **Resumen**

Los sistemas costeros están relacionados con numerosas actividades económicas debido a su atractivo turístico y a que en ellos se concentra la mayor parte de la población. Estos sistemas se caracterizan por una naturaleza cambiante dependiente de diversos factores, y existe un creciente interés en su evolución. En este trabajo se realiza una evaluación de los cambios experimentados por la Punta del Boquerón (San Fernando, Cádiz), un importante sistema de playa y dunas de diversa tipología, entre los años 2008, 2013 y 2015. Para este objetivo se ha hecho uso de fotografías aéreas y herramientas SIG, que han permitido un análisis de la línea de costa y de la altura de las dunas para estudiar la evolución del sistema.

Como resultado se ha obtenido que la mayor variación en la zona se produce en la zona sur, el extremo libre de la flecha de Sancti Petri, afectado principalmente por procesos de erosión-acreción asociados tanto al oleaje de los temporales invernales como a los vientos de Levante.

**Palabras Clave:** *Dunas, flecha litoral, fotografías aéreas, Bahía de Cádiz, riesgos costeros, SIG.*

## **Abstract**

Coastal systems are related to many economic activities, as they host most of the population and constitute tourist attractions. These systems are characterized by a changing nature, which depends on several factors, and there is a growing interest in their evolution. This work is aimed at assessing the evolution of Punta del Boquerón (San Fernando, Cádiz), an important beach and dune system with particular features, between 2008, 2013 and 2015. For this purpose a series of aerial photographs and GIS tools were used, allowing the analysis of shoreline position and dune elevation in order to determine the evolution of the system.

Results show that most significant variations occurred in the southernmost sector of the system, the free end of Sancti Petri sandspit, affected mainly by erosion-accretion processes related to winter storm waves and to Levante winds.

**Keywords:** *Dunes, sandspit, aerial photographs, Cádiz Bay, coastal risk, GIS.*

# 1. Introducción

Los paisajes son cambiantes por naturaleza, pero pocos sistemas son tan dinámicos como las zonas costeras. Factores como la acción del viento, el oleaje, las mareas, las corrientes, las variaciones del nivel del mar y los procesos de transporte sedimentario, sumados a la acción antrópica, actúan simultáneamente a diversas escalas espacio-temporales haciendo que las zonas de costa sufran numerosas e importantes variaciones a lo largo del tiempo (Carter, 1991).

El interés por las variaciones que sufren los sistemas costeros se ha incrementado recientemente, debido a que estos sistemas han ido cobrando mayor importancia dada su relación con numerosas actividades económicas y a que en ellos se concentra la mayor parte de la población. En este sentido las zonas costeras representan una franja de enorme valor y relevancia estratégica para el futuro de los estados costeros, de ahí la importancia e interés en intentar conocer la evolución de estos sistemas y sus posibles cambios futuros (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2002). España cuenta con una longitud de costa de unos 7.880 kilómetros (Instituto Geográfico Nacional, 2016) y dado que en las últimas décadas la mayor parte de la población residente y del turismo en España se ha ido concentrando en estas zonas, existe un creciente interés en el futuro de los sistemas costeros.

Las modificaciones de las zonas costeras no son siempre evidentes y los cambios se pueden manifestar a corto o largo plazo. Por esta razón son frecuentes los estudios multitemporales, ya que permiten la comparación de la situación de la franja litoral durante diferentes períodos de tiempo con el fin de detectar los cambios que se producen en los sistemas costeros analizados. En este contexto, el presente estudio se centra en la *Punta del Boquerón*, el extremo libre de una flecha litoral localizada en el municipio de San Fernando (Cádiz) y caracterizada por un entorno natural sin urbanizar, de gran valor paisajístico que supone uno de los atractivos turísticos del municipio. Se trata de un sistema de playa y dunas, tanto móviles como vegetadas, siendo por tanto un sistema dinámico sometido a cambios constantes en los que intervienen múltiples factores (Carter, 1991). La importancia de esta zona, declarada monumento natural en 2003, reside en su valor ambiental y turístico dada su complejidad geomorfológica, su atractivo paisajístico y la avifauna que alberga, objetivo de numerosas actividades relacionadas con el turismo ornitológico (Consejería de Turismo, Comercio y Deporte, 2008).

## **2. Justificación y objetivos**

Como se ha mencionado anteriormente, en la Punta del Boquerón se sitúa un importante sistema de playa y dunas de diversa tipología, principalmente dunas móviles y dunas fijadas por vegetación. Tanto la playa como las dunas, son elementos no estables cuya morfología es dependiente de numerosos factores y que generalmente presentan un continuo cambio a lo largo del tiempo.

Dada la inestabilidad morfológica de estos ecosistemas, es difícil predecir las tendencias que seguirán en un futuro. Sin embargo, gracias al avance de la tecnología y al desarrollo de nuevas técnicas, es posible la realización de evaluaciones de estos sistemas mediante la toma de datos cada vez más robustos y fiables que permiten conocer su estado pasado y presente, así como la realización de previsiones sobre su posible evolución futura.

El principal objetivo de este trabajo consiste en realizar una evaluación de los cambios recientes en el sistema de playa y dunas móviles de la Punta del Boquerón a partir del tratamiento e interpretación de fotografías aéreas y modelos digitales del terreno procedentes de vuelos LIDAR realizados en la zona en los años 2008, 2013 y 2015, con la intención de identificar los cambios que hayan podido tener lugar en la zona de estudio. Para la consecución de este objetivo principal se plantean dos objetivos parciales:

- Determinar los cambios que ha experimentado la posición de la línea de costa a lo largo del periodo considerado, tanto en la zona intermareal como la base de las dunas.
- Determinar las posibles variaciones de cota que se han producido en los sistemas dunares, especialmente en el campo de dunas móviles.

## **3. Antecedentes bibliográficos**

La fecha litoral de Sancti Petri ha sido abordada en diversos estudios y con ella, la Punta del Boquerón, zona en la que se centra este trabajo. Entre los autores que han estudiado la zona se encuentran Benavente et al. (2002, 2011, 2013), Del Río et al. (2002, 2011, 2013) y Gracia et al. (2002, 2008, 2011). Éstos y otros autores han tratado diversos aspectos de la zona, como el estado morfodinámico de las playas (Benavente et al., 2000), los procesos de desbordamiento en esta flecha litoral (Benavente et al., 2002) o su respuesta ante los

temporales (Del Río et al. 2012). Cabe destacar asimismo, que autores como Del Río y Gracia (2008) han tratado la fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa, un aspecto relacionado directamente con este estudio, por lo que su trabajo servirá de referencia.

Como se ha mencionado anteriormente, el presente TFG tiene como objetivo analizar los cambios recientes ocurridos en la Punta del Boquerón en el período de los últimos años, siguiendo para ello las líneas de trabajo iniciadas por varios de los autores mencionados.

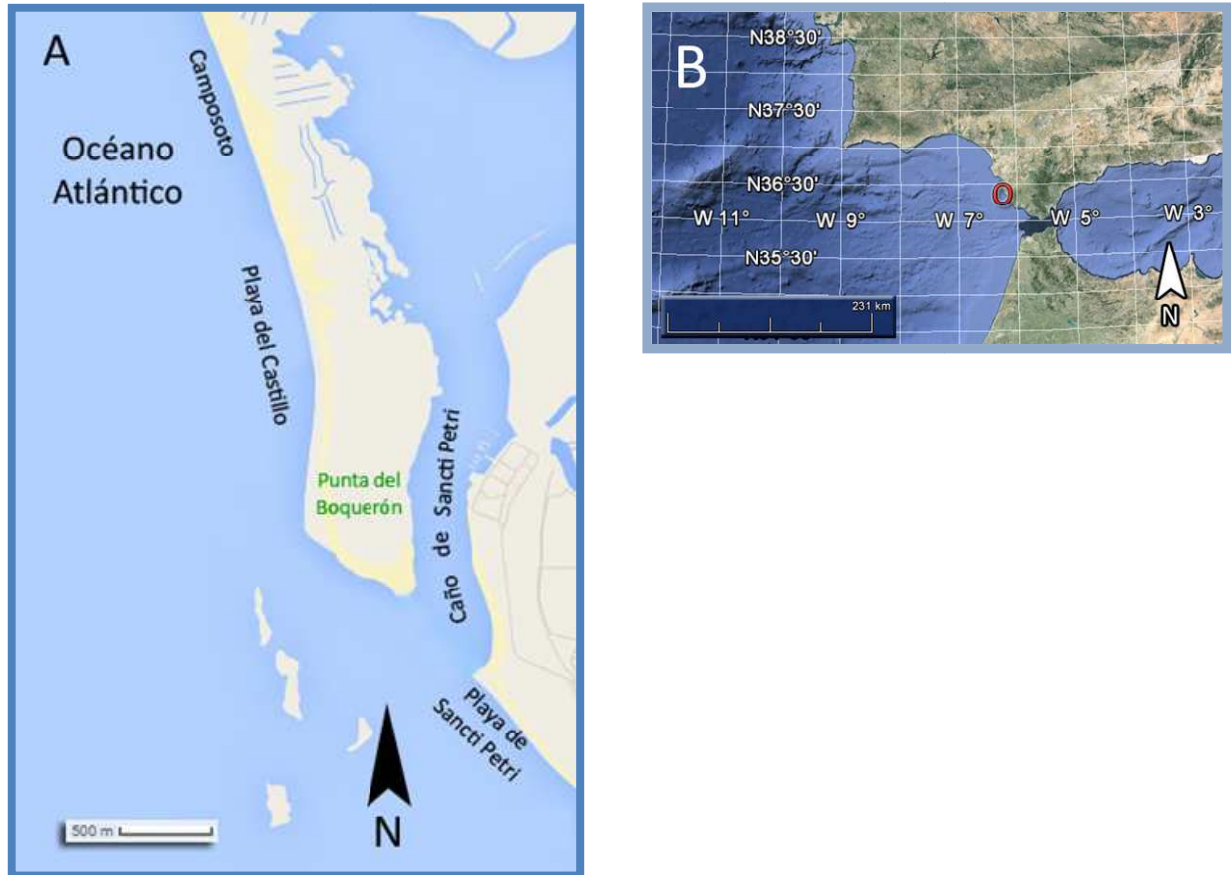
## **4. Zona de estudio**

### **4.1. Localización**

Situada al suroeste de la Península Ibérica, en el límite meridional de la Bahía de Cádiz, la Punta del Boquerón es el extremo libre de la flecha litoral de Sancti Petri (Figura 1) localizada en el municipio de San Fernando (Cádiz). La Punta del Boquerón, se caracteriza por un entorno no urbanizado de gran valor paisajístico, y fue declarada monumento natural de la provincia de Cádiz en Octubre de 2003 por la Comunidad Autónoma de Andalucía (Decreto 250/2003). El monumento natural, abarca una superficie aproximada de 74,53 hectáreas (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2003).

La flecha de Sancti Petri se encuentra ocupada por las playas de Camposoto al Norte y El Castillo al Sur (Figura 1), respaldadas por amplias áreas de dunas y marismas. Aunque es una zona no urbana, existen diversas construcciones y acondicionamientos para el uso público en su sector Norte y central, con acceso directo por una carretera que discurre paralela a la costa en dicho sector. Existen dos aparcamientos y diversas pasarelas de madera que dan acceso a la playa, y durante los meses de verano, se instalan duchas y baños, así como varios chiringuitos repartidos a lo largo de la zona junto a algunos puntos de primeros auxilios (Figura 2). En esta zona se han realizado distintos trabajos de regeneración de playa en un intento de remediar las pérdidas de arena que tienen lugar en los períodos invernales de temporales (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015). En 1998 y 2009 se llevaron a cabo dos importantes regeneraciones, con el aporte de 737.000 m<sup>3</sup> y 102.206 m<sup>3</sup> de arena respectivamente (Muñoz et al., 2001, 2014), seguidas por una pequeña realimentación en 2015 con 25.000 m<sup>3</sup> de sedimento (Cabeza, 2015).

No obstante, la Punta del Boquerón se encuentra libre de estas intervenciones, ya que la carretera y los accesos a la playa finalizan en la zona central de la flecha, y la única estructura de acceso al extremo sur es una pasarela de madera que se extiende tras la franja dunar.



**Figura 1.** A) Esquema de la Punta del Boquerón, en el municipio de San Fernando (Cádiz).  
B) Localización de la zona de estudio  
(Fuente: Datos de mapas GeoBasis-DE/BKG, 2009; Google Earth, 2016).



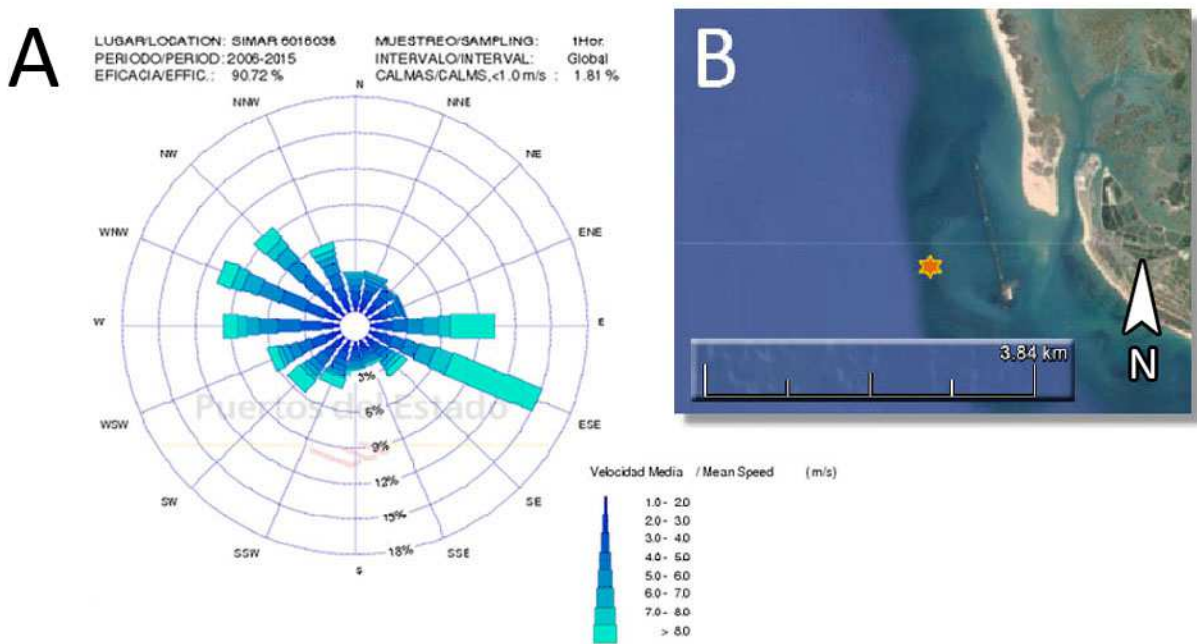
**Figura 2.** Fotografía de la zona central de la playa de Camposoto en verano de 2015.  
(Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015).



## 4.2. Climatología

En el municipio de San Fernando, y en la Bahía de Cádiz en general, se da un clima típico mediterráneo aunque con un mayor grado de humedad debido a su localización en la costa atlántica. Las temperaturas suaves, los veranos secos y los inviernos con abundantes precipitaciones caracterizan el clima de la zona.

La temperatura media anual es de 18°C (Sánchez, 1988) y las precipitaciones rondan los 590-600 mm al año (Agencia Estatal de Meteorología, 2009), siendo Cádiz la provincia con mayor índice de pluviosidad de Andalucía (Sánchez, 1988). La orientación y proximidad de la costa gaditana al Estrecho de Gibraltar son factores que favorecen el predominio de vientos de gran intensidad (Figura 3), que van a influir directamente en las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio.



**Figura 3.** A) Rosa de velocidad media del viento en el área de estudio en el período 2006 - 2015, correspondiente al punto SIMAR 6016038 de Puertos del Estado. B) Posición del punto SIMAR 601638, con coordenadas 6.23° W, 36.38° N (Fuente: Puertos del Estado, 2016)

En las épocas de primavera y otoño predomina el viento de Levante, procedente del SE, mientras que en invierno el viento de Poniente, procedente del ONO y OSO es el más frecuente. El Levante, procedente del Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar, juega un papel fundamental en el transporte eólico aunque carece de importancia en la generación de oleaje debido a su pequeño *fetch* (Gracia y Benavente, 2000), que es la distancia a lo largo

de la cual sopla el viento uniformemente, generando oleaje. Por el contrario, el Poniente, procedente del Atlántico, es un viento húmedo de menor relevancia para el transporte eólico, si bien genera mar de fondo y oleaje importante debido a su elevado *fetch* (Gracia y Benavente, 2000).

### **4.3. Marco hidrodinámico**

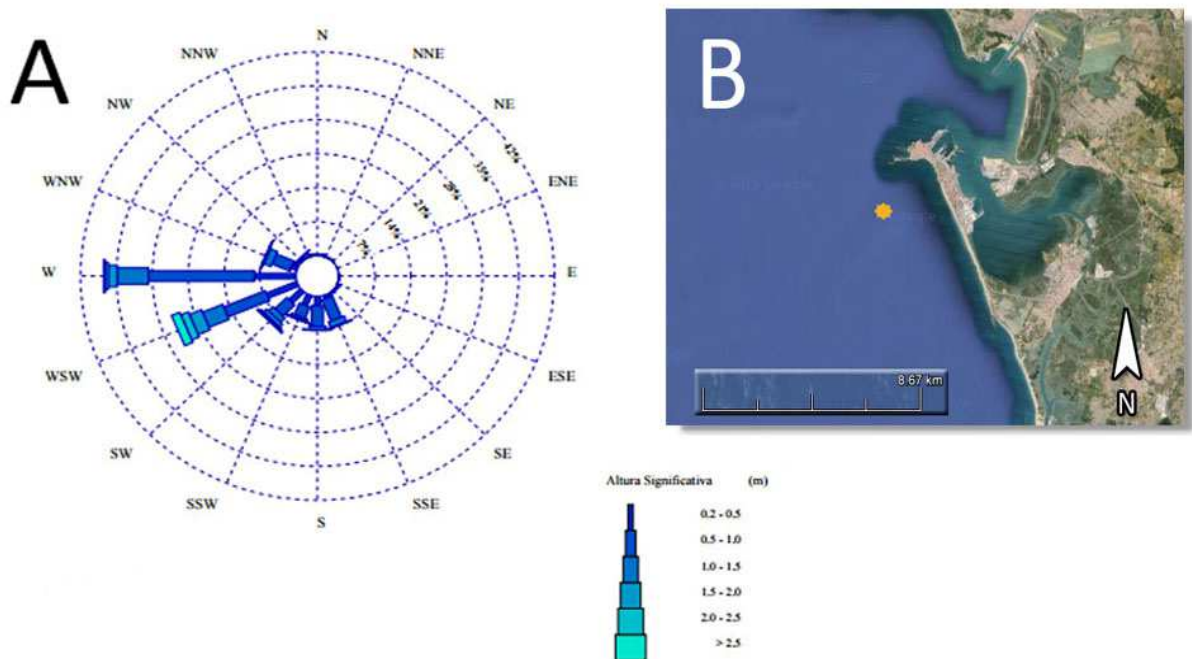
La marea presenta en la zona de estudio una ciclicidad de tipo semidiurno, con dos bajamares y dos pleamares diarias; una quincenal, con mareas vivas y muertas; y una semestral, ya que dos veces al año tienen lugar las mareas vivas más importantes (mareas equinocciales) (Benavente, 2000). El rango de marea es mesomareal, con una amplitud media de las mareas vivas mensuales de aproximadamente 2.96 metros, aunque las mareas equinocciales pueden alcanzar los 3.74 metros (Parrado, 1997).

En cuanto al oleaje, como se ha mencionado anteriormente, el viento de Poniente procedente de Atlántico es el principal generador de oleaje debido a su mayor *fetch* y por lo tanto va a ser el responsable fundamental tanto del mar de viento como del mar de fondo (*swell*), cuya dirección predominante es O (Figura 4); no obstante, durante los temporales la dirección predominante de aproximación del oleaje es el SO (Benavente, 2000). La altura significativa media del oleaje de buen tiempo es de 0,6 metros, y más del 70% de las olas que llegan a la costa a lo largo del año no superan el metro (Del Río, 2007), lo que permite clasificar a la costa como de baja energía (Benavente, 2000). No obstante, el oleaje en régimen de temporales puede superar los 4 metros, con un período de retorno de 20 años para una altura significativa de 7,4 metros (Puertos del Estado, 2013).

### **4.4. Características geomorfológicas**

La flecha de Sancti Petri posee una longitud aproximada de 5 kilómetros y una anchura variable entre los 200 metros en su extremo norte y los 500 metros en el extremo sur (Benavente et al., 2002). Esta flecha litoral, con su extremo Norte ligado a costa, se encuentra limitada hacia el Este por el caño de Sancti Petri, un canal mareal que comunica el saco interno de la Bahía de Cádiz con el Océano Atlántico (Figura 1). Dado que el extremo libre de la flecha (la Punta del Boquerón, objeto del presente trabajo) se localiza en la desembocadura de dicho caño mareal, la influencia mareal, con la entrada y salida de la onda de marea,

impiden que ésta progrese en su crecimiento (Benavente et al., 2002). Las dimensiones de la Punta del Boquerón son de aproximadamente 1.600 metros de longitud y una anchura variable que va desde 600 metros en su extremo norte a 200 metros en su extremo sur, medidas tomadas a partir de fotografías aéreas de la zona del año 2015.



**Figura 4.** A) Rosa de altura de ola significativa en el área de estudio en el período 2001 - 2014, correspondiente a la Boya Costera de Cádiz. B) Posición de la Boya Costera de Cádiz, con coordenadas 6.33° W, 36.50°N (Fuente: Puertos del Estado, 2016)

La flecha de Sancti Petri está sometida a un continuo proceso de erosión por parte de las corrientes litorales. El sedimento erosionado es transportado por la corriente de deriva, acumulándose en el extremo de la flecha que se va engrosando lentamente a medida que el resto del cuerpo arenoso adelgaza (Benavente et al., 2002). En la zona se encuentran restos de diversas construcciones militares que hacen que este monumento natural tenga un especial valor histórico (Junta de Andalucía, 2010). Entre ellos están dos bunkers de la Guerra Civil, construidos originalmente sobre las dunas y que en la actualidad se encuentran en la zona intermareal (Figura 5), atestiguando el retroceso de la flecha.

La playa está constituida por arenas medias, ricas en cuarzo y con abundantes restos de conchas (Benavente et al., 2002; Benavente et al., 2013), y presenta un perfil intermedio-

disipativo de comportamiento estacional, con pendientes medias que oscilan entre el 2.4% en invierno y el 4.4% en verano (Del Río et al., 2012). Tras la playa se encuentra un cordón dunar originado por los vientos de poniente donde se diferencian dunas embrionarias, de altura reducida y gran movilidad, y dunas primarias, colonizadas por vegetación y que protegen a la marisma del oleaje (Menapace, 2013). El cordón dunar desaparece en el extremo libre de la fecha, dando lugar a un campo de dunas móviles (Benavente et al., 2002). La instalación de accesos y otros servicios durante el verano, así como el pisoteo del público fuera de las zonas de acceso facilitadas influyen en el estado de las dunas, alterando la morfología y altura de las mismas. Con el objetivo de remediar estos efectos, en la playa de Camposoto, el estado de las dunas se ha mejorado mediante intervenciones del Ministerio de Medio Ambiente (Gracia et al., 2011). La revegetación de dunas y la instalación de captadores de arena y cerramientos de protección ha permitido la estabilización de las zonas dunares en el sector central de la flecha (Gracia et al., 2011).



*Figura 5. Construcciones militares en la Punta del Boquerón.  
(Fotografías realizadas el 29 de Abril de 2016)*

#### **4.5. Fauna y flora**

Son numerosas las especies de aves que se encuentran en la zona, ya sea porque ésta es su hábitat o bien porque supone una parada en su recorrido migratorio. Entre las especies se encuentran aves limícolas como correlimos y chorlitejos, además de aves marinas como gaviotas (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2016). Por otro lado, la presencia de peces, moluscos y cangrejos supone un atractivo para la pesca.

La vegetación no es abundante y se encuentra distribuida en función del grado de inundación y de las adaptaciones presentes en las especies vegetales con el fin de soportar las condiciones extremas de alta salinidad y fuertes vientos de la zona así como la insolación, pues se trata de una zona con poca sombra. En las dunas se encuentran especies como el barrón y la retama blanca. En las zonas de marisma abundan los salados y sapinas (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del territorio, 2011). El papel de la vegetación es fundamental en el funcionamiento de los sistemas de dunas, interviniendo en la nucleación inicial de las dunas y en su fijación final, siendo un factor clave en la variación de la altura de las dunas y la distancia entre las mismas. Es por esto que el tipo de vegetación y su abundancia estará relacionado con la evolución del sistema dunar a lo largo del tiempo.

## **5. Material y métodos**

### **5.1. Fuentes de información empleadas**

En los estudios para la evaluación de los cambios morfológicos en zonas costeras, se pueden recurrir a técnicas variadas: análisis de perfiles de playa, levantamientos topográficos 3D o como es en el caso de este estudio imágenes aéreas. En el presente trabajo se realiza una evaluación de los cambios recientes en el sistema de playa y dunas móviles en la Punta del Boquerón, haciendo uso de ortofotografías, fotografías aéreas y datos de vuelos LIDAR de los años 2008, 2013 y 2015 procedentes del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cádiz. Estas fuentes de información han sido procesadas mediante los software ArcGIS® 10, Global Mapper™ 13 y DSAS versión 4.3.4730 (Thieler et al., 2009) para la realización de tareas de georreferenciación, digitalización de líneas de costa, cálculo de parámetros estadísticos y comparación de modelos digitales del terreno.

#### **5.1.1. Fotogrametría aérea y ortofotografías**

El gran avance tecnológico y la mayor demanda de datos temáticos han hecho que cada vez sea más común el uso de fotografías aéreas en el campo de la cartografía. De hecho, la fotogrametría es una de las técnicas más empleadas para llevar a cabo estudios multitemporales mediante la realización de vuelos fotogramétricos seriados en el tiempo de forma que el conjunto de dichos vuelos dé como resultado una colección de fotografías que permitan analizar los cambios ocurridos en el tiempo (Jiménez, 2012). En este estudio se hará

uso de fotografías aéreas de la Punta del Boquerón, realizadas durante vuelos de toma de datos LIDAR los días 10 de agosto de 2013 y 12 de septiembre de 2015 (Figura 6), que serán georreferenciadas y sobre las que se digitalizarán las línea de costa.

Por otro lado, las ortofotografías u ortoimágenes son fotografías aéreas que han sido corregidas de deformaciones, manteniendo toda la información de la fotografía aérea y presentándose los elementos de ésta en un determinado sistema de coordenadas y datum, a la misma escala, lo que les otorga la misma validez que un plano cartográfico (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2015). En este trabajo se han empleado ortofotografías de la zona de estudio correspondientes a un vuelo fotogramétrico y LIDAR realizado el 1 de Diciembre de 2008 (Figura 6).



**Figura 6.** Ejemplos de ortofotografía y fotografía aérea de la Punta del Boquerón en 2008 y 2015, respectivamente.  
(Fuente: Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cádiz)

### 5.1.2. Datos LIDAR

La tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*) consiste en la utilización de sistemas de sensor láser que envían pulsos para la medición de distancias y la toma de datos de altitud útiles para la realización de Modelos Digitales de Elevación (MDE) (Wehr y Lohr, 1999). El sistema LIDAR, que es generalmente transportado en plataformas aéreas, consiste principalmente en un láser y un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) que proporciona una mayor precisión en el cálculo de la posición (Soria, 2014).

El funcionamiento de esta técnica consiste en la realización de medidas de distancias desde el emisor láser a la superficie. Los pulsos emitidos se recogen en forma de “retornos” o “rebotes” una vez que han alcanzado la superficie. Las medidas de distancia se obtienen mediante la diferencias de tiempo desde la emisión a la recepción de la señal láser reflejada en superficie mientras el sistema GPS registra la posición de los puntos. La principal ventaja en el caso de las técnicas LIDAR frente a las cámaras fotogramétricas es que éstas no permiten la obtención de imágenes en condiciones de lluvia o de nubosidad mientras que los sistemas láser no presentan este tipo de restricciones (Jiménez, 2012). Su principal aplicación es la elaboración de modelos digitales del terreno (MDT).

## **5.2. Georreferenciación**

El proceso de georreferenciación consiste en el posicionamiento espacial con respecto a la tierra de entidades ráster y objetos vectoriales proporcionándoles una localización única, bien definida por un sistema de coordenadas y datum específicos. Una buena resolución y la georreferenciación de las imágenes aéreas será fundamental para un correcto análisis de las mismas, permitiendo solapar y comparar las diferentes imágenes que conforman la zona de estudio, y cuantificar los cambios entre las diversas fechas en unidades métricas (Ojeda, 2000). Asimismo, al asignar a cada punto de la imagen sus coordenadas geográficas reales, el proceso de georreferenciación resulta en una rectificación geométrica que corrige gran parte de las deformaciones ópticas inherentes de las fotografías aéreas (Brito y Coelho, 2002)

Inicialmente, se contó con 11 imágenes aéreas pertenecientes al vuelo realizado en 2013 y 10 imágenes aéreas del vuelo realizado en 2015. En ambos casos se abarcan la totalidad de la zona de estudio. La georreferenciación de las imágenes aéreas se realizó empleando como base las ortofotografías de la zona del año 2008, mediante el uso del sistema de información geográfica ArcGIS® 10.

Para el proceso de georreferenciación se utilizaron 15 puntos de control o GCP (*Ground Control Points*) en cada imagen. Los GCPs son elementos en las fotografías identificables en todos los años analizados, como pueden ser pasarelas, construcciones o vegetación que se haya mantenido relativamente constante con el paso del tiempo cuando no existan las opciones anteriores. Es importante que se utilicen elementos fijos e invariables para garantizar una máxima precisión. Estos puntos permiten construir la función matemática de

transformación que expresa la relación entre las coordenadas de los GCPs en las imágenes originales y sus coordenadas en el espacio geográfico real de la imagen de referencia (en este caso la ortofoto), transformando así unas en otras (Peña, 2016). Los puntos de control son fundamentales en el proceso de georreferenciación, por lo que es importante prestar especial atención a que su número y distribución sean adecuados. Tras decidir la disposición de los GCPs se aplicó una función de transformación no lineal mediante un polinomio de orden 2.

Para evaluar la calidad del ajuste, el método más utilizado es el cálculo del error cuadrático medio, error residual o RMSE (*Root Mean Square Error*), que expresa la diferencia entre las posiciones de los GCPs en la imagen de referencia y en la imagen corregida, una vez realizada la transformación (Peña, 2006). Para asegurar la precisión de las imágenes georreferenciadas, en este trabajo se consideró como admisible un error total RMSE menor de 0.5 metros en cada georreferenciación. Una vez aplicada la función matemática de transformación correspondiente, se obtuvieron las nuevas posiciones de los píxeles en la imagen corregida. El último paso de la georreferenciación consistió en realizar un remuestreo de tipo interpolación bilineal, que permite asignar un nivel digital (tono de gris) a cada una de estas nuevas posiciones y dotar a la imagen de una regularidad en filas y columnas (Hughes et al., 2006).

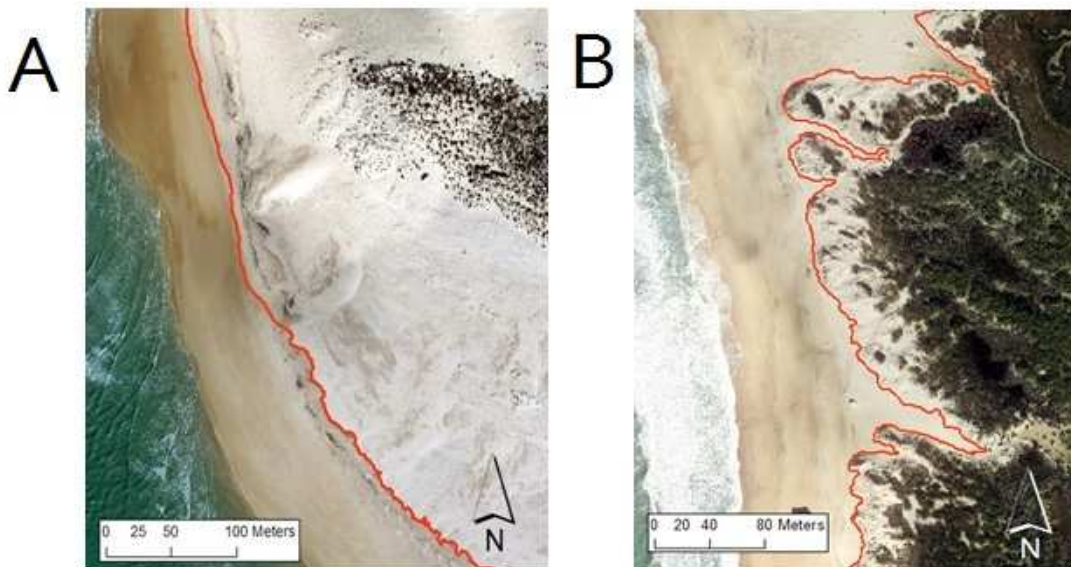
### **5.3. Digitalización**

Una vez que todas las imágenes se encontraban en el mismo plano de coordenadas y por tanto se solapaban perfectamente, se procedió a la digitalización de la línea de costa de los años 2008, 2013 y 2015. Para ello se emplearon dos indicadores diferentes: por un lado, la marca de agua o *wet/dry line*, (Figura 7), que se considera equivalente al alcance medio de la pleamar sobre la playa (Crowell et al., 1991); y por otro lado, el pie de duna (Figura 7), o línea de contacto entre la parte alta de la playa y la duna primaria (*foredune*) (Ojeda, 2000), que representa la transición entre los ambientes dominados por el oleaje y los dominados por el viento (Ferreira et al., 2006). Es importante señalar que, si bien la marca de agua ha tenido un uso generalizado en la literatura científica como indicador de la posición de la línea de costa, se trata de un elemento que puede verse altamente influenciado por las condiciones meteorológicas, de la marea, del oleaje y por la forma del perfil de playa. En cambio, el pie de duna es independiente de dichas variables, lo que resulta especialmente útil en zonas costeras caracterizadas por oleaje de alta energía, amplios rangos de marea y/o perfiles de playa



disipativos con amplia zona intermareal y comportamiento estacional, como es el caso de la zona de estudio (Del Río, 2007).

La marca de agua se digitalizó en ArcGIS 10 directamente sobre las imágenes georreferenciadas, mientras que para digitalizar el pie de duna se hizo uso, junto a las fotografías aéreas, de los modelos digitales de elevación (MDE) procedentes de los datos LIDAR, que permiten una mejor identificación del relieve asociado a las dunas en aquellas zonas donde la identificación visual del pie de duna no era clara (Figura 7). Tanto la marca de agua como el pie de duna se almacenaron como archivos vectoriales de tipo *shapefile* lineal.



**Figura 7.** A) Digitalización de la marca de agua sobre una ortofotografía de la Punta del Boquerón del año 2008 B) Digitalización del pie de duna sobre una ortofotografía de la Punta del Boquerón del año 2008  
(Fuente de las ortofotografías: Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cádiz)

#### 5.4. Cálculo de tasas de cambio

Las imágenes aéreas tomadas en diferentes años proporcionan la posibilidad de conocer la evolución del sistema de forma visual, lo cual es uno de los principales objetivos de los estudios multi temporales. Sin embargo, para poder conocer los cambios producidos de forma cuantitativa es necesario el cálculo de una serie de parámetros estadísticos que respalden las variaciones que puedan apreciarse visualmente. Tras el proceso de georreferenciación y una vez digitalizadas tanto las marcas de agua como los pies de duna, este cálculo se realizó con la extensión DSAS versión 4.3.4730 para ArcGIS® 10 (Thieler et al., 2009).

El DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) es un software que permite realizar el cálculo de diferentes distancias y tasas de cambio, de forma que sea posible cuantificar las variaciones del sistema. Para poder trabajar con las líneas de costa digitalizadas de los diferentes años fue necesario almacenar las líneas de costa individuales de cada año en dos únicos *shapefiles*, uno para la marca de agua y otro para el pie de duna. A continuación, el procedimiento consistió en definir una línea base fija paralela a la costa; el programa permite trazar de manera semiautomática una serie de transectos perpendiculares a la línea base y que cortan a las líneas de costa, separados entre sí una cierta distancia, que se fija en función de las características morfológicas de la zona y la resolución requerida en el estudio (Del Río, 2007).

En este trabajo, en el caso de la marca de agua se optó por crear dos líneas base que cubrieran toda la línea de costa de la zona para la generación de transectos perpendiculares a las líneas de los diferentes años. La separación establecida entre transectos a lo largo de la línea base fue de 20 metros, dando como resultado 158 transectos que cubren toda la línea de costa de la zona. En el caso de los pies de duna de los diferentes años se repitió el mismo procedimiento, pero debido a la particular morfología del cordón dunar, altamente irregular, se hizo uso de 5 líneas base que cubrieron toda la zona.

Finalmente, las intersecciones de los transectos con las líneas de costa se emplearon para cuantificar mediante el DSAS, a lo largo de cada transecto, la distancia entre la línea base y las posiciones de la línea de costa en las distintas fechas. A partir de las distancias y conociendo las fechas de cada vuelo, el programa calculó las tasas o velocidades de cambio. En concreto, las medidas de interés obtenidas son:

- *End Point Rate* (EPR) o tasa de punto final (m/año): Solo tiene en cuenta la línea más antigua y la más reciente, ignorando la información de las fechas intermedias. Los valores positivos indican acreción mientras que los negativos indican erosión.
- *Linear Regression Rate* (LRR) o tasa de regresión lineal (m/año): Calculada como la pendiente de la recta de regresión entre las fechas y las distancias a la línea base.
- LR2: Valor del  $R^2$  o coeficiente de determinación del ajuste lineal, que expresa la proporción de la varianza de los datos explicada por la regresión.

## **5.5. Cálculo de diferencias de altura entre MDTs**

Una vez calculados los parámetros estadísticos, se procedió a realizar el cálculo de diferencias de alturas entre MDTs haciendo uso de los datos LIDAR de los vuelos realizados, con el objetivo de hacer comparaciones dos a dos entre los diferentes años.

Para ello, nuevamente en ArcGIS 10, se crearon dos *shapefiles* de tipo polígono, uno que abarcara la zona de dunas vegetadas (en el sector norte de la zona de estudio) y otro para las dunas móviles (en el extremo libre de la flecha litoral, al sur de la zona de estudio). Para facilitar la identificación de los dos sectores (dunas vegetadas y dunas móviles), se aplicó un sombreado sobre los MDTs que permitió apreciar el relieve de forma más clara que en los MDTs originales. Utilizando estos *shapefiles* como “máscara” se procedió a recortar los MDTs correspondientes a cada año, obteniendo 6 MDTs en total: tres recortes de los MDTs para las dunas vegetadas y tres recortes para las dunas móviles, correspondientes en ambos con los años 2008, 2013 y 2015.

Una vez obtenidos los recortes de los modelos digitales, se procedió a realizar las comparaciones dos a dos (2015-2013, 2013-2008 y 2015-2008), haciendo uso de la aplicación “*Raster Calculator*” de ArcGIS. Esto permitió restar los valores de los MDTs, obteniendo así las diferencias de altura entre los diferentes años comparados.

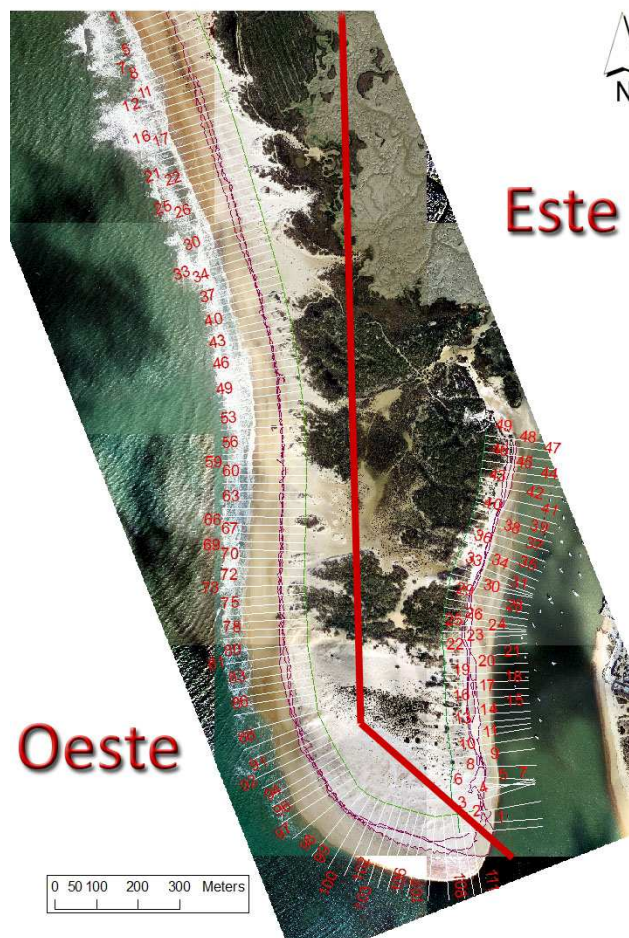
## **6. Resultados**

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras el procesado de los datos, dándoles salida gráfica para una mejor interpretación, con el objetivo de cuantificar los cambios que hayan tenido lugar en el sistema.

### **6.1. Marca de agua**

La *linear regression rate* o tasa de regresión lineal se calcula para las tres líneas de costa (2008, 2013 y 2015). La representación de esta tasa da una idea de los cambios experimentados en la zona intermareal de la playa en este período de tiempo.

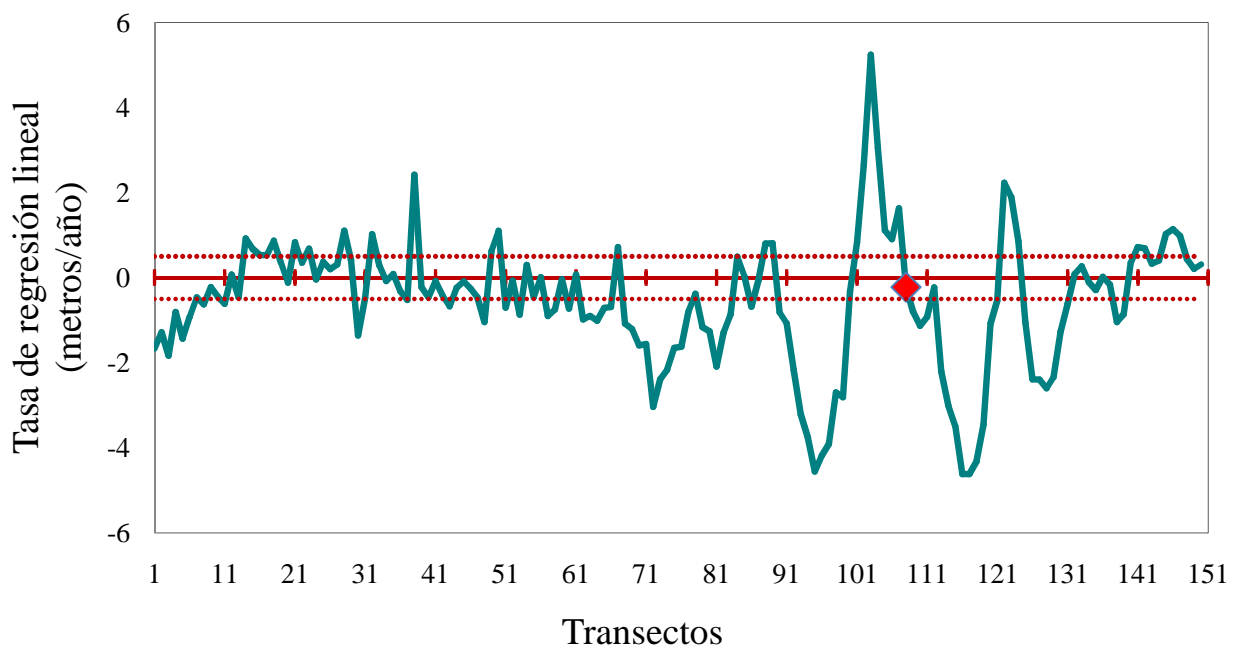
Como se ha mencionado anteriormente, se cuenta con dos líneas base, de forma que se podría considerar una división de la zona de estudio en un sector este y un sector oeste (Figura 8), cada uno de ellos abarcado por una línea base. Teniendo en cuenta que el primer transecto se sitúa en el extremo noroeste del área de estudio, la zona oeste abarcaría los primeros 111 transectos, incluyendo también el extremo sur de la *Punta del Boquerón*, mientras que la zona este abarcaría los últimos 47 transectos, es decir desde el transecto número 112 hasta el 158.



**Figura 8.** Distribución de los transectos de las marcas de agua de los años 2008, 2013 y 2015.  
*Los transectos comienzan en la zona noroeste de la zona de estudio.*

En la representación de la tasa de regresión lineal (Figura 9) se observa un pequeño tramo de comportamiento erosivo en la zona noroeste, seguido por un comportamiento relativamente estable, con altibajos, a lo largo de todo el sector oeste. En el extremo sur de la zona de estudio, correspondiente al extremo de la flecha propiamente dicho (entre los transectos 90 y 130), es donde se aprecian mayores cambios, con oscilaciones de gran

magnitud implicando tanto retroceso como avance de la marca de agua. Los valores de acreción alcanzan picos de hasta 5,2 m/año, mientras que los valores máximos de erosión rondan los -4,3 m/año. Finalmente, el límite noreste de la zona de estudio presenta de nuevo un patrón más estable a lo largo del periodo considerado. Es necesario mencionar que, según trabajos anteriores, el rango de error aproximado en las medidas de cambios de la marca de agua sobre fotografía aérea para la zona de estudio se encuentra en torno a los  $\pm 0,5$  m/año (Del Río, 2007; Del Río y Gracia, 2013), por lo que las tasas de cambio inferiores a dicho rango se asumen como estabilidad relativa.



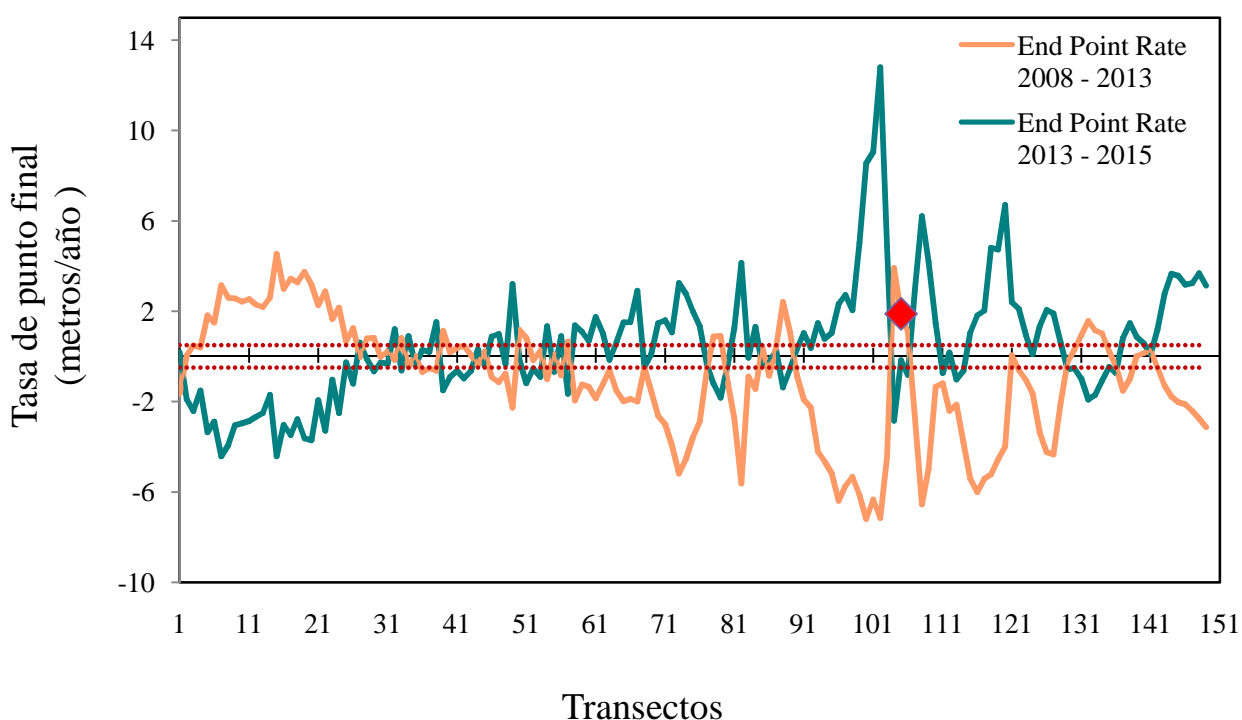
**Figura 9.** Representación de la tasa de regresión lineal calculada para los transectos de la marca de agua entre los años 2008, 2013 y 2015.

Por otro lado, la *End Point Rate* (EPR) o tasa de punto final solo tiene en cuenta la línea más antigua y la más reciente, ignorando la información de las fechas intermedias. Por esta razón se ha calculado (Figura 10) tanto para el intervalo de 2008 - 2013 como para el 2013 - 2015 (Tabla 1).

Período de tiempo	Valor medio EPR (metros/año)
2008 - 2013	-0.97
2013 - 2015	0.48

**Tabla 1.** Valores medios de la tasa de punto final para los períodos entre 2008, 2013 y 2015.

En la representación de las tasas de punto final (Figura 10) destacan los procesos erosivos ocurridos en el sector sur de la zona de estudio en el período de 2008 – 2013. En esta misma zona durante el período de 2013 – 2015 los procesos que han tenido lugar han sido, por el contrario, de acreción, alcanzándose valores de hasta 12,8 metros/año. En el límite nordeste de la zona de estudio ocurre un proceso similar, aunque de menor magnitud, con una acreción que tiene lugar entre los años 2008 y 2013, seguida de una erosión entre los años 2013 y 2015, que en ambos casos abarcan la zona comprendida entre los transectos del 1 al 30.



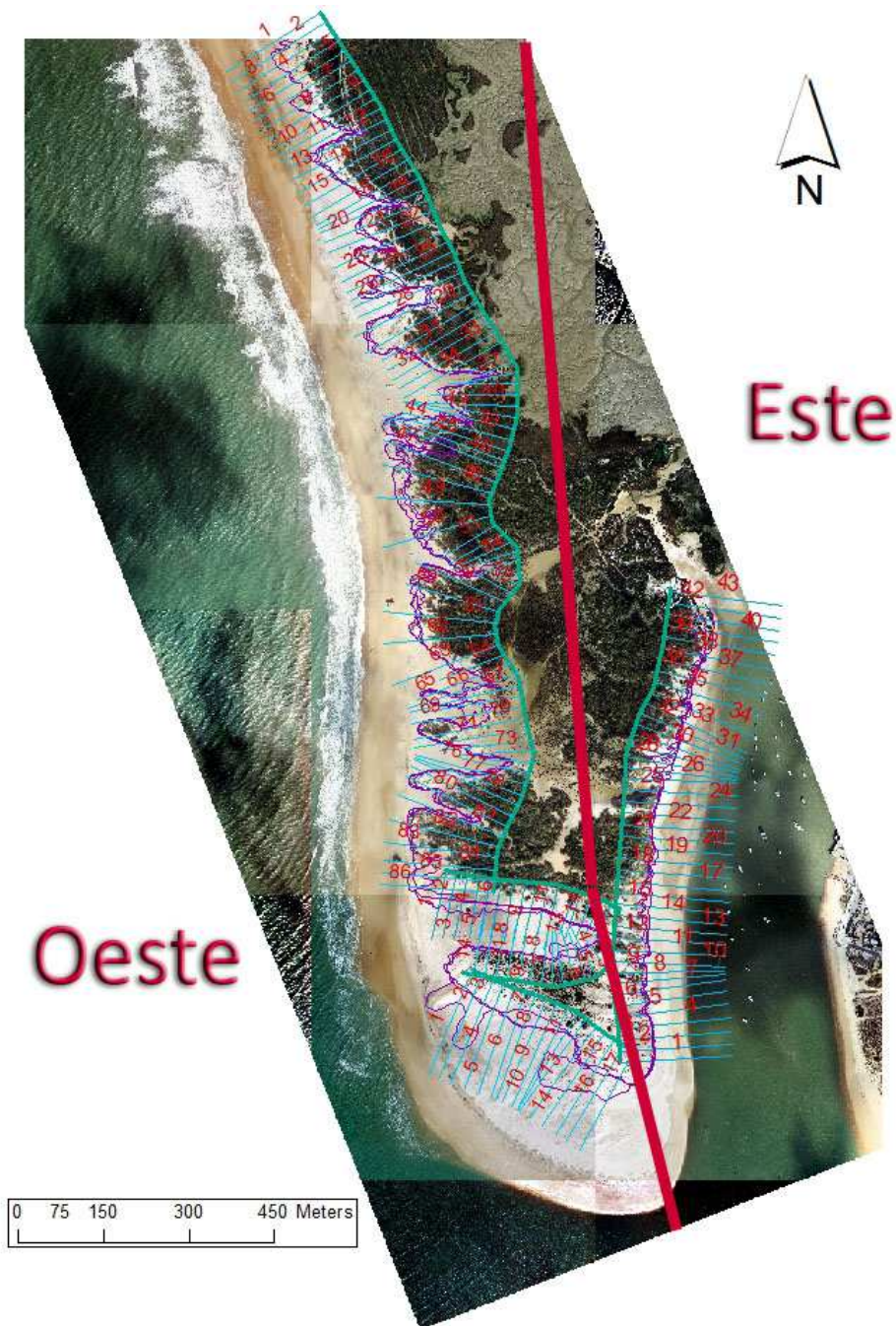
**Figura 10.** Representación de la tasa de punto final calculada para los transectos de las marcas de agua de los años 2008, 2013 y 2015.

## 6.2. Pie de duna

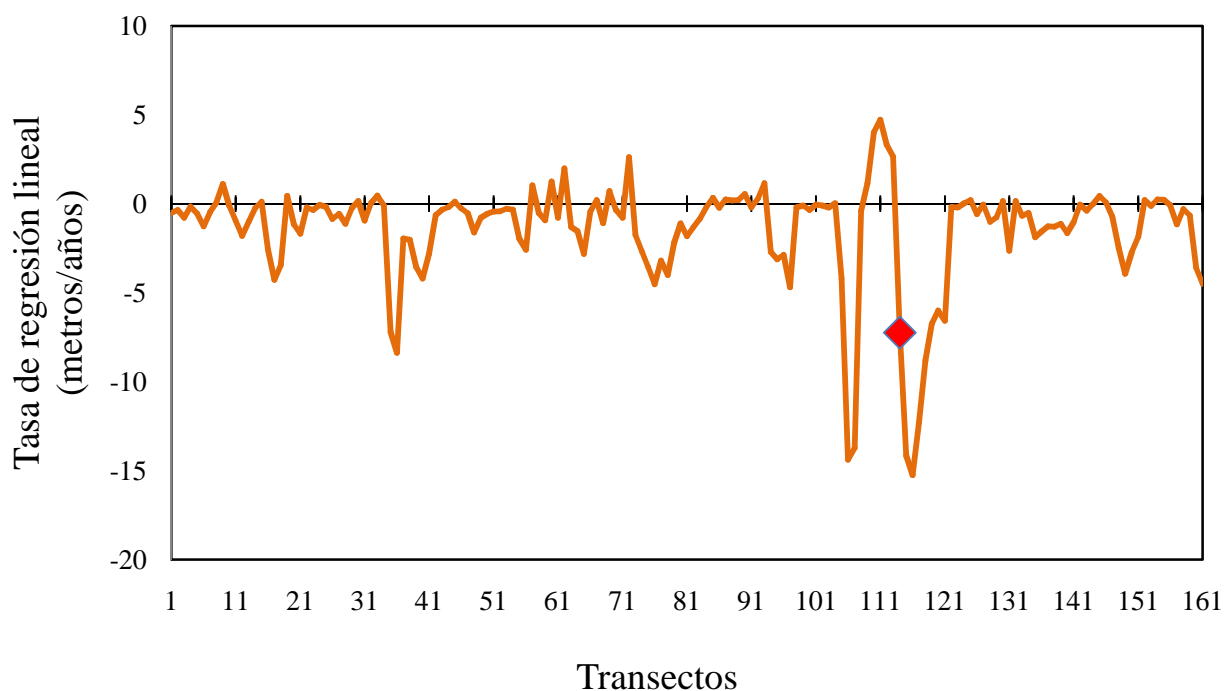
Para el pie de duna también se calcula la tasa de regresión lineal para las tres fechas analizadas (2008, 2013 y 2015). La representación de esta tasa proporciona información sobre los cambios experimentados por el pie de duna en este período de tiempo.

En este caso, debido a la ya mencionada irregularidad del pie de duna en el área de estudio, se cuenta con cinco líneas base que abarcan la zona en su totalidad. Las tres primeras líneas comprenden el sector oeste, mientras que las otras dos cubren el sector este. Teniendo en

cuenta que el primer transecto se sitúa en el extremo noroeste del área de estudio, la zona oeste abarcaría los primeros 116 transectos, mientras que la zona este abarcaría los últimos 58 transectos, empezando desde el transecto número 117 y finalizando en el número 174 (Figura 11).



**Figura 11.** Distribución de los transectos de los pies de duna de los años 2008, 2013 y 2015. Los transectos comienzan en la zona noroeste de la zona de estudio.



**Figura 12.** Representación de la tasa de regresión lineal calculada para los transectos de los pies de duna de los años 2008, 2013 y 2015.

En la Figura 12 se aprecia la tendencia claramente erosiva del pie de duna, que supera los -1,5 m/año de retroceso en la mayor parte del área de estudio. Destacan dos zonas puntuales de erosión extrema bien diferenciadas, localizadas en el sector suroeste de la Punta del Boquerón, entre los transectos 100 y 130, con un valor máximo de -13 m/año. Para el pie de duna, según Del Río (2007) y Del Río y Gracia (2013), el rango de error aproximado de las medidas fotogramétricas para la zona de estudio es muy inferior al de la marca de agua, estando en torno a los  $\pm 0,1$  m/año, por lo que las tasas obtenidas se pueden considerar significativas en todo el tramo analizado.

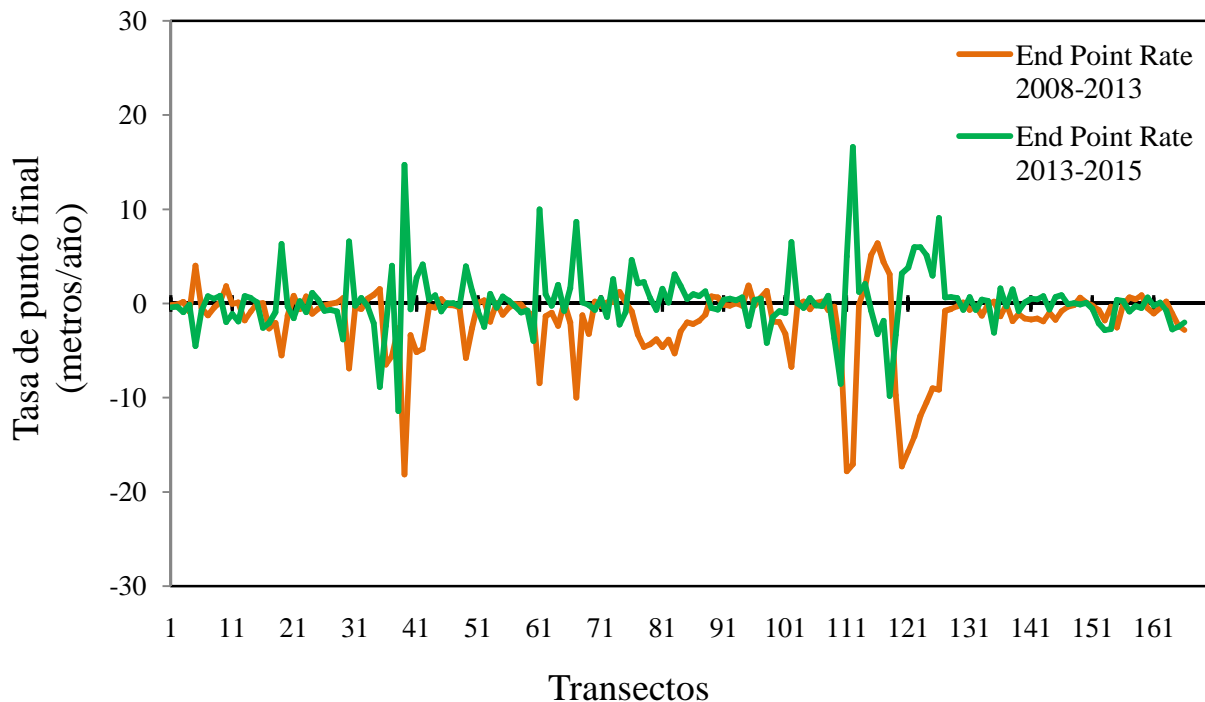
Para el pie de duna la *End Point Rate* (EPR) o tasa de punto final también se ha calculado tanto para el intervalo de tiempo de 2008 - 2013 como para el de 2013 - 2015 (Tabla 2).

Período de tiempo	Valor medio EPR (metros/año)
2008 - 2013	-1.94
2013 - 2015	0.33

**Tabla 2.** Valores medios de la tasa de punto final para los períodos entre 2008, 2013 y 2015.



Nuevamente se aprecia una clara tendencia erosiva, de magnitud muy considerable (Figura 13), con zonas puntuales donde el retroceso es extremadamente alto (superior a -10 m/año). Dos de ellas se sitúan en el suroeste de la Punta del Boquerón, y la tercera en la parte central del sector oeste del área de estudio (Figura 11). La mayor parte de la erosión se ha registrado en el periodo 2008-2013, mientras que en el 2013-2015 predomina la estabilidad o incluso la acreción.

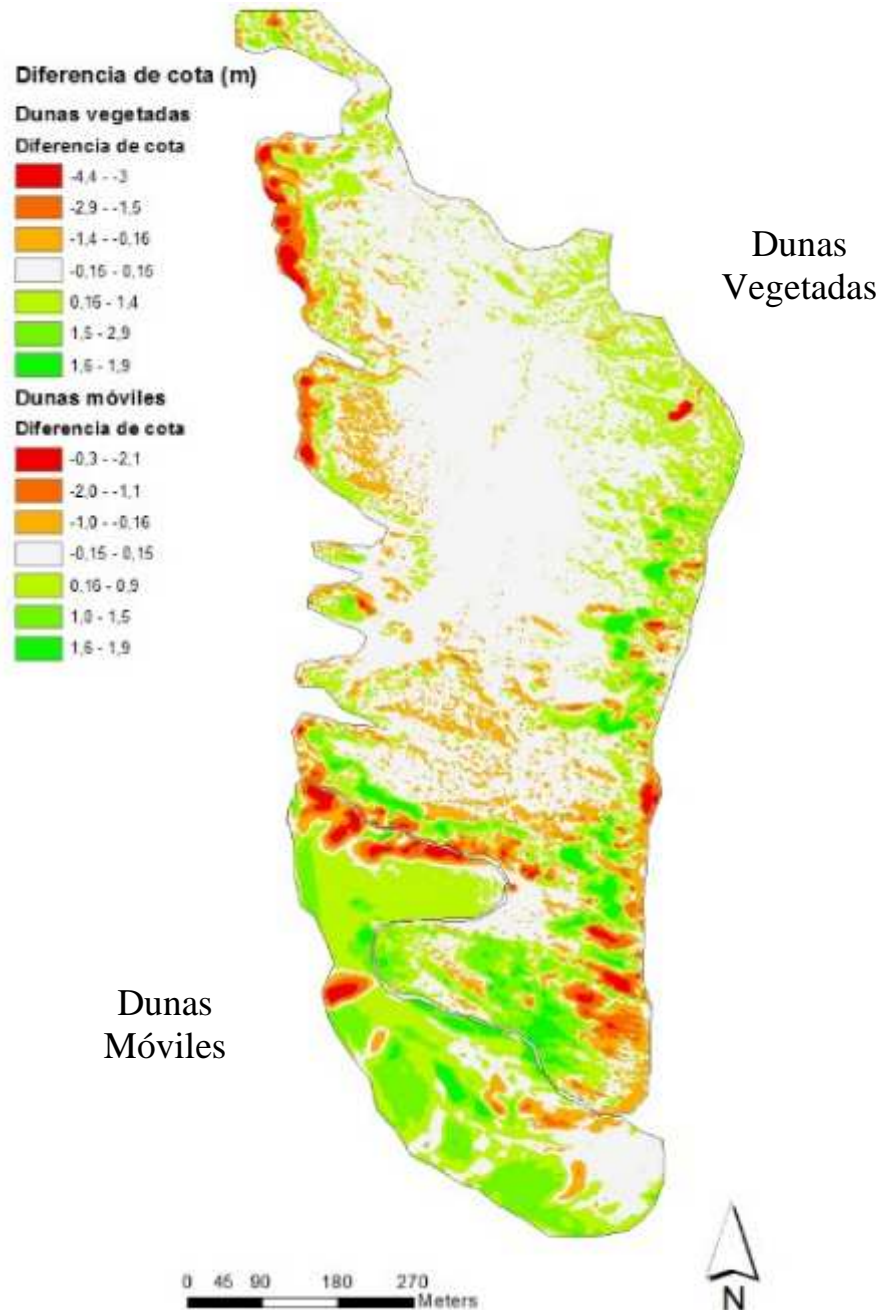


**Figura 13.** Representación de la tasa de punto final calculada para los transectos de los pies de duna en los diferentes intervalos entre los años 2008, 2013 y 2015.

### 6.3. Diferencias de altura entre MDTs

El cálculo de diferencias de alturas entre MDTs con el uso de los datos LIDAR da como resultado tres modelos digitales del terreno correspondientes a las 3 comparaciones realizadas, 2008-2013, 2013-2015 y 2008-2015, que proporcionan información de los cambios de altura en las áreas dunares. La comparación de los años 2008 y 2015 (Figura 14) es la que representa más claramente las tendencias de acreción-erosión. En ella se ha asignado una rampa de color que muestra en tonos verdes las zonas que han experimentado acreción, y en color rojo las que han experimentado erosión. En color blanco quedan representadas las áreas estables, donde las variaciones están dentro del rango de error vertical del LIDAR ( $\pm 15$  cm).

En la figura 14 se aprecia cómo el sector sur de la zona de estudio, sobre todo en el área de dunas móviles, presenta valores de diferencia de cota positivos entre 1 y 1,9 metros, que suponen crecimiento vertical de las dunas. Existen asimismo zonas que presentan valores negativos entre -1,5 y -3 metros, principalmente en la zona noroeste de las dunas vegetadas, en la parte norte de las dunas móviles en el sector sur, y en un pequeño tramo en la zona sureste, indicando procesos de rebajamiento vertical.



**Figura 14.** Diferencias de cota entre los MDTs de los años 2008 y 2015. El polígono superior representa la zona de dunas vegetadas, mientras que el inferior abarca la zona de dunas móviles.

## 7. Discusión

En general, la flecha de Sancti Petri y con ella la Punta del Boquerón, está sometida a un continuo proceso de cambio por parte de las corrientes litorales y temporales (Benavente et al., 2002) que suponen una continua variación de su morfología. Se trata de una zona óptima para el estudio de los efectos provocados por temporales dado que se trata de un sistema no urbanizado sometido a diversidad de factores naturales (Balbontín, 2009).

La digitalización de las líneas de costa en las ortofotografías e imágenes aéreas de los diferentes años ha permitido identificar la evolución de la marca de agua y el pie de duna en la Punta del Boquerón, con una variabilidad más pronunciada en el extremo libre que en el resto de la zona de estudio, donde la línea de costa se mantiene relativamente estable, especialmente en el tramo Este. De hecho, el análisis de los cambios registrados revela tendencias muy heterogéneas en la variación de ambos indicadores entre los años 2008, 2013 y 2015. Las irregularidades son particularmente significativas en el caso del pie de duna, debido a la morfología de las dunas en esta zona, que no constituyen cordones longitudinales paralelos a la costa (en cuyo caso presentarían variaciones más regulares), sino que forman acúmulos dunares con entrantes y salientes, con grandes variaciones laterales (Del Río, 2007). Esto se relaciona con la presencia de abundantes abanicos de desbordamiento (*washover fans*) de dimensiones variables, que cortan a las dunas a lo largo de toda la flecha de Sancti Petri. Los tres desbordamientos más meridionales tienen una gran extensión, con una penetración de hasta 250 m, condicionada por la realización de excavaciones artificiales históricas (Benavente et al., 2002). La irregularidad de las tendencias detectadas a corto plazo coincide con las observaciones realizadas por otros autores en la zona, a escala de décadas (Del Río et al., 2013; Puig et al., 2014).

Por otro lado, la variabilidad espacial y temporal de las tendencias evolutivas recientes en la zona de estudio puede estar relacionada con los períodos de temporales ocurridos durante el intervalo de tiempo analizado. Considerando que los temporales en la Bahía de Cádiz tienen lugar en los meses de invierno (de noviembre a febrero principalmente) (Puertos del Estado, 2016) es posible hacer una comparación de las alturas de ola máximas registradas en esta época en los diferentes inviernos (Tabla 3) previos a la toma de las imágenes aéreas utilizadas para este trabajo.

Período (meses)	Altura de ola máxima (metros)
Enero 2008 - Febrero 2008	3,00
Noviembre 2008 - Diciembre 2008	2,76
Enero 2009 – Febrero 2009	4,43
Noviembre 2009 – Diciembre 2009	5,54
Enero 2010 – Febrero 2010	5,07
Noviembre 2010 – Diciembre 2010	4,83
Enero 2011 – Febrero 2011	3.83
Noviembre 2011 – Diciembre 2011	3.18
Enero 2012 – Febrero 2012	4,90
Noviembre 2012 - Diciembre 2012	4,20
Enero 2013 - Febrero 2013	8,10
Noviembre 2013 – Diciembre 2013	4,95
Enero 2014 – Febrero 2014	8,05
Noviembre 2014 – Diciembre 2014	6,05
Enero 2015 - Febrero 2015	2,77*

\* Valores tomados en el punto SIMAR 6016038 de Puertos del Estado, dada la indisponibilidad de la Boya Costera de Cádiz para esta fecha

**Tabla 3.** Valores medios de altura de ola máxima para los períodos de temporales entre 2008, 2013 y 2015, correspondientes a la Boya Costera de Cádiz, con coordenadas 6.33° W, 36.50° N (Fuente: Puertos del Estado, 2016)

Se observa en los datos de altura de ola máxima cómo los inviernos transcurridos entre las imágenes de 2008 y de 2013 fueron especialmente energéticos, sobre todo el invierno 2009-2010, caracterizado por una serie de temporales de gran intensidad y duración, que generaron diversos daños a lo largo de la costa gaditana (Del Río et al., 2012). Esto podría relacionarse con las importantes diferencias registradas en las tasas de cambio costero en la Punta del Boquerón entre 2008-2013 (clara erosión) y 2013-2015 (estabilidad relativa). Es probable asimismo que el importante descenso de cota de las *foredunes* en el extremo NE del área de estudio se deba al retroceso sufrido durante dichos temporales. No obstante, dado el marco temporal en el que se ha realizado el presente TFG, no ha sido posible llevar a cabo un estudio pormenorizado de los registros horarios de oleaje correspondientes al periodo entre 2008 y 2015. En futuros trabajos se podrá contemplar este aspecto, imprescindible para

realizar una valoración detallada de las causas de los cambios observados en la marca de agua y el pie de duna de la Punta del Boquerón.

En el caso del campo de dunas móviles situado en el límite sur del área de estudio, la escasez de vegetación en esta zona hace que su morfología y, por tanto, la posición del pie de duna cambie en cuestión de días, especialmente en condiciones de fuertes vientos de Levante (Gracia et al., 2006). Este alto dinamismo hace que la escasa resolución temporal de las imágenes empleadas (con casi 5 años entre el primer vuelo y el segundo, y 2 años entre el segundo y el tercero) no permita atribuir directamente relaciones causa-efecto entre las condiciones meteorológicas de los periodos estudiados y los cambios registrados en la posición del pie de duna. Por tanto, un aumento de la resolución temporal sería un aspecto importante a tener en cuenta de cara a futuros estudios.

En cuanto a la vulnerabilidad de la zona de estudio, cabe destacar la existencia de un bajo rocoso longitudinal, constituido por un conglomerado cementado de origen fluvio-litoral (García de Domingo et al., 1987; Benavente et al., 2002), situado frente a la flecha de Sancti Petri, a unos 500-700 metros de la costa y de carácter discontinuo. Este afloramiento rocoso otorga cierto grado de protección frente a los temporales (Benavente et al., 2002) y por ello el sector central de la flecha (que incluiría el extremo NO del área de estudio) es el más desprotegido, dada la práctica ausencia de esta barrera frente a él (Benavente et al. 2002).

Dentro de los factores relacionados en la modificación de este sistema, también cabe considerar los factores antrópicos. En Camposoto, la instalación de accesos a la playa, viene acompañada de un desmantelamiento parcial de las dunas, además de una degradación de las dunas aledañas, puesto que el pisoteo del público no se limita a las pasarelas de acceso (Benavente et al., 2002). Dado que la Punta del Boquerón carece de instalaciones públicas a excepción de una única estructura de acceso al extremo sur, que consiste en una pasarela de madera que se extiende paralela a la costa tras la franja dunar, es probable que el efecto antrópico sea de menor magnitud al estar limitado el acceso a la misma.

En cuanto a posibles mejoras metodológicas, como ya se ha comentado, se podría considerar la realización de este estudio con una mayor resolución temporal que permitiera analizar las modificaciones de la zona con un mayor grado de detalle, estableciendo las posibles relaciones entre las condiciones meteorológicas de los diferentes años y los cambios ocurridos. Esto sería especialmente interesante en el sector sur de la zona de estudio, es decir, el extremo libre de la punta, ya que según muestran los resultados es el sector que más

cambios experimenta. Además, éste parece el tramo más vulnerable frente a las condiciones meteorológicas, dada la ausencia de vegetación y su posición junto a la desembocadura del caño mareal de Sancti Petri, ya que la influencia mareal junto a las corrientes litorales serán factores con gran influencia en su morfología. Por otro lado, además de aumentar la resolución temporal en el estudio, sería de interés realizar un seguimiento de los temporales ocurridos en los años abarcados por el estudio que permitiera establecer, como ya se ha comentado, la relación con los cambios morfológicos y respaldar esta relación con datos climatológicos en el mismo marco temporal.

## 8. Conclusiones

El objetivo de este estudio ha sido llevar a cabo una evaluación de los cambios de esta zona durante los años 2008, 2013 y 2015, un plazo no suficientemente largo para la obtención de tendencias claras de comportamiento pero que permite conocer algunos de los cambios experimentados por este sistema de playa y dunas.

Dados los resultados, se puede concluir:

- Los cambios experimentados por la *Punta del Boquerón* en el intervalo de tiempo estudiado destacan principalmente en su zona sur, donde se han producido las mayores variaciones de la línea de costa y el pie de duna, probablemente debido a procesos de erosión-acreción asociados a los temporales invernales de Poniente (en el caso de las dunas vegetadas) y a los vientos de Levante (en el caso de las dunas móviles).
- Se descarta que las variaciones experimentadas por el pie de duna estén relacionadas con la actividad antrópica, dado que en la zona no tiene lugar la instalación de ningún tipo de estructuras para el uso público en los meses de verano.
- Dentro del intervalo de estudio, destacan los cambios producidos entre los años 2008 y 2013. Estos cambios se pueden relacionar con los temporales registrados en dicho intervalo, fundamentalmente los del invierno 2009-2010.
- La instalación de empalizadas y captadores de arena podría suponer una medida para hacer frente a los períodos de temporales, con el objetivo de disminuir el retroceso del

sistema dunar, especialmente en el caso de las dunas móviles ubicadas en el sector sur (extremo libre de la flecha litoral).

- Finalmente, dado que se trata de un sistema natural no urbanizado, sin apenas intervención humana, la evolución de la línea de costa y del pie de duna dependerá principalmente de los factores naturales como el oleaje de temporales, las corrientes litorales y los vientos.

## 9. Bibliografía

- Aemet. (2016). Página web de la Agencia Estatal de Meteorología. Gobierno de España.  
URL: [www.aemet.es](http://www.aemet.es)
- Alonso, C.; Benavente, J. y Gracia, F.J. (2009). Evolución histórica del sector meridional de la Bahía Interna de Cádiz. *RAMPAS* 11, 21-23.
- Balbontín, P. (2009). *Coastal erosion and flooding hazards due to storm surges in Camposoto beach (Bay of Cádiz Natural Park, Spain)*. Tesis de Master, Universidad de Cádiz, 54 pp.
- Benavente, J.; Gracia, F.J. y López-Aguayo, F. (2000). Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments. *Marine Geology* 167 (3-4), 375-390.
- Benavente, J.; Martínez, J.A.; Gracia, F.J.; Reyes, J.L. y Del Río, L. (2002). Procesos de desbordamiento en la flecha litoral de Sancti-Petri (Bahía de Cádiz): riesgos asociados. En E. Serrano, A. García de Celis, J.C. Guerra, C.G. Morales y M.T. Ortega (eds.): *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología*. SEG y Universidad de Valladolid, Valladolid, p. 23-32.
- Benavente, J.; Del Río, L.; Anfuso, G.; Gracia, F.J. y Reyes, J.L. (2002). Utility of morphodynamic characterization in the prediction of beach damage by storms. *Journal of Coastal Research* SI 36, 56-64.
- Brito, J.N. y Coelho, L.C. (2002). *Fotogrametría Digital*. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 215 pp.
- Cabeza, J.F. (2015, 18 de Mayo). 280.000 euros en arena para la playa de Camposoto. *Andalucía Información*. Recuperado de: <http://andaluciainformacion.es/sanfernando/506362/280000-euros-en-arena-para-la-playa-de-camposoto/>
- Carter, R.W.G. (1991). *Coastal Environments*, 3ª ed. Academic Press, New York, 617 pp.
- Consejería de Turismo, Comercio y Deporte (2008). *Guía de turismo activo del Parque Natural Bahía de Cádiz y su entorno*. Junta de Andalucía.
- Crowell, M.; Douglas, B.C. y Leatherman, S. (1997). On forecasting future US shoreline positions: a test of algorithms. *Journal of Coastal Research* 13 (4), 1245-1255.
- Cuena, G.; Gutiérrez, J.; López, B.; Moreno, L. y Muñoz, J. (2001). Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Coastal Engineering* 42, 143-153.
- Da Graça, N.; Del Campo, J.; Muñoz, J. y Román, J. (2013). Comments on “Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain” by E. Poizot et al. (2013). *Geo-Marine Letters* 33 (4), 77-79.
- Del Río, L. (2007). *Riesgos de erosión costera en el litoral atlántico gaditano*. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz, 496 pp.
- Del Río, L.; Plomaritis, T.A.; Benavente, J.; Valladares, M. y Ribera, P. (2012). Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cadiz coast. *Geomorphology* 143-144, 13-23.
- Del Río, L. y Gracia, F.J. (2013). Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes. *Natural Hazards* 65, 2385-2397.
- Del Río, L.; Gracia, F.J. y Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts: a case study in SW Spain. *Geomorphology* 196, 252-266.



- Felicísimo, A. (1999). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales*. Pentalfa.
- Ferreira, O.; García, T.; Matias, A.; Tabora, R. y Alveirinho Dias, J. (2006). An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research* 26, 1030-1044.
- Gracia, F.J. y Benavente, J. (2000). Geomorfología de la costa atlántica gaditana. En: J.R. de Andrés y F.J. Gracia (eds.), *Geomorfología litoral. Procesos activos*. Monografía nº 7 SEG. ITGE y Servicio de Publicaciones, Universidad de Cádiz, p. 237-255.
- Gracia, F.J.; Del Río, L.; Alonso, C.; Benavente, J. y Anfuso, G. (2006). Historical evolution and present state of the coastal dune systems in the Atlantic coast of Cadiz (SW Spain): Palaeoclimatic and environmental implications. *Journal of Coastal Research* SI 48, 55-63.
- Gracia, J. (2008). Geomorfología y estratigrafía del Pleistoceno y Holoceno en la banda atlántica de Cádiz. La ocupación prehistórica de la campiña litoral y banda atlántica de Cádiz. J. Ramos (ed.). Consejería de Cultura. Junta de Andalucía. p. 19-24.
- Gracia, J. y Sanjaume, E. (2011). *Las dunas en España*. Sociedad Española de Geomorfología, 747 pp.
- Jiménez, J.D. (2012). *Movimientos de ladera en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Granada, España): Identificación, análisis y cartografía de susceptibilidad y peligrosidad mediante SIG*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 127 pp.
- Junta de Andalucía (2003). Decreto 250/2003, de 9 de septiembre, por el que se declaran determinados Monumentos Naturales de Andalucía. BOJA número 188 de 30/09/2003. Andalucía. España.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2010). Monumento Natural Punta del Boquerón. Disponible en:  
<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/servtc5/ventana/mostrarFicha.do?idEquipamiento=20134>
- Hughes, M.L.; McDowell, P.F. y Marcus, W.A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology* 74, 1-16.
- Instituto Geográfico Nacional(2016). Página web del Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. URL:  
<http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesFotoTelePNOA.do>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). Página web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. URL:  
[www.magrama.es](http://www.magrama.es)
- Menapace, W. (2011). *Efectos de los temporales costeros en el sistema dunar de Camposoto (San Fernando, Cádiz)*. Tesis de Master, Universidad de Cádiz, 51 pp.
- Parrado, J.M. (1997). *Estudio de la dinámica sedimentaria en la Bahía de Cádiz. Modelo de distribución de corrientes de fondo*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Cádiz, 150 pp.
- Puig, M.; Del Río, L.; Plomaritis, T.A. y Benavente, J. (2014). Influence of storms on coastal retreat in SW Spain. *Journal of Coastal Research* SI 70, 193-198.

- Ojeda, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la AGE* 30, 103-118.
- Peña, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Ed. Club Universitario, Alicante, 310 pp.
- Puertos del Estado (2013). *Extremos máximos de oleaje (altura significativa)*. *Boya de Cádiz, periodo 1983–2012*. Banco de Datos Oceanográficos de Puertos del Estado, Madrid. 8 pp.
- Puertos del Estado (2016). Página web oficial de Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. URL: <http://www.puertos.es/>
- Fages, L.; Gómez, G.; Muñoz, M.; Navarro, M. y Román, J. (2004). Dune ecosystems in the province of Cadiz. Dune stabilization in Bolonia and Valdevaqueros in the Tarifa area. *Revista de Obras Públicas*, 151, n. 3450, 65-76.
- Sánchez, J.L. (1988). *Estudio climatológico de la Bahía de Cádiz*. Instituto Hidrográfico de la Marina, Ministerio de Defensa.
- Soria, B.M. (2014). *Metodología para la ejecución y control de calidad para ortofotos, mediante combinación de sensor digital con LIDAR en zonas rurales*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 212 pp.
- Thieler, E.R.; Himmelstoss, E.A.; Zichichi, J.L. y Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0— An ArcGIS extension for calculating shoreline change. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278*.
- Wehr, A. y Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning: an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2-3), 68-82.