

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE COSTA DE LA PLAYA DE ES TRENC (S. DE MALLORCA): CAUSAS Y CONSECUENCIAS

JOSÉ ÁNGEL MARTÍN PRIETO^{1,2}, FRANCESC XAVIER ROIG MUNAR², ANTONIO RODRÍGUEZ PEREA¹, GUILLEM XAVIER PONS BUADES¹, MIQUEL MIR GUAL¹ y BERNARDÍ GELABERT FERRER¹.

(1). Universitat de les Illes Balears. Cra. Valldemosa km 7.5. (Illes Balears). 07122

josean33@gmail.com, arpera2@gmail.com, guillemx.pons@uib.es,
miquelmirgual@gmail.com, bernardi.gelaber@uib.es

(2). Qu4tre, Consultoria Ambiental

xiscoroig@gmail.com

RESUMEN

Se analiza la evolución de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. Mallorca) desde 1956 hasta el 2015. El estudio se ha realizado con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG), junto a una herramienta denominada *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Los parámetros estadísticos estudiados dan como resultado para todo el periodo un retroceso medio de la línea de costa de -5.72 m y una tasa media de -0.1 m/a. El análisis muestra una tendencia erosiva general en toda la playa. Existe una correlación entre los sectores más erosivos y las zonas de mayor presión antrópica. Entre las causas que han favorecido los procesos erosivos se encuentran una gestión basada en la retirada mecánica de las bermas de *Posidonia oceanica* depositadas sobre la playa, la limpieza mecánica de ésta o el impacto de usuarios con la apertura de numerosos caminos interiores al sistema dunar.

Palabras clave: Mallorca, es Trenc, gestión, erosión, GIS, DSAS.

ANALYSIS OF HISTORIC COASTLINE EVOLUTION OF ES TRENC BEACH (S. DE MALLORCA): CAUSES AND CONSEQUENCES

ABSTRACT

This paper analyzes the evolution of the coastline of es Trenc beach (S. Mallorca) from 1956 to 2015. The study was conducted with the help of a Geographic Information System (GIS), together with a tool called *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). The statistical parameters for the whole period show an average of regression of -0.1 m/a, with a total average regression of -5.72 m. The analysis of the regression line shows a general erosive trend across the beach. There is a correlation between the erosional sectors and areas of higher anthropogenic pressure. Among the causes that have favored erosion is the massive withdrawal

with heavy machinery of remains of *Posidonia oceanica* deposited on the beach and the impact of users through the opening of many tracks.

Keywords: Mallorca; es Trenc, coastal management, erosion, GIS, DSAS.

1. Introducción

El litoral arenoso es un medio de transición complejo, frágil y dinámico que se encuentra expuesto a elementos climáticos, terrestres y aéreos. El hecho de tratarse de un medio de transición supone una elevada tasa de actividad morfológica traducida en un elevado grado de dinamismo. Si esto le sumamos una excesiva ocupación de estos medios con escasa planificación a medio plazo obtenemos la vulnerabilidad de las infraestructuras asociadas al medio litoral arenoso (Roig-Munar, 2010). Los cambios en el litoral a corto y largo plazo se asocian con varios factores, como el aporte de sedimento, transporte litoral, cambios del nivel del mar, la hidrodinámica del entorno cercano a la costa, las tormentas y la naturaleza de los accidentes geográficos costeros, y la influencia antrópica (Nordstrom, 2000; Kumar y Jayappa, 2009). Por tanto, la comprensión de las posiciones de línea de la playa y su tendencia de erosión/acreción a través del tiempo son importantes para científicos, ingenieros y gestores (Douglas y Crowell 2000; Boak y Turner 2005).

El litoral de es Trenc ha sufrido a lo largo de las últimas décadas los impactos del desarrollo turístico. En el año 1978 se presentó un proyecto para urbanizar toda el área, pero una campaña de defensa para su conservación consiguió la promulgación de un decreto de protección específico. En este contexto, el Ayuntamiento de Campos, municipio donde se sitúa la playa, ante la negativa a su urbanización, aprovechó la oportunidad de promover el uso masivo de la playa con la construcción de chiringuitos, explotación de hamacas y un restaurante (Blázquez, 1995).

A pesar de los diferentes intentos de protección, reconociendo sus valores naturales, como la Ley 3/1984 de 31 de mayo que declara es Trenc-Salobrar de Campos como Área Natural de Especial Interés, éstos han sido infructuosos. Posteriormente, la Ley 1/1991 de 30 de enero, de Espacios Naturales y Régimen Urbanístico de las Áreas de Especial Protección (LEN), mantiene la declaración de la zona de es Trenc-Salobrar como ANEI. Esta protección salvó este espacio de la urbanización, pero sin garantizar ningún tipo de gestión, así como ningún plan de conservación de sus ecosistemas. Ante la degradación constante y continuada en el tiempo de este sistema natural, recientemente, y después de su necesidad de protección manifestada durante el 1984, se ha declarado Parque Natural Marítimo terrestre (Ley 2/2017, de 27 de junio, de declaración del Parque Natural Marítimo-Terrestre Es Trenc-Salobrar de Campos, BOIB nº 81, de 4 julio 2017).

La afluencia excesiva de usuarios, unos accesos no regulados, una limpieza mecánica y la retirada de bermas de *Posidonia oceanica* inadecuadas, la construcción de chiringuitos en el frente dunar y una falta de ordenación y gestión integral del espacio, ha dado lugar a un acelerado proceso de degradación. A raíz de lo dicho, los síntomas se manifiestan hoy en día a partir de balances sedimentarios negativos, pérdida de superficie de playa, o la degradación del sistema dunar, especialmente de la *foredune*. Sin embargo, a pesar de la importancia geomorfológica de este espacio litoral y los problemas arriba expuestos, los principales estudios relacionados con la playa de es Trenc se circunscribían al ámbito de la botánica, la ecología o la

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

ornitología. No es hasta el año 2010 cuando Martín *et al.*, (2010) confirmaron estas cuestiones analizando la evolución de la línea de costa de la playa de es Trenc a partir del análisis histórico de su línea de costa con fotografía aérea entre los años 1956 y 2002.

La principal diferencia entre este trabajo y el de Martín *et al.* (2010) reside en la metodología utilizada. El contraste es importante, ya que entonces se realizó la digitalización de la línea de costa a partir de georreferenciar toda la fotografía aérea disponible (1956, 1983, 1990, 1997 y 2002), tomando como base la cartografía digital a escala 1.5.000 del año 1995. Los errores más importantes se centraron en el proceso de identificación de los puntos sobre la cartografía y su posterior reflejo en la fotografía aérea, ya que salvo las zonas urbanas (exclusivamente en los extremos de la playa), en el resto de la playa apenas hay puntos en común. Posteriormente se digitalizaron las diferentes líneas de costa y se trataron en un SIG, con la ayuda de la herramienta DSAS 2.0. Otra diferencia significativa, es que en el presente trabajo se ha utilizado la ortofoto disponible en el IDEIB (Infraestructura de Datos Espaciales de las Islas Baleares, www.ideib.caib.es). Finalmente, para el análisis estadístico, se ha utilizado la versión DSAS 4.0.

2. Zona de estudio

El litoral de es Trenc constituye uno de los espacios naturales más emblemáticos de las Islas Baleares, siendo el sistema litoral arenoso con mayor valor ecológico de Mallorca. Las características biogeográficas del sistema playa-duna se forjan debido a un número significativo de hábitats, con importantes praderas de fanerógamas marinas asociadas a una extensa playa, cordones dunares delanteros, dunas estabilizadas, zonas húmedas, etc. Esta importancia, queda puesta de manifiesto con la presencia de hábitats de interés comunitario, presentes en los anexos de la Directiva 92/43/CE. Su elevado interés ornitológico hizo que fuera considerado como IBA (Área de Especial Importancia para las Aves) y justifica su declaración como ZEPA, además de LIC, actualmente ya declarada como Zona Especial de Conservación (ZEC).

La playa de es Trenc se sitúa en el litoral meridional de la isla de Mallorca (figura 1). Se trata de una playa arenosa que se extiende desde el promontorio de ses Covetes, situado en su extremo noroccidental, hasta la Colònia de Sant Jordi, en el extremo sudeste. Tiene una longitud aproximada de 3.8 km y una orientación de NW a SE. La playa se ve interrumpida por la presencia de varios afloramientos rocosos del Pleistoceno superior formados por eolianitas y arenas de playa cementadas (Vicens *et al.*, 2006) y por terrazas de erosión marina, ligeramente por encima del nivel de mar actual (Rosselló, 1969). Estos afloramientos y terrazas individualizan diferentes segmentos de costa, especialmente en la mitad meridional, que son conocidos como es Peregons y la playa des Marqués (figura 1).

Desde el punto de vista de su clasificación morfodinámica, la playa puede ser catalogada en un estadio intermedio, siguiendo la clasificación establecida por Wright y Short (1983). Este tipo de estadio corresponde a playas semicerradas, normalmente con un sistema dunar (Gómez *et al.*, 2007). Estos autores destacan que en la estación invernal suelen migrar a un estado reflectivo, mientras en la época estival hacia un estado más disipativo. En la fotografía aérea se pueden distinguir barras sumergidas de tipo *crescentic* y paralelas a la línea de costa.

En cuanto a la petrología de su sedimento, la composición es predominantemente bioclástica (98.3 %), siendo el resto litoclastos, en su mayor parte de naturaleza calcárea. Su textura se caracteriza por un tamaño de grano fino (Gómez *et al.*, 2007). Su contenido en CaCO₃ es del 80 % (Jaume y Fornós, 1992).

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

A lo largo de la playa emergida encontramos 6 bunkers construidos a partir de 1939 (Albertí, 1998), que permiten observar a simple vista la pérdida de superficie de la misma, así como el retroceso de la *foredune* (figura 1). El objetivo de estas estructuras rígidas era la de ser vistas desde el mar, por lo que eran construidas sobre el cordón delantero. Por tanto, constituyen un magnífico elemento para estimar la erosión que ha tenido la playa de es Trenc a lo largo de las últimas décadas.

Por lo que respecta a la batimetría, la isobata de -10 m se encuentra a 800 m de la costa y la de -20 m a una distancia cercana a los 1.800 m. Esto significa que las olas de alta energía comienzan a disipar su fuerza a una distancia considerable de la playa. Por otra parte, la isobata de -1 m se encuentra a los 80 m de la línea de costa. Podemos decir que el oleaje que modifica los rasgos morfológicos de este litoral se debe a grandes temporales (Martín *et al.*, 2010), aspecto importante para la interpretación de procesos sedimentarios, que dependen en gran medida de la deriva litoral (figura 2) (Servera y Martín, 1996).

El otro aspecto destacado de la playa sumergida es la presencia de *Posidonia oceanica*. Se desarrolla formando una pradera, la cual crece principalmente a partir de una bio-estructura construida a base de raíces, rizomas y hojas, denominada "mata". Su presencia juega un papel muy importante en la dinámica natural. Por una parte, al desarrollarse en el *nearshore* en una profundidad que oscila entre los -2 y -40 m, sirve como atenuante de la altura de las olas más altas, con lo que la profundidad relativa disminuye (Elginos *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2011; Stratigaki *et al.*, 2011). En la playa de es Trenc, la pradera se extiende aproximadamente de forma homogénea desde la cota -10 m hasta una profundidad de -35 m. Su límite superior muestra irregularidades y sectores aislados, pero analizando la fotografía aérea, no se ha observado retroceso del mismo (figura 1). Sus rizomas fijan y estabilizan el sedimento en el *nearshore* (Terrados y Duarte, 2000; Manca *et al.*, 2012). En la parte emergida los restos de hoja de *Posidonia oceánica* se acumulan en el sector de playa en forma de bermas y actúan como una efectiva defensa de la playa (Simeoni y De Falco, 2008; Roig-Munar y Martín, 2005). De esta forma, la playa subaérea o *backshore* queda protegida del oleaje de alta energía, manteniendo un perfil estable (De Falco *et al.*, 2002; Roig y Martín, 2005; Cancemi y Duron, 2008). Estas acumulaciones, denominadas *banquette* o berma, son retiradas de la playa de manera sistemática con maquinaria por los gestores de la playa, con lo que en su extracción y transporte se pierde un volumen importante de sedimento que no retorna al balance sedimentario del sistema.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

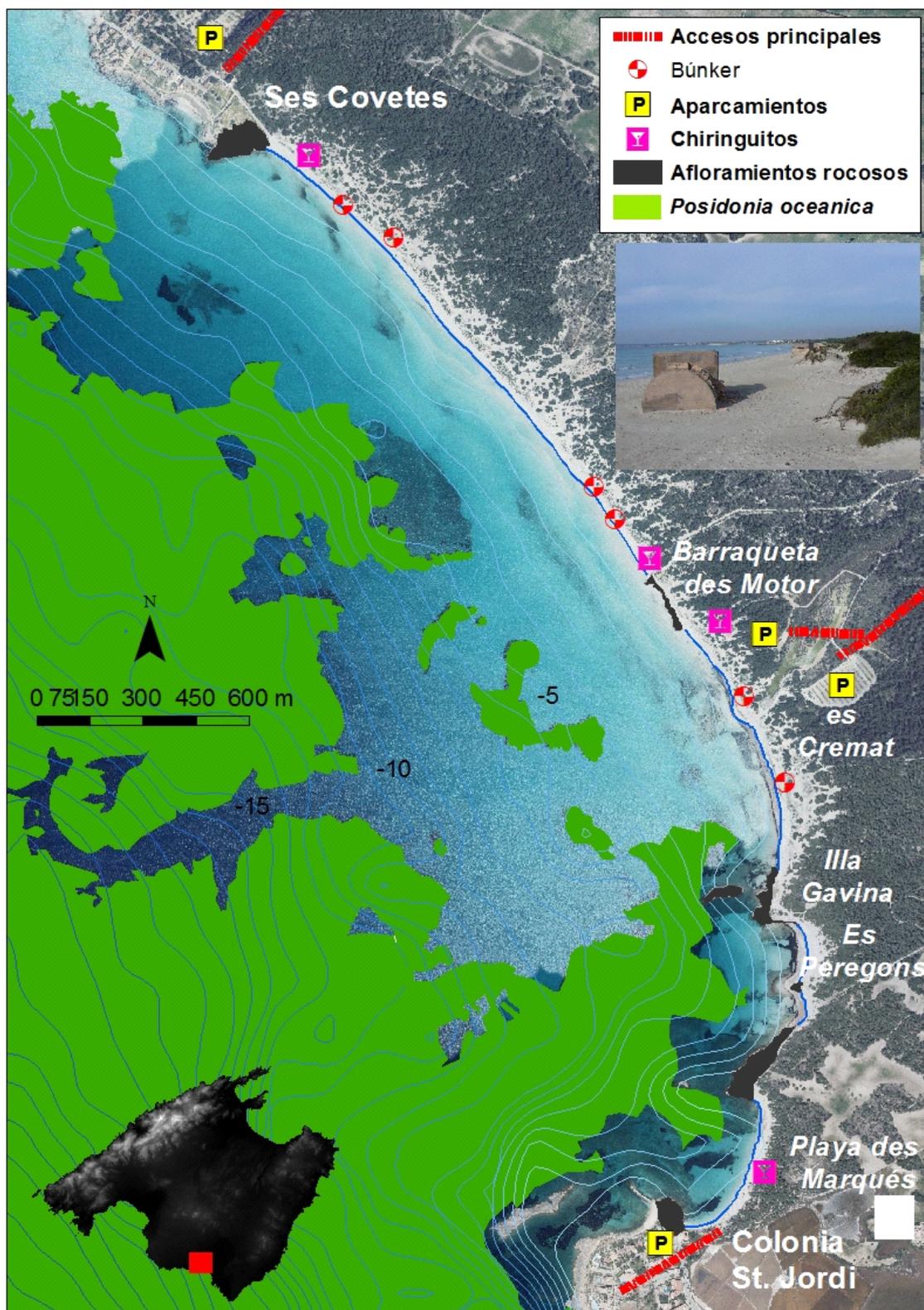


Figura 1. Localización del área de estudio. En la parte superior derecha, se puede apreciar uno de los bunkers y la erosión de la foredune.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

2.1 Clima marítimo

El oleaje de la playa objeto de estudio está condicionado por un *fetch* reducido, con un máximo de 700 km para el SSO y un mínimo de 280 km para el SE. La altura de ola significativa (Hs) y la dirección son proporcionados por *Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe* (HIPOCAS). Los datos de oleaje han sido recogidos por horas a lo largo de 44 años, durante el periodo comprendido entre 1958-2001, constituyendo la base de datos más completa para el Mediterráneo (Infantes *et al.*, 2009; Cañellas, 2010). Para este trabajo, se ha utilizado la base de datos del Nodo HIPOCAS 1694 (Balaguer *et al.*, 2007), localizado a unos 27 km al SE de la zona de estudio (figura 2).

La distribución temporal de la altura significativa y su dirección muestra una bimodalidad que ayuda a interpretar los procesos morfosedimentarios que tienen lugar en la playa. Por un lado, tenemos la rosa de oleaje correspondiente a los meses de abril a septiembre, que presenta una dirección predominante del ESE, favoreciendo el transporte de sedimento hacia el W, y una segunda dirección en sentido contrario, del SW, de menor frecuencia e intensidad. Entre los meses de octubre a marzo la procedencia del oleaje tiene una componente predominante del SW, la cual supone que el sedimento sea transportado hacia el SE.

El 73 % de las olas tiene una altura inferior a 1 m y el periodo pico el 73 % es inferior a 6 s (figura 2); mientras la Hmx registrada desde 1958, tuvo lugar el 1 de diciembre de 1959, con una altura máxima de 7.2 m, un periodo de 11.2 s y una dirección procedente del SW (www.puertos.es). La Hs50 para este nodo HIPOCAS, se estima en 8.76 m (<http://www.costabalearsostenible.com>). Finalmente, la zona de estudio no se ve prácticamente afectada por el efecto de la marea, ya que las oscilaciones debidas a la presión atmosférica son incluso más influyentes que la propia marea. En ese sentido, su influencia es poco significativa, con valores que oscilan en torno a los 0.3 m (www.puertos.es).

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

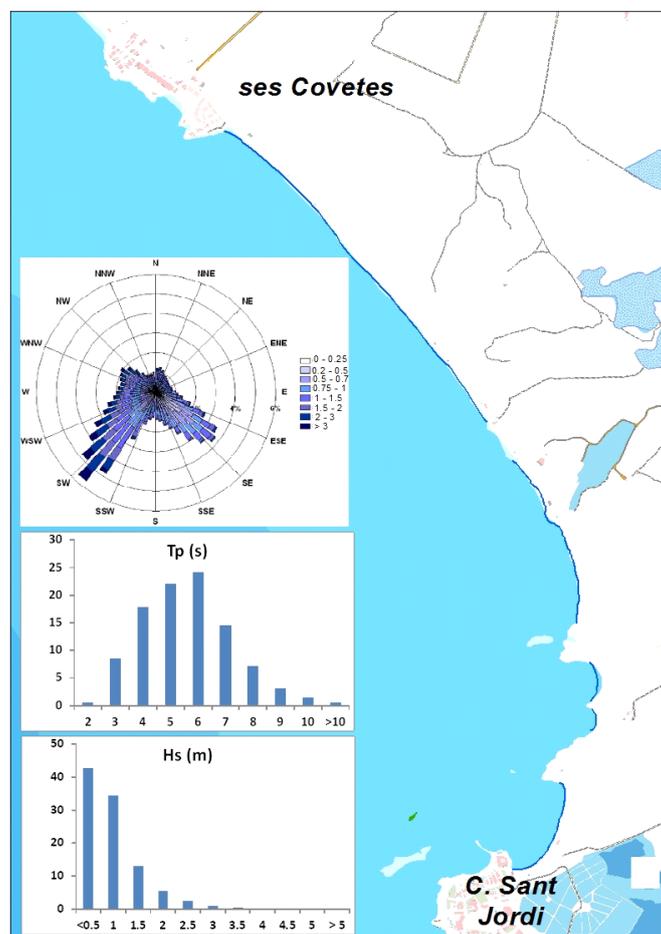


Figura 2. Rosa de oleaje para el periodo 1958-2001 (Balaguer *et al.*, 2007), Periodo pico (Tp) y altura de ola significativa (Hs) (www.puertos.es)

3. Objetivos y metodología

El objetivo principal de este trabajo consiste en analizar la evolución histórica de la línea de costa desde 1956 hasta el año 2015, determinando su proceso evolutivo. Un segundo objetivo es el de relacionar su comportamiento con las posibles causas que han contribuido a su degradación e intentar predecir su tendencia en el futuro.

3.1 Definición de la línea de costa

La línea de costa se define como el umbral entre la masa de agua estabilizada del mar y tierra firme (Dolan *et al.*, 1980). La posición de la misma es altamente variable a corto plazo, donde los procesos de erosión y acumulación pueden suponer sustanciales variaciones de perfil y posición en cuestión de horas (Servera y Martín, 1996). Según Elliot y Clark (1989), esta naturaleza dinámica de la línea de costa en períodos cortos de tiempo puede enmascarar la percepción de la evolución a largo plazo, ya que en ocasiones estos cambios pueden ser cíclicos y dar lugar a resultados erróneos. Es necesario la observación de periodos largos, superiores a 10 años, a fin de realizar un diagnóstico fiable sobre el comportamiento evolutivo de la línea de costa (Pajak y Leatherman, 2002; Boak y Turner, 2005).

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

La línea de costa empleada para la digitalización ha sido el límite húmedo/seco, ya que marca el límite superior del *foreshore* y determina el comienzo de la playa alta o playa seca (Ojeda, 2000). Para definir y digitalizar la línea de costa sobre la fotografía aérea se ha estimado como más adecuado trabajar con el límite superior de la acción del *swash*. La justificación para utilizar este límite se debe a la ausencia de mareas en nuestro ámbito de estudio, con un rango desestimable (Martín *et al.*, 2010). Esta línea es visible en las fotografías (tanto las de color como las de blanco y negro) utilizadas, ya que el contraste entre seco y mojado suele definir una línea continua fácil de seguir a lo largo de la playa. Además de esto, la acumulación de hojas muertas de *Posidonia oceanica* depositadas sobre el *foreshore* constituye también un buen elemento para definir la línea de costa.

Sin embargo, hay una serie de fotogramas (1973, 1997, 2002, 2010 y 2015) donde aparecen importantes acumulaciones de *Posidonia oceanica*, que tienen lugar en el sector al norte de la Barraqueta des Motor, un segundo sector comprendido entre este punto y es Peregons y finalmente y de modo especial en este último, donde se han cuantificado hasta 50 m lineales desde el mar hasta la superficie arenosa (figura 3b). En estos casos, la digitalización de la línea de costa se realizó entre la superficie arenosa y la "banquette" (acumulación de restos de hojas muertas de *Posidonia oceanica* con arena y agua depositados sobre la playa, que pueden alcanzar alturas superiores a 2 m en la parte frontal expuesta al mar y una o varias decenas de metros hacia tierra) (figura 3a), por los siguientes motivos. El primero es que no se corresponde con el límite húmedo/seco; el segundo porque no corresponde al punto marcado por la acción del *swash*, el tercero porque esa importante acumulación no se entiende como playa seca y finalmente, porque toda esa biomasa era retirada anualmente con maquinaria pesada de la playa (figura 8), alterando el balance sedimentario como se señaló en la introducción y se explicará con más detalle en las causas.

3.2. Cartografía disponible y digitalización de la línea de costa

Para medir sistemáticamente las variaciones en los cambios de la línea de costa se ha establecido una metodología desarrollada a través de un SIG a partir de la utilización conjunta de las ortofotos disponibles obtenidas del IDEIB (Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears, www.ideib.cat), correspondientes a los años 1956, 1989, 2001, 2002, 2006, 2008, 2010, 2012 y 2015, conjuntamente con las fotografías aéreas verticales de a los años 1968, 1973, 1981, 1983, 1995 y 1997. Para estas últimas, cada fotografía fue escaneada a una resolución de 600 dpi y posteriormente fueron georrectificadas utilizando un mínimo de 15-25 puntos de control con la ayuda de un SIG, utilizando como capa base la ortofoto de 2015, cuya resolución es de 0.2 m. El proceso de georectificación implica identificar los puntos de control con coordenadas X, Y conocidas y que vinculan localizaciones de los datos ráster con localizaciones referidas espacialmente. El posible error o diferencial que se puede producir entre la posición inicial y final durante el proceso de rectificación puede ser controlado mediante el error residual. La computación total del error se realiza calculando el error medio cuadrático (RMS), es decir, el sumatorio del error residual de todos los puntos y que representa la consistencia de la georreferenciación entre los diferentes puntos de control.

Una vez digitalizadas las diferentes líneas de costa, todo el conjunto, se ha analizado con la ayuda de una herramienta llamada *Digital Shoreline Analysis System* (Thieler *et al.*, 2009). Para ello, además de las diferentes líneas de costa es necesario establecer una línea de base (en este caso hacia tierra), a partir de la cual se generan una serie de transectos, con una separación entre ellos de 20 m, ya que debido a la longitud de la playa la consideramos una distancia que

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

puede representar con fiabilidad la evolución de la misma. Una vez establecidos estos inputs junto a la incerteza, el programa da como resultado una serie de cálculos a partir de los cuales se obtiene una serie de parámetros estadísticos para el análisis de la zona de estudio (Thieler *et al.*, 1994; Douglas y Crowell, 2000), considerando como los más útiles para este trabajo los siguientes:



Figura 3a y b. Digitalización de la línea de costa cuando hay acumulación de *Posidonia oceanica* sobre la playa y b) panorámica de es Peregons, con un importante "banquette" depositado sobre la playa (en el círculo aparece una persona, como referencia).

Shoreline Change Envelope (SCE): Muestra la distancia entre las líneas más alejadas entre sí para cada transecto. Indica el dinamismo de la línea de costa sin tener en cuenta las fechas. Representa una distancia en metros, no una ratio (Thieler *et al.*, 2009).

Net Shoreline Movement (NSM): Muestra la distancia entre las líneas de costa más antigua y más reciente, sin tener en cuenta si coinciden o no con las líneas más distantes entre sí. Al igual que SCE, representa una distancia en metros, no una ratio.

End Point Rate (EPR): Muestra el valor del NSM, dividido por el número de años transcurridos en cada periodo. Es una tasa anual de movimiento en metros/año. Su principal ventaja es la facilidad de cálculo. Las desventajas son que en algunos casos los datos disponibles, no se utilizan en el análisis de la dinámica del litoral, al utilizar solo dos fechas, pudiendo tener influencia en el resultado final. Esto puede suponer que tendencias o cambios en la misma pueden no ser detectados o incorporados a los resultados. Por ello, este parámetro es comparado con otros como la regresión lineal o la recta de regresión ponderada (Dolan *et al.*, 1991).

Linear Regression (LRR): Este parámetro es utilizado para capturar tendencias de cambios de la línea de costa en periodos largos de tiempo. En el cálculo de este método, la regresión lineal es calculada a través de la intersección de puntos de cada transecto y la pendiente constituye la tasa del cambio expresada en metros/año. Es considerado un método fiable para predecir futuras posiciones del litoral, puede revelar qué tipo de asociación existe en particular (a través del valor R) y cuál es el valor de la varianza de la variable dependiente (la posición de la línea de costa en una fecha determinada, que es la variable independiente) (Crowell *et al.*, 1991; Douglas y Crowell 2000). Sin embargo, el método de regresión lineal es susceptible a los efectos de valores atípicos y también tiende a subestimar la velocidad de cambio en relación con otras estadísticas (Dolan *et al.*, 1991; Genz *et al.*, 2007).

Weighted Linear Regression (WLR): La recta de regresión ponderada puede ser utilizada para describir el comportamiento histórico de la línea de costa. La información puede ser utilizada para remarcar áreas con las mayores tasas de cambio como posibles zonas de mayor vulnerabilidad erosiva (Virdis, 2012). Es un parámetro estadístico importante, ya que tiene en cuenta las incertezas asociadas a los errores (especialmente en fotografías antiguas) como factor de ponderación en las ecuaciones de regresión. Este método se centra en los puntos de datos

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

donde la exactitud de la posición litoral es inferior en un determinado año, con un intervalo de confianza del 95 % (Thieler *et al.*, 2009).

La regresión lineal (LRR) y la regresión lineal ponderada (WLR), fueron seleccionadas porque se consideran estadísticamente más sólidas cuando hay un número importante de líneas de playa disponibles (Crowell *et al.*, 1991). También son las técnicas estadísticas más comúnmente aplicadas para expresar el movimiento de la costa y la estimación de las tasas de cambio (Thieler y Danforth, 1994). Además, minimizan el potencial de error aleatorio y la variabilidad a corto plazo (cambios cíclicos) mediante el uso de un enfoque estadístico (Douglas y Crowell, 2000).

Los valores positivos de los parámetros expuestos representan desplazamiento de la línea de costa hacia el mar (acreción). Por el contrario, valores negativos indican desplazamiento hacia tierra (erosión). Así pues, con la ayuda de las fotografías aéreas y por medio de la comparación, se determina la tasa de cambio de la posición de la costa. En cuanto a la fiabilidad de los resultados para las tendencias y las tasas calculadas del cambio litoral, se determinan a partir de la incertidumbre, que representa los errores de medición asociados con los métodos de asignación de costas históricas. En este estudio los errores corresponden a las mediciones realizadas para determinar con la mayor exactitud posible cada posición de la costa (Pérez *et al.*, 2011).

3.3. Errores e incertezas

Para una óptima estimación de las tasas de cambio y reducir los efectos de la variabilidad temporal a corta escala de tiempo es necesario estimar las incertezas asociadas en cada fotograma a largo plazo (Ruggiero *et al.*, 2012). Esta evaluación del error o incertidumbre en estudios sobre la dinámica del litoral es un tema de suma importancia para proporcionar un marco adecuado en las tasas de cambio, que permita el establecimiento de valores de umbral por encima del cual el error sería significativo (Del Río y Gracia, 2013).

Debido a la generalmente amplia disponibilidad y bajo coste de los materiales, el análisis de fotografías aéreas verticales es la técnica más utilizada en los estudios de erosión costera, especialmente para la cuantificación de las tasas de recesión de la costa a medio plazo (Moore, 2000). Este uso implica tener en consideración diversas fuentes de error o incertidumbre tales como errores en los datos originales, errores de interpretación, errores de medida, etc. (Coyne *et al.*, 1999; Morton *et al.*, 2004). La incerteza en este estudio ha sido calculada basándonos en el trabajo de Genz *et al.* (2007) y Flecher *et al.* (2003). Para ello se han utilizado un total de tres variables utilizadas por dichos autores:

- Error en la digitalización (Ed): incorpora el error asociado con el proceso de digitalización de cada línea de costa. En este trabajo se ha calculado teniendo en cuenta la desviación estándar a partir de varias digitalizaciones realizadas por el mismo especialista.
- Error en la corrección geométrica (Eg): expresada como el error RMS del proceso (Shoshany *et al.*, 1996; Morton *et al.*, 2004). Se calcula a partir del software y es la distancia entre los puntos de control establecidos sobre la fotografía aérea y los puntos de control realizados sobre una ortofotografía. Es una medida estadística que constituye una estimación ampliamente aceptada de la exactitud general del proceso (Hughes *et al.*, 2006).
- Error de escaneo o de píxel (Ep): la incertidumbre corresponde a los procesos de detección o de captura digital de las fotografías u ortofotografías originales. Se

representa por el tamaño de píxel de la imagen (Coyne *et al.*, 1999; Catalão *et al.*, 2002), ya que a mayor tamaño de los píxeles, mayor será la incertidumbre en la interpretación de la posición de la costa en la fotografía.

En este estudio no se incorpora la fluctuación mareal a los errores utilizados debido a que el efecto de las mareas en la zona de estudio es mínimo (Coward *et al.*, 2010). Una vez que los tres componentes del error son calculados, la incerteza en la posición de la línea de costa de un determinado fotograma, es computada como la raíz cuadrada de la suma al cuadrado de cada componente (Fletcher *et al.*, 2003). Finalmente, los valores de incerteza aplicados para el cálculo de las tasas oscila entre 2,45 y el más elevado de 4,98 m.

4. Resultados y análisis

Uno de los aspectos más importantes para una correcta planificación y gestión costera es conocer el comportamiento de la dinámica litoral. El análisis a largo plazo de la evolución costera utiliza datos históricos para identificar los sectores de la costa. Entre la información que puede ser obtenida de estos estudios, están la tendencia general de la costa, ya sea erosionándose o creciendo y las tasas de erosión o acreción en cada lugar que se pueden utilizar para pronosticar posiciones de la costa futura (Arias, 2003). Para poder dar respuesta a su comportamiento, se ha estudiado la evolución de la línea de costa de la playa de es Trenc a partir de su análisis histórico desde el año 1956 hasta el 2015.

En las figuras 4 y 5 se pueden apreciar los valores de WLR a lo largo de la playa y como las mayores tasas de erosión corresponden al sector situado en las proximidades del parking de es Cremat y el ubicado junto al restaurante, situados en el centro de la playa, con tasas máximas de -0.38 metros/año correspondientes al T100. Los valores de NSN, son también los más elevados, con una media de -11.88 m y un máximo de -18.9 m. Asimismo, es el sector con los valores de SCE más elevados (con un rango entre 31 y 40 m), mostrando la mayor variabilidad con respecto al resto de la playa (figura 4).

Otro sector erosivo importante se sitúa en otro de los accesos a la playa, el situado en ses Covetes, donde además del parking en su centro urbano, hay otro que ocupa una extensión de 10.000 m² y una capacidad para 1.200 vehículos. El retroceso máximo es de -12.22 m, con una tasa de -0.24 m/a que se puede observar en el T10 de la figura 5. Constituye una zona de tránsito importante de usuarios hacia el interior de la playa y presenta una variabilidad media con respecto al conjunto, con un rango de SCE entre 20 y 30 m (figura 4). Además, es también el punto desde el que acceden vehículos para suministrar material a chiringuitos y la maquinaria para la limpieza de la playa (figura 10b).

Un tercer sector erosivo, se sitúa hacia el norte de la Barraqueta des Motor, (figuras 4 y 5), con un retroceso de la línea de costa máximo de -14.83 m y valores medios de -10.88 m, con una tasa erosiva de -0.27 m/a, que se puede observar en el T80. Constituye una zona de tránsito de usuarios procedentes del parking de es Cremat, donde además encontramos un restaurante-chiringuito, que pone de manifiesto su elevada variabilidad, con valores de SCE que oscilan entre 30 y 40 m. Hay un cuarto sector, de unos 600 m de longitud, que presenta valores más moderados de retroceso de playa, como los que se aprecian en el T50 de -0.14 m/a con un valor máximo de retroceso de -8.6 m y una media de -6 m.

Finalmente, la Playa des Marqués, situada junto al núcleo urbano de la Colònia de Sant Jordi, también presenta valores moderados de erosión, con un retroceso máximo de -9.7 m en su extremo norte y -0.15 m/a (T185). Los valores de SCE comprenden un rango entre 10 y 20 m.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

En el balance entre 1956 y 2015, tan solo apreciamos pequeños sectores de acreción (figura 4). El más septentrional se sitúa en el centro de la playa, entre los transectos 58 y 61, con tasas de NSM entre 0.54 y 1.3 m y 0.01 y 0.02 m/a de EPR. Es el sector que presenta la menor variabilidad de toda la playa, con los valores más bajos de SCE (entre 11 y 19 m) y por tanto se presenta como el más estable. Coincide con el sector de playa menos frecuentado, fundamentalmente porque es el más alejado de los diferentes puntos de acceso (figura 11).

Un segundo sector con tendencia de acreción sedimentaria se percibe a la altura de la Barraqueta des Motor (figura 1), hecho que se debe a que el canal para impulsar el agua a las salinas se interna unos metros mar adentro, facilitando procesos tanto erosivos como de acreción en función de la deriva litoral. El tercer sector de crecimiento se sitúa al N de illa Gavina, con valores máximos de 6.45 m y 0.11 m/a, que obedece al transporte de sedimento por deriva litoral, que es atrapado por el afloramiento rocoso de Illa Gavina.

Finalmente, se aprecia el sector de es Peregons, el cual se puede considerar una anomalía con respecto al resto de la playa. Tomando en consideración el SCE, éste es el sector en donde se localizan los valores máximos, alcanzando los 48.26 m. Los valores de NSM y EPR máximos son de 13.37 m y 0.33 m/a respectivamente. Es una zona donde se producen importantes acumulaciones de hojas de *Posidonia oceanica* sobre la playa (figura 3b), que son retiradas cada año, lo que supone que la línea de costa varía ampliamente en función de esa retirada (Roig-Munar y Martín, 2005). No consideramos este sector representativo de la playa de es Trenc, debido a su escasa superficie y al estar situada entre dos afloramientos rocosos, impidiendo la deriva litoral, pudiendo considerarse como una cala en sentido estricto.

Todos los transectos de la figura 5 presentan la tendencia general de la playa. El análisis de LRR por transectos muestra la tendencia erosiva general. Así, comenzando por el más septentrional (T10), el más próximo a ses Covetes y a medida que nos desplazamos hacia el S, las tasas erosivas disminuyen, desde los -0.24 m/a hasta los -0.19 y -0.14 m/a en los T30 y T50 respectivamente. Es decir, a medida que nos desplazamos de uno de los principales accesos, las tasas erosivas disminuyen, para volver a incrementarse en los dos siguientes (T80 y T100), que coinciden con el sector más erosivo de toda la playa (figuras 5 y 11), que es el que recibe el mayor impacto de usuarios, con tasas medias anuales erosivas de -0.27 y -0.38 m/a, que se traducen en -27 y -38 m/a respectivamente, siendo este último, el más elevado. Finalmente los tres transectos más meridionales, T125, T145 y T185, presentan valores de -0.12 (las tasas más bajas), -0.30 y -0.15 m/a respectivamente. La tendencia muestra un comportamiento regresivo a lo largo de toda la playa, con pequeñas variaciones en las tasas erosivas en función de los accesos y la presión de uso de la playa.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

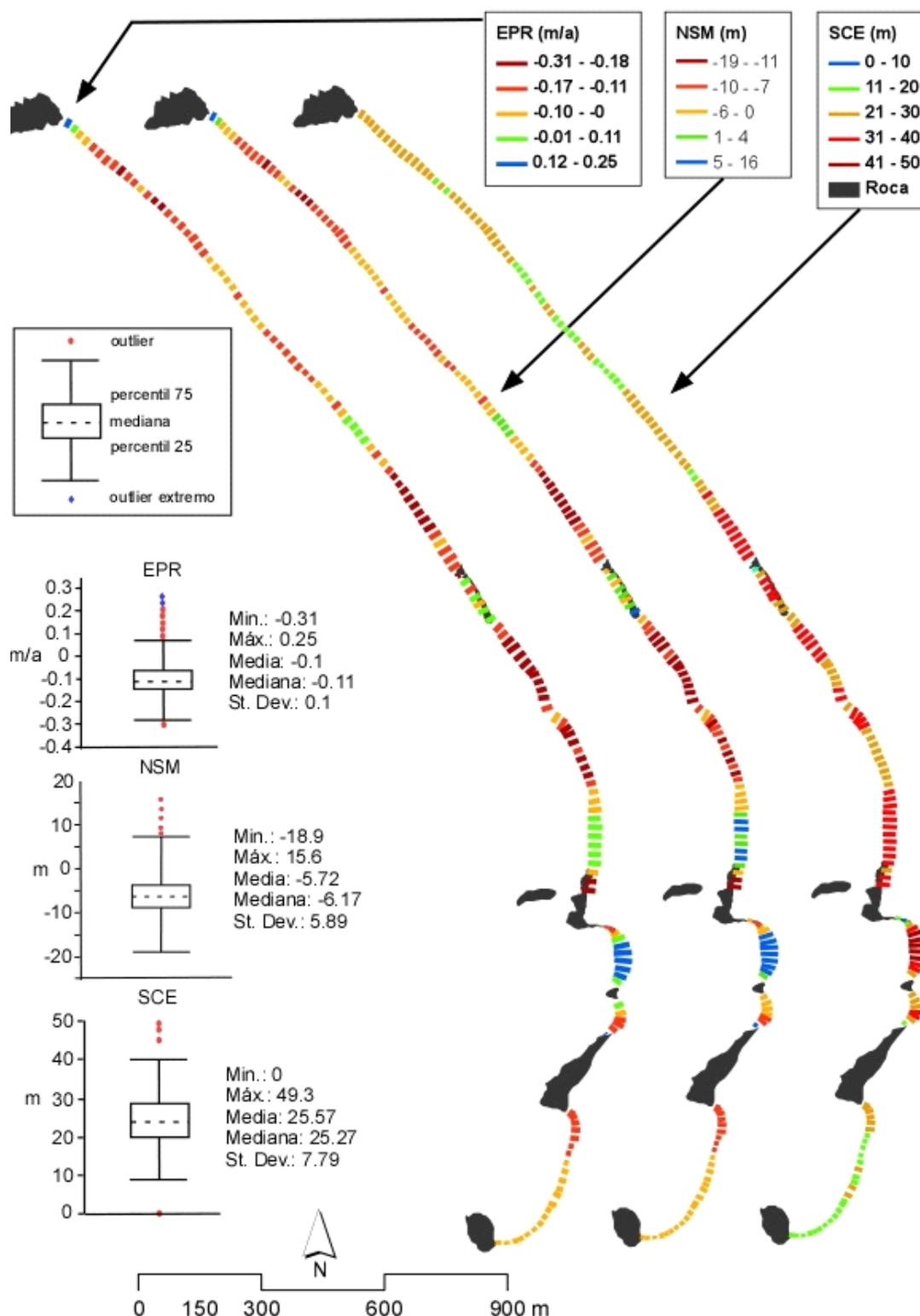


Figura 4. Representación gráfica de los parámetros EPR, NSM y SCE, donde se aprecia el comportamiento espacio-temporal de la playa de es Trenc a partir de sus zonas de erosión y/o acreción sedimentaria.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

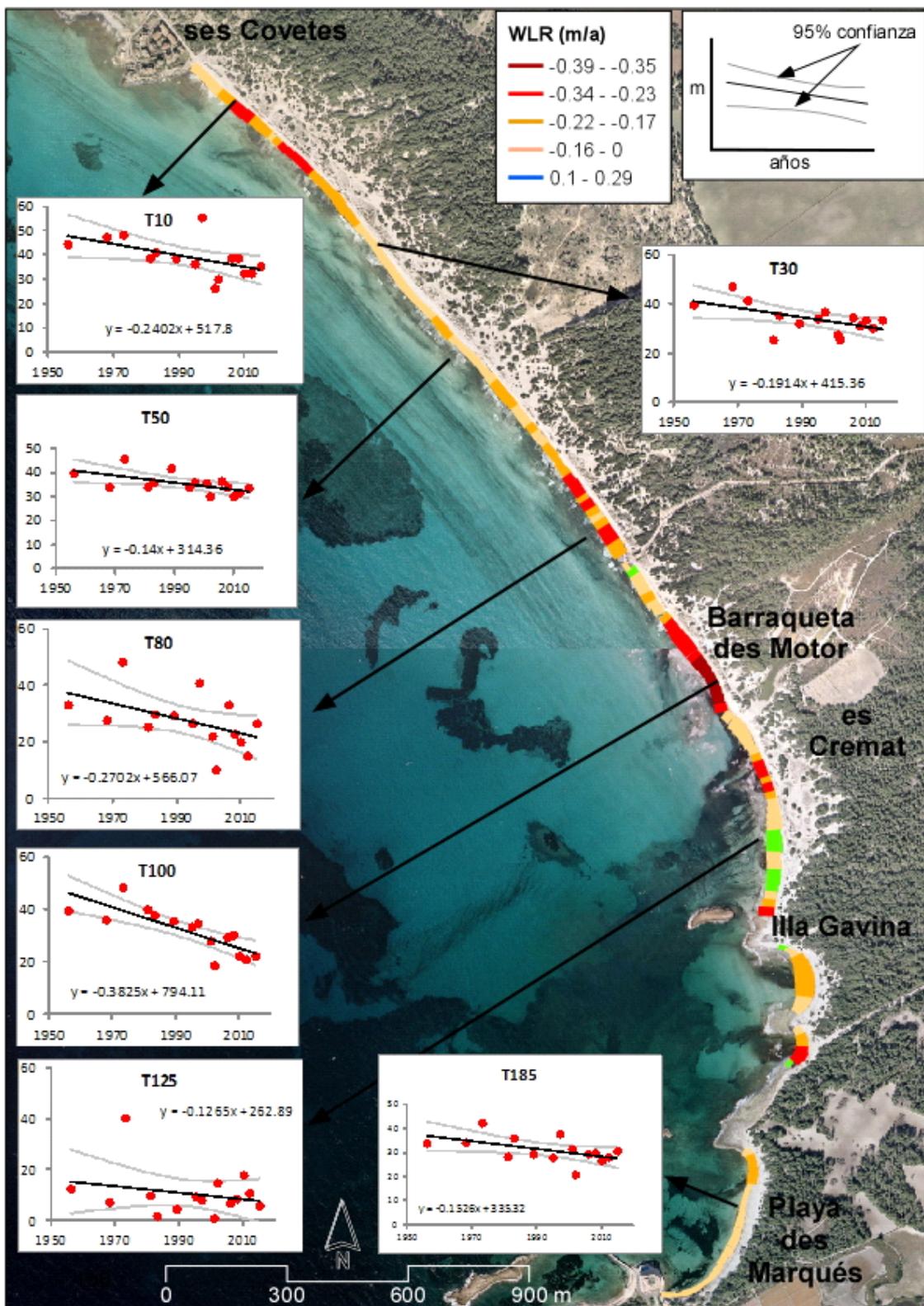


Figura 5. Análisis de la evolución de la línea de costa a través de la recta de regresión (LRR) y recta de regresión ponderada (WLR).

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

Para todo el periodo analizado, el EPR muestra un valor medio de -0.1 m/a y con el 75 % de los valores negativos, con tasas que oscilan entre -0.31 y 0.25 m/a (figura 4). En cuanto a los valores de SCE, la media es de 25.57 m, donde el 50 % de los valores oscila entre los 21 y 29 m, con un valor máximo de 49.3 m. Para el NSM, la media por es de -5.72 m, donde más del 75 % de todos los valores son erosivos, con un rango que oscila entre los 15.6 y los -18.9 m.

En general, se puede apreciar un retroceso que se extiende a lo largo de toda la línea de costa, desde ses Covetes en su extremo NE hasta la Colònia de Sant Jordi, situado en el extremo S de la playa (figuras 4 y 5).

4.1 Análisis por sub-periodos

Para el análisis por sub-periodos, se ha elegido el EPR como parámetro estadístico para comparar periodos de diferentes duración (García y Cáceres, 2012). La elección de estos sub-periodos obedece a varios aspectos, como son el escaso impacto antrópico en el primer periodo (1956-1973); el inicio de la actividad turística con la instalación de varios elementos como chiringuitos y parkings para el segundo (1973-1989); la máxima presión turística para el tercero (1989-2008) y finalmente ante la degradación del sistema playa-duna, el de un intento de recuperación del sistema para el último periodo (2008-2015).

El primer periodo podemos considerarlo como pre-turístico, donde la incidencia de usuarios es prácticamente nula y la principal actividad que se realiza es la retirada puntual de posidonia depositada en la playa con finalidades agrarias. En la figura 6, se puede apreciar como en el diagrama predomina la acreción, con un valor medio de 0.4 m/a y donde el 25 % de los transectos son negativos.

En el sub-periodo 1973 y 1989 es cuando tienen lugar los procesos erosivos más importantes de la playa a lo largo de todo el estudio, con una media de erosiva -0.75 m/a (figura 6). Es a lo largo de estos años cuando comienzan a desarrollarse las actividades económicas ligadas al ocio, con la instalación de los cuatro chiringuitos, además del restaurante situado junto a es Trenc y su parking correspondiente. Ante la falta de espacio, también se habilita un parking provisional en el mismo "trenc", siguiendo el camino hasta la playa. El diagrama de la figura 6, pone de manifiesto los procesos erosivos de este sub-periodo, donde el valor de la mediana es -0.63 m/a y la moda es de -0.75 m/a. También se aprecia como más del 75 % de los transectos son negativos. Así, es durante estos años cuando tiene lugar la desestabilización del sistema playa-duna, debido a la demanda masiva de usuarios y cuando se inicia la apertura de numerosos caminos para abastecer los diferentes establecimientos a lo largo de la playa y facilitar la limpieza de la misma.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

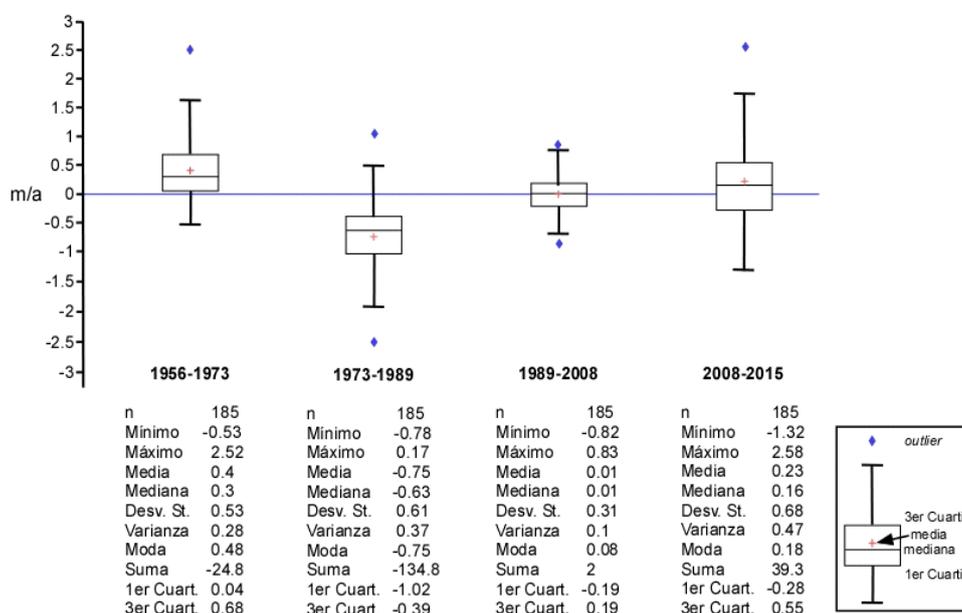


Figura 6. Representación gráfica y estadística de la variable EPR analizada por sub-períodos.

A lo largo del sub-periodo 1989-2008 tiene lugar una cierta recuperación en tanto a los valores, con una media de 0.01 m/a. Parece que hay una ralentización de los procesos erosivos, como se aprecia en la figura 6, donde hay una distribución normal de los valores. Es en este periodo, concretamente a partir de 1995, cuando se crea el parking de es Cremat, el de mayor capacidad de vehículos y que ocupa una superficie de 17.000 m².

El último sub-periodo comprende desde 2008 a 2015. En el año 2008 se llevó a cabo un intento de restauración del sistema dunar, con el cerramiento de varios sectores de playa y la instalación de cordones disuasorios en la *foredune*. Posteriormente, en el año 2009, se instalaron barreras de interferencia eólica con la finalidad de retener sedimento. El resultado parece positivo, ya que la media tiene un valor de 0.23 m/a (figura 6). Sin embargo, el resultado de esta intervención podría haber sido más positiva, ya que las actuaciones fueron hechos puntuales y sin continuidad temporal, con falta de seguimiento y reparación de algunos elementos afectados, sobre todo las barreras de interferencia eólica, que sí fueron efectivas allí donde no habían sido arrancadas o degradadas.

5. Discusión: causas

5.1 La retirada de *Posidonia oceanica*

Entre las causas que han favorecido los procesos erosivos en la playa de es Trenc está la retirada sistemática de las acumulaciones de bermas de *Posidonia oceanica* con maquinaria, al ser consideradas suciedad y una molestia para los usuarios (figura 7). Esta retirada se realizaba principalmente al inicio de la temporada turística y es continuada lo largo de la misma. Extendida por todo el archipiélago, esta práctica constituye un output de sedimento importante. Así, por ejemplo, se han estimado volúmenes de retirada entre 2.100 y 22.500 m³ de *banquettes* para las islas de Menorca y Formentera respectivamente, a lo largo de los años 2003 y 2004 (Roig-Munar y Martín, 2010).

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>



Figura 7. Retirada de hojas de *Posidonia oceanica* depositadas sobre la playa.

Estas prácticas se realizan sin criterios técnicos, esto es, de minimización de impactos, ni frecuencia en su recogida, por lo que se eliminan anualmente cientos de metros cúbicos de sedimento que se encuentra incorporado en las *banquettes* (Roig y Martín, 2005; Simeone 2008, Simeone y De Falco 2008), alterando negativamente el balance sedimentario (figura 8).

En la isla de Mallorca, Asensi y Servera (2004) cuantificaron el contenido de arena del 23 % en un acopio situado en la parte posterior de la playa en la Bahía de Alcudia. Con posterioridad, Roig-Munar *et al.* (2011) analizan diferentes acopios de *Posidonia oceánica* en la isla de Ibiza. Los resultados presentan una media de 59.3 % de sedimento con respecto al total de la muestra y una media de 478 kg/m³.



Figura 8. Acopio de *Posidonia oceanica* depositada en la parte interna del sistema dunar (el color más claro corresponde a arena).

Dado que el proceso de extracción de la *banquette* de la playa es similar al estudio realizado en Alcudia e Ibiza, dichos resultados se podrían extrapolar a es Trenc. Puesto que este tipo de gestión se realiza desde hace décadas, cabe considerar que el volumen de sedimento extraído de la playa ha sido considerable (figura 8), ya que no retornaba jamás al sistema, pudiéndose considerar un output anual que repercutía en un balance sedimentario negativo (Roig *et al.*, 2012).

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

Además, en el proceso de retirada, el efecto de la maquinaria puede tener consecuencias negativas sobre la playa tales como la modificación del perfil o la compactación de la arena. Esta compactación cambia la rugosidad natural y elimina geomorfologías efímeras de playa, acrecentando el ángulo de incidencia del viento, favoreciendo la entrada de oleaje e incrementando los procesos erosivos (Bouderesque y Meinesz, 1982; Brown y McLachlan, 1990; Simeone, 2008). La eliminación de morfologías como la berma, puede alterar los procesos de *run-up* sobre la playa, aumentando su fragilidad en el caso de temporales, etc. (Jeudy de Grissac, 1984; De Falco *et al.*, 2002; Duarte, 2004; Roig y Martín, 2005). En la parte alta de la playa seca, la limpieza mecanizada modifica su perfil, elimina morfologías efímeras y plantones vegetales, reactiva procesos de dinámica eólica y descalza el pie de talud de las dunas, con la consiguiente eliminación vegetal, facilitando los procesos erosivos (Roig, 2004).

5.2 El impacto de equipamientos y usuarios.

Los sectores de la playa con mayor afluencia de usuarios coinciden con las zonas próximas a los aparcamientos y con los puntos donde se ubican los diferentes servicios de playa como hamacas, chiringuitos y restaurantes (figura 9). Así pues, este escenario confirma el efecto llamada que las diferentes instalaciones y accesos tienen para atraer a los usuarios (Roig-Munar *et al.*, 2012). A modo de ejemplo para cuantificar dicho escenario, en el caso de los aparcamientos, se han contabilizado un total de 1.066 vehículos en día laboral y 2.490 en un día festivo respectivamente en los aparcamientos de ses Covetes y es Cremat (CMAM, 2011).

En conjunto, es un sector que se extiende a lo largo de 500 m ambos lados de la zona conocida como "el Trenc" y que coincide con la zona de mayor afluencia a la playa, debido a la presencia de un chiringuito sobre el sistema dunar y sobre todo a la presencia de dos parkings (figura 1), que ocupan una superficie de 18.800 m² con capacidad para 1.500 vehículos. Es la zona de mayor afluencia de visitantes y la de mayor extensión de hamacas y sombrillas de toda la playa.



Figura 9. Fotografía oblicua mostrando la zona de mayor ocupación de la playa y que coincide con la de mayores tasas de erosión, con la presencia de un restaurante con su parking (1er plano) y el aparcamiento de es Cremat al fondo (Fuente: Teresa Ayuga).

Por lo que respecta al número de usuarios, los primeros datos fueron aportados por Blázquez (1995), con datos recogidos en un día festivo y otro laborable de julio de 1993, con cifras de 7.130 y 3.600 usuarios respectivamente. Posteriormente, Más y Blázquez (2005) presentan datos similares con una afluencia de 3.488 y 7.191 usuarios/día para un día laboral y

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

festivo respectivamente (para el sector comprendido entre ses Covetes y es Peregons). Estas cifras aumentan notablemente cuando años después, se elabora el anteproyecto del Plan de Ordenación de Recursos Naturales de Es Trenc-Salobrar de Campos (CMAM, 2011), aportando datos de 4.784 y 10.439 usuarios/día en día laboral y festivo respectivamente. Esta afluencia de usuarios se explica debido a la influencia de internet en la última década (actualmente con la palabra "es trenc" aparecen 517 mil entradas en Google). Ello ha generado graves problemas de colapso en los accesos a la playa, especialmente los fines de semana, llegando incluso a cerrarlos en el núcleo urbano de ses Covetes por motivos de seguridad (<http://www.elmundo.es/elmundo/2009/08/11/>). Según este rotativo local, [elmundo.es](http://www.elmundo.es), el día 08 de agosto se superaron los 15 mil usuarios en la playa, situación que viene produciéndose desde principios de verano.

La falta de gestión hasta 2008-09 facilitaba el constante pisoteo de la duna delantera por parte de los usuarios, y el uso de éstas áreas como zonas de reposo, dando lugar a importantes procesos erosivos al eliminar la vegetación psamófila (figura 10b), llegando incluso a la desaparición parcial de la misma (Mir-Gual y Pons, 2011; Defeo *et al.*, 2009). A lo largo del sub-periodo comprendido entre 1973 y 1989, con el establecimiento de todos los servicios sobre la playa, es cuando tiene lugar uno de los principales problemas generados por la instalación de chiringuitos; la apertura de caminos en el sistema dunar para abastecerlos por medio de vehículos y limpieza (figura 10a).

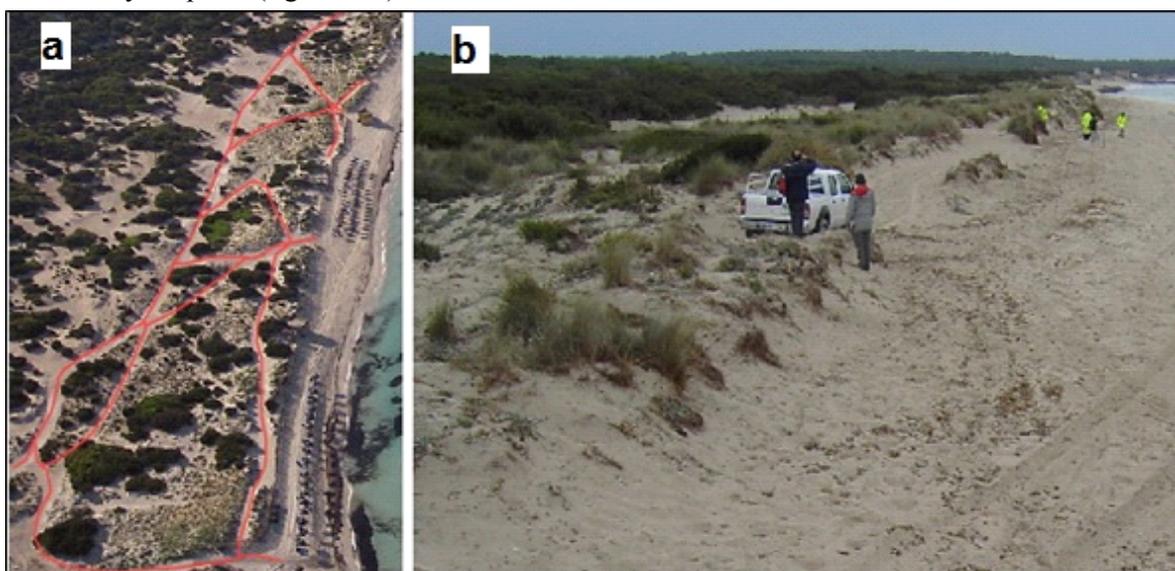


Figura 10. A la izquierda (a) red de caminos sobre la foredune. A la derecha (b), un vehículo sobre la duna para realizar labores de limpieza.

En la figura 11, podemos apreciar la correlación que existe entre la presencia de visitantes y servicios de playa con los sectores más erosivos. De su interpretación queda manifiesto que a mayor número de usuarios, mayores tasas erosivas. En esta figura se muestra el porcentaje de usuarios distribuidos por sectores de 100 m lineales de playa (Govern de les Illes Balears, 2011) y el valor medio de NSM de ese mismo sector. En esta misma figura, también se representa la evolución de la línea de costa a través de la recta de regresión (LRR). La relación entre los sectores de mayor afluencia de visitantes y los erosivos se puede apreciar en la convergencia de las líneas polinómicas de la gráfica y los círculos, que coincide con los sectores más erosivos representados por medio de la recta de regresión. Estos datos validan los aportados en las figuras 4 y 5.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

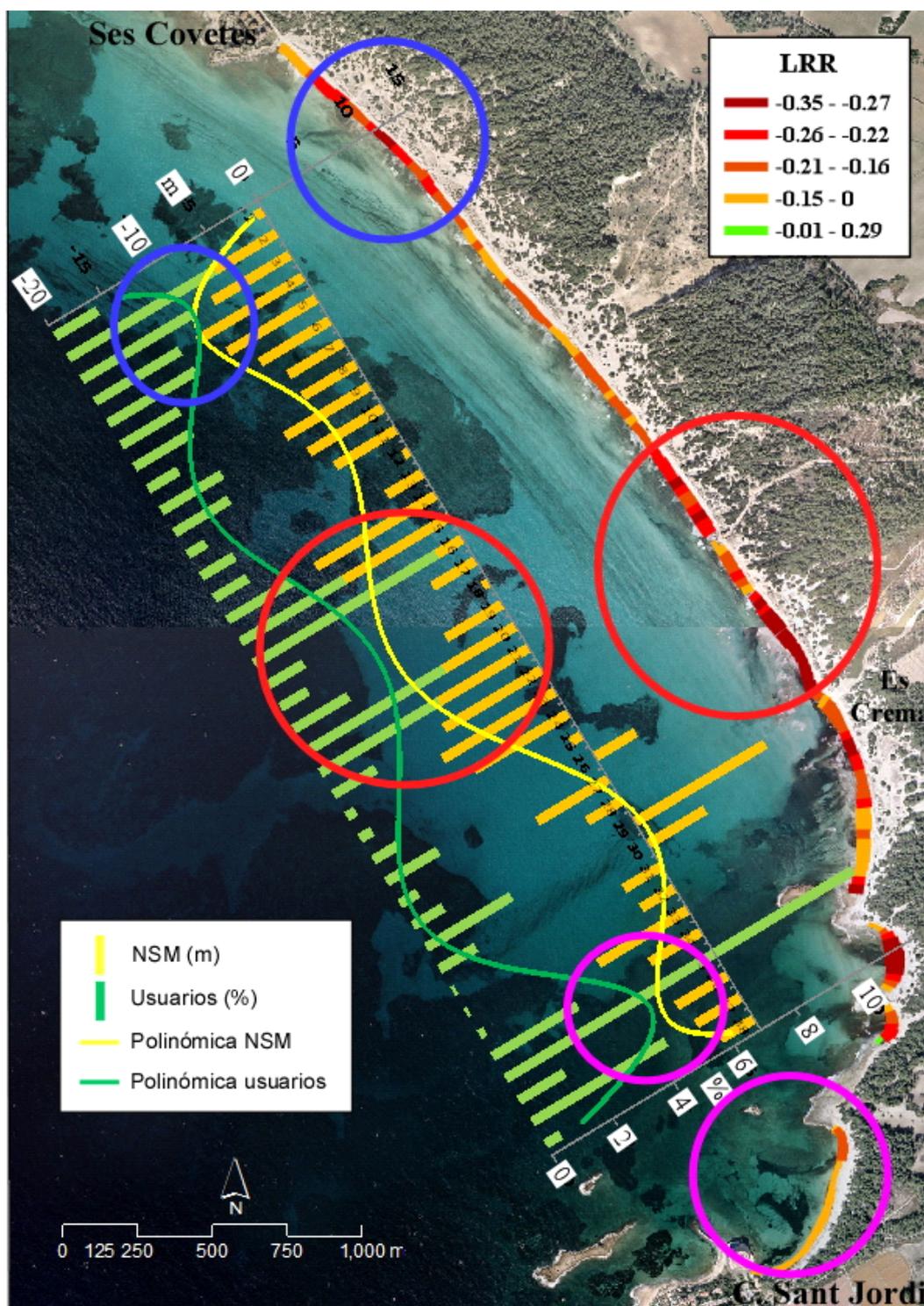


Figura 11. Representación gráfica del porcentaje de usuarios (cada barra representa 100 m lineales de playa) frente a NSM comparada con los resultados de la recta de regresión (LRR) La convergencia de las líneas polinómicas coincide con las mayores tasas de erosión y viceversa. Los círculos representan los mismos sectores de playa.

5.3 La subida del nivel del mar

Una de las consecuencias más evidentes del cambio climático es la subida del nivel del mar. Aunque se considera generalmente como un proceso lento a escala humana tiene una importancia significativa a medio y largo plazo, influenciando la dinámica erosiva de la costa y la alteración en los ecosistemas litorales (Nicholls y Cazenave, 2010). El nivel medio global del mar ha aumentado 19 cm aproximadamente desde 1901 y se ha acelerado a un ritmo de 3,2 cm por década en los últimos 20 años, casi el doble de la tasa de aumento durante el siglo XX (IPCC, 2014). Así mismo, se estima que el nivel del mar ha aumentado a un ritmo del orden de 1.8 ± 0.5 mm por año durante el período 1961-2003 (IPCC, 2007), aunque en el Mediterráneo ese aumento ha sido significativamente inferior: 0.3 ± 0.2 cm por década, algo más de 2 cm durante los últimos 50 años (IMEDEA-UIB-CSIC, 2010), muy inferior a la subida media global de 7.5 cm.

Desde mediados del siglo XX y hasta principios de los años 90 el nivel del mar en el Mediterráneo Occidental parece haber estado dominado por el forzamiento atmosférico expresado por la acción de la presión atmosférica y del viento. Estos agentes produjeron sobre dicho periodo un descenso del nivel del mar, contrario a la tendencia general observada a nivel global (Church, *et al.*, 2001; Tsimplis y Josey, 2001; Gomis *et al.*, 2006; 2008), de forma particular en Mallorca (Vargas *et al.*, 2010). El descenso de la presión atmosférica desde mediados de los años 90 y la aceleración del aumento de las temperaturas en la misma década coinciden con un acusado aumento del nivel del mar de entre 2.5 mm/año y 10 mm/año (Vargas *et al.*, 2010). Las predicciones para el siglo XXI elaboradas por el IPCC (2014), advierten que el nivel medio del mar podría subir entre 26 y 82 cm para 2100. Es una horquilla mayor de la apuntada en el informe de 2007, que abarcaba desde 18 a 59 cm. Por tanto, esta subida tendrá importantes repercusiones en la morfología de la costa. Considerando este escenario, son varios los efectos que puede generar sobre las playas con previsión para el año 2050 (Medina, 2004):

El primero de ellos será el de una variación en la cota de inundación y a un posible retroceso de la línea de costa. Este parámetro, viene determinado por la probabilidad conjunta de la marea astronómica, de la marea meteorológica, del *run-up* en la playa y del posible aumento del nivel medio del mar. Para el Mediterráneo se ha calculado un aumento de aproximadamente 20 cm, inducido principalmente por el aumento del nivel medio del mar (Medina, 2004).

El segundo parámetro que tendrá efecto en las playas es el posible retroceso de la línea de costa. Este puede ser inducido por un aumento en el nivel medio, que hace que el perfil activo de la playa tenga que ascender para llegar al equilibrio dinámico con esta nueva condición de nivel medio. Para ello, es necesario cubrir el déficit de arena que se produce en el perfil activo y este se hará a expensas de la arena de la playa seca y de la berma, produciendo un retroceso de la línea de pleamar. Las playas constituidas por arenas más finas y mayores profundidades de corte, es decir, las más disipativas, serán aquellas que experimenten el mayor retroceso y por tanto, las playas más susceptibles al aumento del nivel medio del mar, entre ellas las situadas en las Islas Baleares, obteniéndose para estas zonas retrocesos del orden de 16 m.

Respecto al número medio de temporales al año (definidos como sucesos independientes que superan el umbral del percentil del 95 % de Hs), los resultados indican que la frecuencia de eventos extremos es mayor en las islas Baleares que en el resto de España. El número medio de temporales en el archipiélago balear ha aumentado en el periodo 1958-2001 una media entre 3 y

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

3.5 por año. Para las variaciones mostradas en la Hs para un periodo de retorno de 50 años, la variación estimada es de aproximadamente 1cm/año (Medina, 2004).

Finalmente, otro parámetro que puede contribuir a un retroceso adicional de las playas es la variación en la dirección del flujo medio de energía. El retroceso máximo esperado para el año 2050, en las playas más susceptibles a este tipo de retroceso corresponde a las playas de las islas Baleares del orden de 15 m aproximadamente (Medina, 2004).

6. Conclusiones

La evolución histórica de la posición de la línea de costa es importante para poder evaluar los efectos espaciales de la dinámica litoral. La utilización de una herramienta denominada *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*, dentro del marco de un SIG, permite el cálculo estadístico a partir de múltiples posiciones de la línea de costa a lo largo del tiempo.

Los parámetros estadísticos utilizados (EPR, NSM, SCE, LRR y WLR), han permitido conocer el comportamiento histórico de la línea de costa en la playa de es Trenc (Sur de Mallorca), que para este caso de estudio, se ha analizado desde 1956 hasta 2015, con un total de nueve ortofotos y seis fotografías aéreas verticales georreferenciadas.

En general, la línea de costa presenta un retroceso que se extiende a lo largo de toda la playa, desde ses Covetes en su extremo noroccidental hasta la Colònia de Sant Jordi, situado en el extremo sur de la playa. Tan solo hay pequeños sectores de acreción sedimentaria. El más importante se localiza en el centro de la playa, comprendido entre los transectos 58 y 61. Éste es el que presenta la menor variabilidad de toda la playa, con los valores más bajos de SCE y por tanto se presume como el más estable.

Por lo que respecta a la erosión, las mayores tasas corresponden al sector situado en la proximidad del parking de es Cremat, con valores máximos de WLR 0.38 m/a y -18.9 m lineales de retroceso (figura 5). Los valores de NSN, son también los más elevados, con una media de -11.88 m. Asimismo, constituye el sector donde los valores de SCE son los más altos (con un rango entre 31 y 40 m), mostrando una elevada variabilidad con respecto al resto de la playa. En conjunto, es un sector que se extiende a lo largo de 500 m a ambos lados de la zona conocida como "es Trenc" y que coincide con la zona de mayor afluencia a la playa, debido a la presencia de un restaurante y sobre todo a la presencia de dos parkings, con capacidad para 1.500 vehículos. Es la zona de mayor afluencia de visitantes y la de mayor extensión de hamacas y sombrillas de toda la playa.

Otro sector erosivo importante se sitúa en otro de los accesos a la playa, el situado en ses Covetes, donde además del parking en su centro urbano, hay otro que ocupa una capacidad para 1.200 vehículos. El retroceso máximo es de -12.22 m, con una tasa de -0.24 m/a (figura 5). Constituye una zona de tránsito importante de usuarios hacia la playa y presenta una variabilidad media con respecto al conjunto, con un rango de SCE entre 20 y 30 m.

Un tercer sector erosivo se sitúa hacia el norte de la Barraqueta des Motor, con retroceso máximo de la línea de costa de -14.83 m y valores medios de -10.88m, con una tasa de -0.27 m/a. Al igual que el sector antes mencionado, constituye una zona de tránsito de usuarios procedentes del parking, donde además encontramos un restaurante-chiringuito, que pone de manifiesto su elevada variabilidad, con valores que de SCE que oscilan entre 30 y 40 m.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

Entre los dos sectores anteriores, hay un tercero de unos 600 m de longitud, que presenta valores más moderados de retroceso de playa, que en el T50 son de -0.14 m/a con un valor máximo entre -8.6 m y una media de -6 m.

Finalmente, la Playa des Marqués, situada junto al núcleo urbano de la Colònia de Sant Jordi presenta valores moderados de erosión, con un retroceso máximo de -9.7 m en su extremo norte y -0.15 m/a. Presenta la menor variabilidad de toda la playa, con valores entre 10 y 20 m.

Durante el periodo comprendido entre 1956 y 1973 hay procesos de acreción sedimentaria a lo largo de toda la playa. Los procesos erosivos se acentuaron de manera importante en el periodo comprendido entre 1973 y 1989. A lo largo del mismo se instalaron todos los servicios de playa (chiringuitos y restaurantes), así como los aparcamientos. Posteriormente, en el periodo 1989-2008, tiene lugar una recuperación en la superficie de playa, para finalmente en el último periodo aumentar los procesos acrecionarios, coincidiendo con la instalación de barreras de interferencia eólica y cordones disuasorios.

Para todo el periodo analizado, el EPR muestra un valor medio de -0.1 m/a y el 75 % de los valores son negativos, que oscilan entre -0.31 y 0.25 m/a (figura 8). En cuanto a los valores de SCE, la media es de 25.57 m, donde el 50 % de los valores oscila entre los 21 y 29 m, con un valor máximo de 49.3 m. Para el NSM, la media es de -5.72 m, donde más del 75 % de todos los valores son erosivos, con un rango que oscila entre los 15.6 y los -18.9 m.

Las causas que han facilitado los procesos erosivos son fundamentalmente antrópicas. Entre ellas destaca la retirada masiva de hojas de *Posidonia oceanica* depositadas sobre la playa con maquinaria pesada cada año. En esta operación, se retiran toneladas de sedimento fuera del sistema (suelen depositarse en la parte posterior de la playa o sobre el sistema dunar), que no retornan al mismo, constituyendo un importante output.

Otra causa de índole similar es el creciente número de usuarios a lo largo de las últimas décadas. La falta de gestión ha facilitado que los usuarios transiten por todo el sistema dunar, especialmente sobre la *foredune*. Este proceso facilita el pisoteo de la misma, eliminando la vegetación psamófila, acelerando los procesos erosivos.

Finalmente, también atribuible a la actividad humana, es la apertura de numerosos caminos por vehículos, para acceder a los diferentes chiringuitos distribuidos a lo largo de la playa, con lo cual se acentúan los procesos erosivos.

Agradecimientos

La edición de este artículo ha sido posible gracias a la ayuda del proyecto "Crisis y reestructuración de los espacios turísticos del litoral español" (CS02015-64468-P) del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

Referencias bibliográficas

Albertí, J. B. (1998): *La defensa de Mallorca, Ibiza y Formentera durante la II Guerra Mundial*. Palma, Inédito.

Arias, C. E. (2003): *Spatio-temporal analysis of Texas shoreline changes using GIS technics*. PhD Thesis, Texas A&M University.

Asensí, M y Servera, J., (2004): "Aproximació a la quantificació de la pèrdua de sediment de platja amb la retirada mecànica de les bermes vegetals de *Posidonia oceanica*". *IV Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Ponències i Resums*. Palma, Societat d'Història Natural de les Illes Balears, pp. 88-92.

Balaguer, P., Vallesir, J., Vizoso, G., Ruíz, M., Cañellas, B. y Tintoré, J. (2007): *Atlas de Sensibilitat del Litoral de les Illes Balears*. Palma, Conselleria d'Interior. Govern de les Illes Balears. Palma.

Blázquez, M. (1995): "La platja d'es Trenc, un exemple d'espai natural protegit sotmès a forta pressió recreativa informal, amb superació dels llindars de capacitat de càrrega ecològica i recreativa". En Salvà, P., Sastre, F. y Aguiló, E. (Eds.) *XIII Jornades d'Estudis Històrics Locals: El desenvolupament turístic a la Mediterrània durant el segle XX*. Palma, Institut d'Estudis Balearics, pp. 117-126.

Boak, E. y Turner, I. L. (2005): "Shoreline definition and detection: a review". *J. Coastal Research*, 21, 4, pp. 688-703.

Boudouresque, C. F. y Meinesz, A. (1982): *Découverte de l'herbier de posidonie*. Parc National de Port-Cros, Hyères.

Cancemi, G. y Buron, K., (2008): *Érosion du littoral et suivi des banquettes de Posidonie sur les plages de Corse*. DIREN Corse/E.V.E.Mar.

Cañellas, B. (2010): *Long-term extreme wave height event in the Balearic Sea: characterization, variability and prediction*. PhD Thesis, Universitat de les Illes Balears.

Catalao J., Catita C., Miranda J. y Dias J. A. (2002): "Photogrammetric analysis of coastal erosion in the Algarve (Portugal)". *Geomorphologie* 2, pp. 119-126.

Church J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D. and Woodworth, P.L. (2001): "Changes in Sea Level", en Houghton, A. and Ding, B (Eds.): *Climate Change 2001 The Scientific Basis*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, pp. 639-693.

CINESI (2008): *Pla de mobilitat sostenible de Es Trenc-Salobrar de Campos*. Conselleria de Medi Ambient. Direcció General de Biodiversitat. Inédito

CMAM (Conselleria de Medi Ambient i Mobilitat) (2011): *Avantprojecte del Pla d'Ordenació dels Recursos Naturals Es Trenc-Salobrar de Campos*. Direcció General de Biodiversitat, Govern de les Illes Balears. Palma.

Costa Balear Sostenible. <http://www.costabalearsostenible.com>

Cowart, L., Walsh, J. P. y Corbett, D. R. (2010): "Analyzing Estuarine Shoreline Change: A Case Study of Cedar Island, North Carolina". *J. Coastal Research* 265, pp. 817-830.

Coyne, M.A., Fletcher, C. H. y Richmond, B. M. (1999): "Mapping coastal erosion hazards in Hawaii: observations and errors". *J. Coastal Research* SI 28, pp. 171-184.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

- Crowell, M., Leatherman, S. P. y Buckley M. K. (1991): "Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy". *J. Coastal Research*, 7, pp. 839-852.
- Del Río, L. y Gracia, F. J. (2013): "Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes". *Nat. Hazards* 65, pp. 2385-2397.
- Dolan, R., Fenster, M. S. y Olmes, J. (1991): "Temporal analysis of shoreline recession and accretion". *J. Coastal Research* 7, 3, pp. 723-744.
- Dolan, R., Hayden, B. P., May, P., y May, S. K. (1980): "The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs". *Shore and Beach* 48 (4), pp. 22-29.
- Douglas, B. C. y Crowell, M. (2000): "Long-term shoreline position prediction and error propagation". *J. Coastal Research*, 16, pp. 145-152.
- Duarte, C. M. (2004): "How can beaches be managed with respect to seagrass litter?". En J. Borum, CM Duarte, D Krause-Jensen and TM Greve (eds.). *European seagrasses: an introduction to monitoring and management*, pp. 83-85. The M&MS Project. Disponible en <http://www.seagrasses.org>
- Elginöz, N., Kabdaslit, M. S. y Tanik, A. (2011): "Effects of *Posidonia Oceanica* Seagrass Meadows on Storm Waves". *J. Coastal Research* SI 64, pp. 373-377.
- Elliot, I. y Clarke, D. (1989): "Temporal and spatial bias in the estimation of shoreline rate-of-change statistics from beach survey information". *Coastal Management*, 17, pp. 129-156.
- Fletcher, C., Rooney, J., Barbee, M., Lim, S. y Richmond, B. M. (2003): "Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii". *J. Coastal Research* SI 38, pp. 106-124.
- García, D. y Cáceres, L. M. (2012): Análisis de la evolución de la flecha litoral del rompido entre 1956 y 2009 mediante *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*". En Verón *et al.*, (Eds.), *VI Congreso Iberoamericano de Gestión Integrada de Áreas Litorales*, Cádiz, Universidad de Cádiz, pp. 646-656.
- Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N. y Rooney, J. (2007): "The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii". *J. Coastal Research*, 23 (1), pp. 87-105.
- Govern de les Illes Balears. (2011): *Pla d'Ordenació dels Recursos Naturals Es Trenc-Salobrar de Campos*. Palma, Conselleria de Medi Ambient i Mobilitat, Direcció General de Biodiversitat.
- Govern de les Illes Balears. Conselleria de Agricultura, Medi Ambient i Territori. Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears (IDEIB). www.ideib.cat.
- Gómez, L., Orfila, A., Cañellas, B., Álvarez, A., Méndez, F. J., Medina, R. y Tintoré, J. (2007): "Morphodynamic classification of sandy beaches in low energetic marine environment". *M. Geology*, 242, pp. 235-246.
- Gomis, D., M.N. Tsimplis, B. Martín- Mínguez, A.W. Ratsimandresy, J. García- Lafuente, S.A. Josey (2006): "Mediterranean sea level and barotropic flow through the Strait of Gibraltar for the period 1958-2001 and reconstructed since 1659". *J. Geophys. Res.*, 111, C11005.
- Gomis, D., S. Ruiz, M. G. Sotillo, E. Álvarez-Fanjul, J. Terradas (2008): "Low frequency Mediterranean sea level variability: the contribution of atmospheric pressure and wind". *Global and Planetary Change*, 63 (2-3), pp. 215-229.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): “Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

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, pp. 1-16.

IMEDEA-UIB-CSIC. (2010): *Estrategia 2. Afrontar el cambio global y preservar los sistemas naturales terrestres y marítimos*. Palma, Consorcio de la Playa de Palma.

Infantes, E., Terrados, J., Orfila, A., Cañellas, B. y Álvarez, A. (2009): “Wave energy and upper depth limit distribution of *Posidonia oceanica*”. *Botanica Marina*, 52, pp. 419-427.

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. En R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva, IPCC.

Jaume, C. y Fornós, J. J. (1992): “Composició i textura dels sediments de les platges del litoral mallorquí”. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 35, pp. 93-110.

Jeudy de Grissac, A. (1984): “Effets des herbiers `a *Posidonia* océánica sur la dynamique marine et la s`edimentologie littorale”. In: Boudouresque, C.F.; Jeudy de Grissac, A., and Olivier, J. (eds.), *International Workshop on Posidonia oceanica Beds*, Volume 1. GIS Posidonie, pp. 437-443.

Kumar A. y Jayappa, K. S. (2009): “Long and short-term shoreline changes along Mangalore Coast, India”. *Int. J. Environ. Research*, 3, pp. 177-188.

Manca, E., Cáceres, I., Alsina, J.M., Stratigaki, V., Townend, I. y Amos, C.L. (2012): “Wave energy and wave-induced flow reduction by full-scale model *Posidonia oceanica* seagrass”. *Continent. Shelf Research*, 50-51, pp. 100-116.

Martín, J. A., Roig, F. X., Rodríguez, A. y Pons, G. X. (2010): “Evolució de la línia de costa de la platja de es Trenc”. En J. Mayol, Ll. Muntaner y O. Rullán, (Eds.), *Homenatge a Bartomeu Barceló Pons, Geògraf*. Palma, Ed. Lleonard Muntaner, pp. 423-440.

Más, L y Blázquez, M. (2005): “Anàlisi de la freqüentació d`ús a les platges i estudi de paràmetres de sostenibilitat associats”. *Doc. Anál. Geogr*, 45, pp. 15-40.

Medina, R. (2004): *Impactos en la costa española por efecto del cambio climático*. Madrid Universidad de Cantabria-GIOC.

Mir-Gual, M. y Pons, G. X. (2011): “Coast sandy strip fragmentation of a protected zone in the N of Mallorca, Spain (Western Mediterranean)”. *Journal of Coastal Research* SI 64, pp. 1367-1971.

Moore, L.J. (2000): “Shoreline mapping techniques”. *J. Coastal Research*, 16 (1), pp. 111-124

Morton, R. A., Miller, T. A. y Moore, L. J. (2004): *National assessment of shoreline change: Part 1. Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the US Gulf of Mexico*. USGS OFR, 2004-1043. Disponible en <http://coastal.er.usgs.gov/shoreline-change>

Nicholls, R. J. y Cazenave, A. (2010): “Sea-level rise and its impacts on coastal zones”. *Science* 328, 5985, pp. 1517-1520. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185782>.

Nordstrom KF. (2000): *Beaches and Dunes of Developed Coasts*. Cambridge, Cambridge University Press.

Ojeda, J. (2000): “Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuestas”. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, pp. 103-119.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

Pajak, M. J. y Leatherman, S. P. (2002): "The high water line as shoreline indicator". *J. Coastal Research*, 18 (2), 329-337.

Pérez, A., Pires, A., Freitas, L., Rodrigues, C. y Chaminé, H. I. (2011): "GIS mapping and shoreline change analysis along the rocky coast of Galicia (NW Spain): preliminary approach". In Institution of Civil Engineers, Book of Abstracts, *7th Conference on Coastal Management, Innovative Coastal Zone Management: Sustainable Engineering for a Dynamic Coast*, Belfast. London, ICE Publishing, pp. 262-263.

Puertos del Estado: <http://www.puertos.es>

Ratsimandresy, A. W., Sotillo, M. G., Carretero, J. C, Alvarez, E. y Hajji. H. (2008): "A 44-year high-resolution ocean and atmospheric hindcast for the Mediterranean Basin Developer within the HIPOCAS Project". *Coast. Eng.*, 55, pp. 825-826.

Roig-Munar, F. X. (2004): "Análisis y consecuencias de la modificación artificial del perfil playa-duna provocado por el efecto mecánico de su limpieza". *Investigaciones Geográficas*, 33, pp. 87-103.

Roig-Munar, F. X. (2010): *Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears*. Tesis Doctoral. Dept. Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears.

Roig-Munar, F. X. y Martín, J. A. (2005): "Efectos de la retirada de bermas vegetales de *Posidonia oceanica* sobre playas de las islas Baleares: consecuencias de la presión turística". *Investigaciones geográficas de México*, 57, pp. 39-52.

Roig-Munar, F. X., Martín, J. A., Mir, M., Pons, G. X. y Rodríguez, A. (2011): "Balance sedimentario negativo por la retirada de *Posidonia oceanica* de las playas de Ibiza (Islas Baleares)". En Montoya, I., Rodríguez, I. y Sánchez, M. J. (eds.), *Avances en Geomorfología Litoral. Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral*. Tarragona, pp. 79-83.

Roig-Munar, F.X.; Martín, J.A.; Rodríguez, A.; Pons, G.X.; Gelabert, B., and Mir, M. (2012): "Risk assessment of beach-dune system erosion: beach management impacts on the Balearic Islands". *Journal of Coastal Research*, 28 (6), pp. 1488-1499.

Rosselló, V. M. (1969): "El litoral de es Trenc (S. de Mallorca)". *Anales de la Universidad de Murcia* XXVII, 1-2, 223-246.

Ruggiero, P., Kratzmann, M. G., Himmelstoss, E. A., Reid, A., Allan, J. y Kaminsky, G. (2012): *National Assessment of Shoreline Change: Historical Shoreline Change Along the Pacific Northwest Coast*. Open File Report 2012-1007. US Geological Survey. Disponible en <http://coastal.er.usgs.gov/shoreline-change/>

Sánchez, J. F., Sánchez, V. y Memos, C. D. (2011): "Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows". *Journal of Hydraulic Research*, 49, pp. 503-514.

Servera, J. y Martín, J. A. (1996): "Análisis y causas del retroceso de la línea de costa en s'Arenal de sa Ràpita (Mallorca)". En A. Grandal, y J. Pagés (Eds.), *IV Reunión de Geomorfología, O Castro (A Coruña)*. A Coruña, Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, 21, pp. 877-890.

Shoshany, M., Golik, A., Degani, A., Lavee, H. y Gvirtzman, G. (1996): "New evidence for sand transport direction along the coastline of Israel". *J. Coastal Research*, 12 (1), pp. 311-325.

Simeone S. (2008): *Posidonia oceanica banquettes removal: sedimentological, geomorphological and ecological implications*. PhD. Thesis, Università degli Studi di Viterbo.

Martín Prieto, J. Á., Roig Munar, F. X., Rodríguez Perea, A., Pons Buades, G. X., Mir Gual, M., y Gelabert Ferrer, B. (2018): "Análisis de la evolución histórica de la línea de costa de la playa de es Trenc (S. de Mallorca): causas y consecuencias", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 187-214. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.544>

Stratigaki, V., Manca, E., Prinos, P., Losada, I. J., Lara, J. L., Sclavo, M., y Sánchez-Arcilla, A. (2011): "Large-scale experiments on wave propagation over *Posidonia oceanica*". *J. Hydraul. Research*, 49, pp. 31-43.

Terrados, J. y Duarte, C. M. (2000): "Experimental evidence of reduced particle resuspension within a seagrass (*Posidonia oceanica* L.) meadow". *J. Experim. Marine Biology and Ecology*, 243, pp. 45-53.

Thieler E. R. y Danforth W. W. (1994): "Historical shoreline mapping (1): improving techniques and reducing positioning errors". *J. Coastal Research*, 10 (3), pp. 549-563.

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.

Tsimplis, M.N. y S.A. Josey (2001): "Forcing of the Mediterranean Sea by atmospheric oscillations over the North Atlantic". *Geophys. Res. Lett.*, 28 (5), pp. 803-806.

Vargas, M., García. M. C., Moya, F., Tel, E., Parrilla, G., Plaza, F., Lavín, A. y García, J. (2010): *Cambio climático en el Mediterráneo español*. Instituto Español de Oceanografía. Madrid, Ministerio de Ciencia e Innovación, 2ª Edición.

Vicens, D., Morey, B. y Pons, G.X. (2006): "El Pleistocè superior marí de la badia de Campos (Sa Ràpita - Es Trenc, Mallorca, Mediterrània occidental)". *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 49, pp. 123-136.

Virdis, S., Oggiano, G. y Disperati, L. (2012): "A Geomatics Approach to Multitemporal Shoreline Analysis in Western Mediterranean The Case of Platamona-Maritza Beach (Northwest Sardinia, Italy)". *J. Coastal Research*, 28 (3), pp. 624-640.

Wright, L.D. y Short, A.D. (1983): "Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia". En P. D. Komar (Ed.), *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Florida, CRC Press, pp. 35-64.