

Análisis de la evolución del complejo dunar Salinas–El Espartal mediante el empleo de ortofotografía, DSAS y LIDAR (1957–2021)

Analysis of the evolution of the Salinas – El Espartal dune complex using orthophotography, DSAS and LIDAR (1957–2021)

Víctor Manuel Fernández-Pacheco ^{a1*}, Andone Amezcua-García ^{a2}, Eduardo Álvarez-Álvarez ^{a3}

^aÁrea de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oviedo, Calle Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, Mieres, España.

E-mail: ^{a1}fernandezpvictor@uniovi.es, ^{a2}andone.amz@gmail.com, ^{a3}edualvarez@uniovi.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 10/06/2023

Aceptado: 12/07/2023

Publicado: 31/07/2023

Citar como: Fernández-Pacheco, V.M., Amezcua-García, A., Álvarez-Álvarez, E. 2023. Analysis of the evolution of the Salinas – El Espartal dune complex using orthophotography, DSAS and LIDAR (1957–2021). *Ingeniería del agua*, 27(3), 223-235. <https://doi.org/10.4995/la.2023.20021>

RESUMEN

Los sistemas dunares son ecosistemas multifuncionales de gran importancia para el equilibrio ecológico y la biodiversidad. Se trata de sistemas dinámicos y frágiles de especial protección, por lo que será fundamental conocer su evolución a lo largo del tiempo. Debido a la escasez de datos históricos, la mayoría de los trabajos se basan en el empleo de fotografía aérea, estableciendo comparativas entre las imágenes disponibles. En los últimos años, el empleo de datos provenientes de vuelos LIDAR ha permitido definir con mayor precisión las unidades morfológicas y determinar los avances de los frentes dunares. Combinando ambas fuentes de datos mediante el empleo de técnicas GIS y el software DSAS ya se han mejorado los resultados de la evolución de los campos dunares en otras costas de España. El estudio se realiza sobre el complejo dunar Salinas-El Espartal (Asturias). Se han descargado todos los datos disponibles de fuentes libres, incluyendo fotografía aérea, ortofotografía y el LIDAR de los años 2014 y 2020. Los resultados de este estudio ponen de manifiesto el deterioro del sistema dunar ya que el 60% de la superficie natural original se ha antropizado.

Palabras clave | dunas, GIS, LIDAR, ortofotografía, costas.

ABSTRACT

Dune systems are important multifunctional ecosystems for ecological balance and biodiversity. They are dynamic and fragile systems which require special protection, so it is essential to know how they have evolved over time. Most of the studies are based on making comparison between aerial photography due to the limited historical data available. In recent years, the use of data from LIDAR flights has made it possible to define the morphological units with greater precision and to determine the progress of the dune lines. Combining both sources of data using GIS techniques and DSAS software has already improved the results of the evolution of dune fields on other coasts of Spain. The study was carried out on the Salinas-El Espartal dune complex (Asturias). All available data from free sources have been downloaded, including aerial photography from 1957, orthophotography and LIDAR for the years 2014 and 2020. The results of this study show the degradation of the dune system, as 60% of the original natural area has been anthropized.

Key words | dunes, GIS, LIDAR, orthophotography, coastal.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas dunares son ecosistemas multifuncionales de gran importancia que resultan fundamentales para el equilibrio ecológico y la biodiversidad. En las dunas costeras se da una estrecha interrelación entre arena, viento y vegetación teniendo una importante función de protección y conservación de los frentes costeros. Sin embargo, se trata de ecosistemas que se caracterizan por su constante dinamismo y fragilidad (MITECO, 2018). La mayor amenaza para su supervivencia son la sobreexplotación, la expansión urbana, la minería, la contaminación y el turismo (Martínez *et al.*, 2008).

Las dunas son entornos protegidos por la ley de costas 2/2013 (BOE, 2013) cuyo carácter dinámico hace necesario el estudio de su evolución a lo largo de los años. El objetivo es establecer su grado de conservación de cara a plantear actuaciones que mantengan su protección. En este contexto, en los últimos años se han realizado diversos estudios en España para conocer la evolución de diferentes ecosistemas dunares.

Los estudios más sencillos se basan en el análisis multiparamétrico de diferentes periodos de tiempo como el realizado en los sistemas playa-duna de la Costa Brava (Girona) entre los años 1956 y 2012 (Roig-Munar *et al.*, 2013). En Cataluña también se ha estudiado en detalle la evolución del Delta del Ebro mediante trabajos basados en el empleo de GPS y LIDAR sobre el terreno, con el objetivo de reconstruir la evolución de la superficie y la variación del volumen dunar entre los años 2004 y 2012 (Rodríguez-Santalla *et al.*, 2021). En Asturias, destaca el complejo dunar Salinas-El Espartal ya que en su tiempo fue el más extenso de Asturias y uno de los mayores del Cantábrico. Sobre este ecosistema se han realizado diferentes estudios basados en el empleo de ortofotografía y mediciones de campo que han permitido analizar su evolución entre mediados del siglo xx y 2012 (López-Peláez y Flor-Rodríguez, 2008; Flor-Blanco *et al.*, 2013; Flores-Soriano, 2015). De estos estudios se desprende que los cambios constatados en el sistema dunar se deben fundamentalmente a la alteración de la dinámica costera por los constantes dragados de la ría, la construcción del paseo marítimo y la urbanización del entorno.

El empleo de técnicas avanzadas de Geographic Information System (GIS) permiten mejorar el análisis de la evolución de los frentes dunares. En Galicia se ha aplicado el software *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) (USGS, 2023) sobre ortografía para estudiar la evolución de las dunas en las Islas Cíes entre 1956 y la actualidad, constatando retrocesos de más de 30 metros del frente dunar (Gómez-Pazo *et al.*, 2019). Además, la disponibilidad de datos de LIDAR en las últimas décadas, permiten contrastar los resultados y obtener datos más detallados sobre el movimiento de los campos dunares. La aplicación de LIDAR y fotogrametría también ha sido fundamental para conocer la evolución histórica del sistema dunar de Guardamar del Segura (Alicante) permitiendo obtener un modelo que se ha empleado para valorar la efectividad de las acciones de restauración antrópica ejecutadas durante el período 2001 a 2017 que han terminado con una reducción significativa del tamaño de la playa (Pagán *et al.*, 2019). La fragilidad de estos sistemas dunares obliga a un estudio detallado sobre la evolución de cualquier actuación como se puede observar en el trabajo de protección que se hizo en las dunas de Leirosa de Figueira da Foz (Portugal) a lo largo de una década (Do Carmo *et al.*, 2010).

En cuanto a la metodología basada en el uso de datos LIDAR, también se ha aplicado con buenos resultados en otros lugares fuera de España. En Aquitania (Francia) se han realizado extensas campañas de vuelos LIDAR a lo largo de su amplia costa que han permitido estudiar la evolución de los ecosistemas playa-duna entre 2011 y 2017. En este trabajo se observa un gran impacto erosivo en el invierno 2013-2014 y una recuperación en el volumen de arena en los años posteriores. Además, en este estudio se constata la fragilidad de la interfaz playa-duna donde los sedimentos son potencialmente removibles en procesos tormentosos (Nicolae-Lerma *et al.*, 2019). Utilizando técnicas GIS se puede estudiar la evolución de los sistemas dunares incluso en entornos complejos como el Cabo Cod (Estados Unidos) uno de los lugares del mundo con mayor número de reventones térmico (potentes sistemas de vientos que se dan en determinadas zonas litorales y provocan fuertes tormentas). Así, mediante fotografía aérea y LIDAR se logran determinar las erosiones producidas y su vinculación con los cambios en el uso del suelo (Abhar *et al.*, 2015). En la misma línea, otro trabajo en Estados Unidos (Stockdon *et al.*, 2009) emplea técnicas GIS basadas en el uso de datos LIDAR para analizar la vulnerabilidad de los sistemas playa-duna durante los huracanes. Todos estos trabajos ponen de manifiesto el enorme potencial de las técnicas GIS que permiten extraer información tanto de antiguas fotografías aéreas como de los más recientes y precisos datos obtenidos con LIDAR.

El complejo dunar de Salinas-El Espartal se localiza en el noroeste de España, en la costa central de Asturias, cercano a la ciudad de Avilés (Figura 1). Se formó como parte de la barrera confinante del estuario de Avilés, con una alineación NE-SO y está



Figura 1 | Ubicación del complejo dunar de Salinas-El Espartal (Asturias).

compuesto por sedimentos arenosos siliciclásticos provenientes de la cuenca hidrográfica Nalón-Narcea, que desemboca 10 km al oeste de esta playa (Flor-Rodríguez, 1979). En la zona predominan los vientos del suroeste que soplan mar adentro (AEMET, 2013), pero no son significativos en los sistemas locales de playa-duna. En cuanto al oleaje, este se caracteriza por olas predominantes del noroeste, siendo importantes las de componente noreste en condiciones anticiclónicas (Puertos del Estado, 2022).

En la actualidad, casi dos tercios de la playa trasera y el área exterior de dunas se han urbanizado. El proceso comenzó en 1965 con la construcción del paseo marítimo que bordea la playa. Además, en la década de 1970, se produjeron operaciones intensivas de dragado en el estuario que perturbaron el equilibrio sedimentario, afectando al volumen de arena de la playa, la tasa de retroceso del frente dunar y la estabilidad del frente marítimo en general (Flor-Blanco *et al.*, 2013). La erosión se hizo prominente a partir de la década de 1990, aunque hacía años que se había detectado pérdida de arena y el frente dunar había comenzado a retroceder. En enero de 1990, 1325 m del paseo marítimo fueron destruidos por una tormenta y, aunque fue reconstruido en 1994, los sucesivos temporales de los años 2008 y 2009 lo volvieron a dañar seriamente. La causa más probable de los problemas en el paseo marítimo de Salinas-El Espartal desde 1985 es el dragado de la ría de Avilés (Flores-Soriano, 2015).

Además, la playa de Salinas ha sido azotada por diversos temporales, destacando los de 1954 o 1983 en el siglo pasado (Flor-Blanco *et al.*, 2021) y enero de 2014 (Montés, 2014), febrero 2016 (RTPA, 2016) y marzo de 2018 (Muñiz, 2018). Estos episodios de fuertes temporales provocan grandes cambios en la morfología de los sistemas playa-duna. Así, en Cantabria se utilizaron imágenes aéreas para estudiar mediante el modelo DSAS la respuesta de los sistemas dunares a los temporales con especial atención al invierno 2013-2014. Este temporal fue uno de los más energéticos registrados en el Atlántico desde 1948 y afectó también a Salinas-El Espartal y a otros lugares en Reino Unido y Francia (Garrote *et al.*, 2018). Sin embargo, en Cantabria, el escaso tiempo transcurrido desde los temporales hasta la toma de datos, parece estar detrás de la ausencia de evidencias de recuperación en los sistemas dunares.

El objetivo de esta investigación es estudiar la evolución del sistema dunar de Salinas-El Espartal entre 1957 y 2021. Para ello se utilizarán datos de fuentes libres disponibles incluyendo fotografía aérea que será georreferenciada, ortofotografía y, en los últimos años, nubes de puntos LIDAR disponibles a través del IGN (IGN, 2020). Las imágenes serán procesadas mediante software GIS para definir el estado del frente dunar, posteriormente se aplicará el software DSAS para estudiar la evolución de la duna a lo largo de los años. Los datos LIDAR disponibles en los años 2014 y 2020 se utilizarán para validar estado del retroceso en el campo dunar. Además, se valorará la posibilidad de emplear estos datos LIDAR para el estudio de los cambios en la densidad de la vegetación y para la determinación de crestas y surcos dunares.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en el complejo dunar de Salinas-El Espartal (Asturias). Para estudiar su evolución se ha recurrido a las fuentes de datos disponibles de forma libre, lo que incluye una serie de fotografías aéreas, ortofotografías y nubes densas de puntos obtenidas a través de vuelos LIDAR. El estudio recoge imágenes desde 1957 hasta 2021 que han sido procesadas empleando el software ArcGIS versión 10.8. La metodología empleada puede ser aplicada sobre otros sistemas dunares existentes, la única limitación será la disponibilidad de imágenes que restringirá el horizonte temporal en algunas zonas.

Fotografía aérea

Las primeras imágenes disponibles para la zona están formadas por series de fotografías obtenidas por medios aéreos sin georreferenciar. De este grupo, se empleó la imagen correspondiente a 1957 por ser la más antigua disponible (CECAF, 1957), sirviendo de punto de partida para el estudio y la correspondiente al Vuelo Nacional de Costas de septiembre de 1989 (Centro Nacional de Información Geográfica, 1989). Esta última corresponde con imágenes con una escala 1:5000 y un tamaño de píxel de 12 cm. Ambas imágenes se obtienen en formato TIFF y, como paso previo a su utilización, las fotografías fueron georreferenciadas empleando como base la ortofotografía de máxima actualidad. Sobre la fotografía aérea georreferenciada se identificó la interfase entre duna vegetada y no vegetada, dada la imposibilidad de definir otros detalles debido a la ausencia de información altimétrica. Estas fotografías ofrecen una primera referencia de la localización inicial del campo dunar permitiendo conocer el retroceso que se dará en años posteriores.

Ortofotografía

Las ortofotografías son imágenes obtenidas mediante vuelos fotogramétricos de alta resolución que han sido rectificadas para adaptarse a las formas del terreno y se ofrecen en un producto descargable donde todos los elementos están en la misma escala, libres de errores, deformaciones y correctamente georreferenciadas. Dentro de este grupo, para la región de estudio, se tienen ortofotos de la serie histórica del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) para los años 2006, 2014 y 2021 (Instituto Geográfico Nacional, 2023). Las imágenes se obtienen en formato GeoTIFF en el sistema de referencia ETRS89 divididas en hojas de 2×2 km² a una escala 1:50000. La resolución espacial ha ido variando con el tiempo siendo de al menos 25 cm desde el año 2017. Sobre estas imágenes se empleó la misma metodología que con las fotografías aéreas, tranzando la interfaz entre duna vegetada y no vegetada.

Nubes de puntos LIDAR

Las nubes de puntos provenientes de vuelos LIDAR permiten estudiar con mayor precisión la posición del campo dunar, así como las crestas y las dunas que lo componen. Para la región de estudio se dispone de datos de los años 2012 y 2020 correspondientes a la primera y la segunda cobertura del proyecto PNOA-LIDAR (Instituto Geográfico Nacional, 2023) que cubre todo el territorio español con una resolución temporal de 6 años. Actualmente, se ha iniciado la tercera cobertura, pero todavía no se disponen de datos sobre la región de estudio. La densidad de puntos es de 0.5 puntos/m² en 2012 y hasta 4 puntos/m² en 2020, en sistema de referencia ETRS89, con una precisión altimétrica es de 40 cm en 2012 y 20 cm en 2020 obteniéndose en formato LAZ para regiones de 2×2 km². Los datos disponibles son anteriores y posteriores al gran temporal de 2014, lo que permite valorar el impacto de ese episodio sobre el sistema dunar de salinas.

Para identificar el campo dunar es necesario establecer el rango de cotas en los que éste se desarrolla. De esta manera, se limitó la representación gráfica entre las cotas -1.5 y 20 m sobre el Nivel del Medio del Mar en Alicante (NMMA) y se empleó una escala de color lineal de modo que se acentúe el contraste entre crestas y surcos. Adicionalmente, se representaron las curvas de nivel con un intervalo de 0.5 m para definir la posición de las crestas en el frente. La morfología obtenida del análisis sobre los datos de 2012 es comparada con los datos de 2020, permitiendo además validar las observaciones realizadas sobre las ortofotos.

Evolución del frente dunar

El estudio de la evolución de la línea de costa se realizó mediante el software Digital Shoreline Analysis System (DSAS) en su versión 5 (U.S. Geological Survey, 2022). Se trata de un complemento para ArcGIS que permite calcular estadísticos de los cambios a partir de múltiples posiciones históricas de la línea de costa, proporcionando un método automatizado para establecer ubicaciones de medición, realizar cálculos de tasas y proporcionar datos que evalúen con solidez la evolución de un sistema costero.

Se tomó como referencia un eje de 1500 m de longitud trazado sobre la línea de costa actual, cubriendo la extensión del campo dunar en sentido este-oeste, desde el espigón de la ría y hasta el inicio del paseo marítimo. Mediante la herramienta DSAS se generaron perfiles cada 50 m perpendicularmente al eje definido, cortando las líneas de costa establecidas en los años 1957, 1989, 2006, 2014 y 2021. De esta manera se obtiene la evolución a lo largo de 4 periodos diferentes: 1957-1989, 1989-2006, 2006-2014, 2014-2021. Mediante este método se pudo calcular el retroceso o avance del frente dunar y se estimó la velocidad, en m/año, para los cuatro periodos establecidos.

Análisis de la superficie antropizada

Se tomó como referencia inicial la imagen de 1957 y como final la última ortofoto disponible correspondiente al año 2021. Sobre ellas, se diferenciaron las superficies natural y antropizadas, calculando sus áreas, con el fin de conocer el porcentaje de disminución del campo dunar durante 64 años. El desarrollo urbanístico y la complejidad del paisaje actual, hizo necesario emplear los datos LIDAR de 2020 como elemento de apoyo para diferenciar con mayor claridad la superficie natural de la antropizada sobre la ortofoto actual.

Sobre la imagen de 1957, se consideraron superficies naturales aquellas cubiertas por vegetación en más del 75%, en la línea de otros trabajos realizados anteriormente en la zona (Flor-Blanco *et al.*, 2013). Como superficie antropizada se define aquella edificada o cubierta por viales, así como las fincas de uso agropecuario, las superficies portuarias e industriales en las inmediaciones. Sobre la imagen de 2021, se utiliza el mismo criterio, incorporando a la superficie natural aquellas zonas desindustrializadas convertidas en las que se han realizado trabajos de recuperación del campo dunar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio muestran la posición inicial del frente dunar, la evolución a lo largo de diferentes periodos de tiempo, así como los perfiles obtenidos empleando DSAS para determinar la longitud y velocidad de avance de la duna. Además, se determinan las unidades morfológicas (crestas y surcos) empleando LIDAR y los cambios en el porcentaje de superficie antropizada entre 1957 y 2021.

La primera referencia es de 1957 donde se observa cierto grado de antropización, concentrada en la mitad oeste del campo dunar original, con la construcción de viviendas unifamiliares y las explotaciones agropecuarias. En esta zona se construirá posteriormente el paseo marítimo, ocupando por completo el campo dunar, por lo que el estudio se centrará en la zona este (Figura 2). La zona central presenta una vegetación de densidad variable, siendo menos densa en la zona frontal. En el extremo este se implanta una playa de vías con acopio para graneles, así como alguna construcción aislada. Esta zona presenta una vegetación más baja, pero de mayor extensión.

La Figura 3 muestra la situación de la duna en cuatro periodos distintos, definida por su posición inicial, su posición final, la longitud y velocidad de desplazamiento a lo largo de la playa en perfiles cada 50 m, sobre la ortofoto del instante final.

En Figura 3a, correspondiente al periodo 1957-1989, se observa un notable crecimiento de las áreas urbanizadas, así como del suelo ocupado para uso industrial. Tras la construcción del paseo marítimo en 1965, la mitad oeste queda completamente urbanizada. En la zona central se distingue la construcción de una gran edificación industrial, sin embargo, no se percibe un retroceso del frente vegetado en los primeros 900 m visualizados en el oeste de la imagen. En el extremo este el frente ha retrocedido

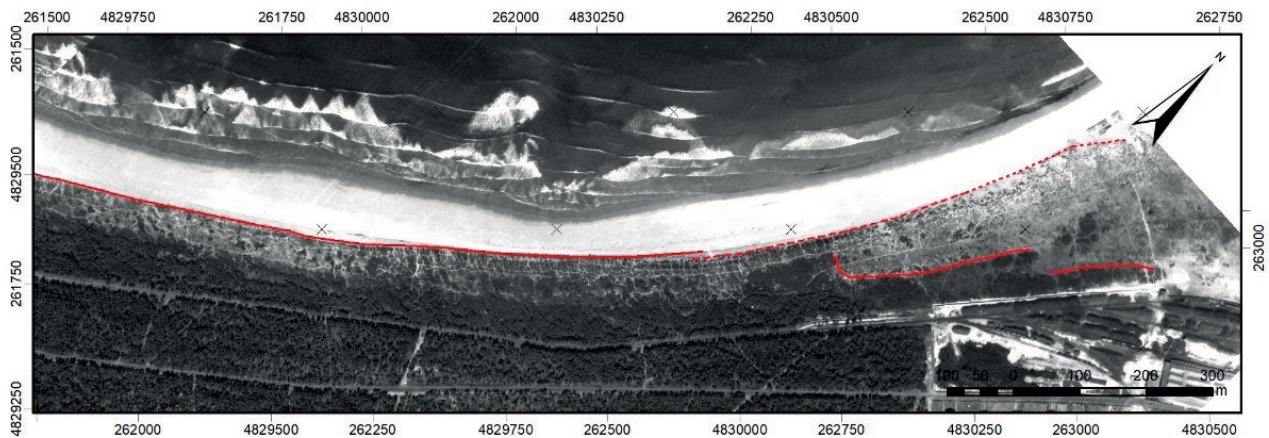


Figura 2 | Posición del frente dunar en 1957.

en torno a 90 m debido a la ocupación del suelo, hasta unirse con la playa de vías ahora desmantelada, sin que se haya revegetado o reincorporado al campo dunar. En esta zona y período se registran el mayor retroceso en el frente dunar (con velocidades de hasta 7.6 m/año, ver Tabla 1), si bien no se deben a la acción marina, sino directamente a la acción antrópica. Frente a esta zona, se construye un espigón que se une al espigón de la bocana de la ría de Avilés con un dique seco.

La Figura 3b, correspondiente al período 1989-2006, muestra los primeros esfuerzos por recuperar el campo dunar. En el extremo oriental se ha desmantelado gran parte del dique seco, recuperándose 350 m de playa, además del vertedero ilegal, dando lugar a la duna restaurada. Sobre ésta, se dispone una serie de pasarelas que dan acceso a la playa, permitiendo el desarrollo una vegetación baja y poco espesa. En esta zona se registra el mayor avance dunar, de nuevo debido a la acción antrópica, recuperando la práctica totalidad de su extensión original. Se observa también el desmantelamiento de la edificación previamente situada en la zona central, así como la restricción del acceso de vehículos, dando lugar un proceso de revegetación similar. En este periodo se observan sin embargo los primeros indicios de retrogradación del campo dunar, con la pérdida de la cobertura vegetal entre los 600 y los 1300 m, en una banda de en torno a 15.7 m, probablemente a consecuencia de el ensanchamiento y los dragados realizados en la bocana del puerto de Avilés. Por otro lado, en el extremo occidental se observa la aparición de una duna en forma de lengua, con un avance de 68 m.

En la Figura 3c, correspondiente al periodo 2006-2014, se observa la construcción de nuevas pasarelas y miradores que conectan el paseo marítimo con las previamente existentes. Las zonas restauradas siguen su proceso de revegetación, mientras la arena invade las pasarelas del extremo oriental, aumentando el volumen de sedimentos en esta zona, y continúa el avance de las lenguas ubicadas en el extremo occidental. Sin embargo, se observa una fuerte recesión del frente vegetado en la zona central, entre los 600 y los 1300 m, de entre 15 y 38 m, continuando con el proceso observado en el periodo anterior. En esta zona se registran también las mayores velocidades de retroceso dunar, con una media de 3.5 m/año (Tabla 1), por procesos de la dinámica litoral, y concretamente a la suma del efecto de los temporales registrados en 2008, 2009 y, especialmente, 2014.

En la Figura 3d, correspondiente al periodo 2014-2021, se observan pocos cambios. Continúa la tendencia a la revegetación de las zonas restauradas, así como el avance de las lenguas ubicadas junto al paseo marítimo, con otros 14 m sobre su posición en 2014, alcanzando 100 m sobre la posición inicial del frente vegetado en esa zona. No se observa mayor retroceso en la zona afectada por los temporales anteriores, si bien parece recuperar densidad en la vegetación más septentrional.

La Figura 4 resume la evolución de la playa a lo largo de los cuatro períodos. Se observan los perfiles que se han trazado cada 50 m, tomando como 0 de referencia el lado oeste, junto al espigón del puerto. En cada perfil, se representan cuatro barras, cada una de las cuales muestra un período, ordenados de izquierda a derecha empezando por el más antiguo (1957-1989). La velocidad se muestra mediante una escala de color siendo rojo el retroceso y verde el avance.

En la Figura 5 se ha representado la nube de puntos LIDAR correspondientes al terreno, entre las cotas -2.5 y 20 m sobre el NMMA, con diferentes colores según su elevación. La Figura 5a se corresponde a los datos LIDAR obtenidos en 2012 sobre la

Tabla 1 | Longitud de avance del frente dunar (m) y velocidad de avance (m/año) en perfiles cada 50 m durante los cuatro periodos estudiados.

| | 1957 - 1989 | | 1989 - 2006 | | 2006 - 2014 | | 2014 - 2021 | |
|------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | Avance (m) | Velocidad (m/año) | Avance (m) | Velocidad (m/año) | Avance (m) | Velocidad (m/año) | Avance (m) | Velocidad (m/año) |
| 0 | -243.64 | -7.61 | 297.27 | 17.49 | 72.31 | 9.04 | 1.92 | 0.27 |
| 50 | -233.41 | -7.29 | 190.42 | 11.20 | 4.26 | 0.53 | 4.66 | 0.67 |
| 100 | -224.85 | -7.03 | 195.91 | 11.52 | 12.99 | 1.62 | 5.75 | 0.82 |
| 150 | -200.68 | -6.27 | 169.56 | 9.97 | 10.09 | 1.26 | 3.44 | 0.49 |
| 200 | -181.28 | -5.67 | 156.55 | 9.21 | 1.12 | 0.14 | 4.13 | 0.59 |
| 250 | -159.54 | -4.99 | 135.02 | 7.94 | 4.05 | 0.51 | 3.30 | 0.47 |
| 300 | -145.42 | -4.54 | 123.63 | 7.27 | -1.08 | -0.13 | 2.26 | 0.32 |
| 350 | -165.03 | -5.16 | 147.77 | 8.69 | 11.26 | 1.41 | 0.13 | 0.02 |
| 400 | -105.54 | -3.30 | 84.52 | 4.97 | 13.33 | 1.67 | 5.87 | 0.84 |
| 450 | -90.15 | -2.82 | 90.56 | 5.33 | -14.83 | -1.85 | 10.35 | 1.48 |
| 500 | -88.88 | -2.78 | 39.43 | 2.32 | 0.80 | 0.10 | 36.59 | 5.23 |
| 550 | -31.49 | -0.98 | 5.23 | 0.31 | 1.38 | 0.17 | 9.87 | 1.41 |
| 600 | -20.54 | -0.64 | -21.96 | -1.29 | 5.64 | 0.71 | 1.32 | 0.19 |
| 650 | -22.23 | -0.69 | -1.81 | -0.11 | -24.15 | -3.02 | 7.52 | 1.07 |
| 700 | -1.36 | -0.04 | -16.17 | -0.95 | -29.38 | -3.67 | 9.94 | 1.42 |
| 750 | -0.67 | -0.02 | -15.86 | -0.93 | -32.28 | -4.04 | 8.53 | 1.22 |
| 800 | -0.58 | -0.02 | -12.74 | -0.75 | -34.94 | -4.37 | 8.38 | 1.20 |
| 850 | -1.58 | -0.05 | -9.34 | -0.55 | -37.53 | -4.69 | 7.42 | 1.06 |
| 900 | 1.71 | 0.05 | -10.84 | -0.64 | -38.06 | -4.76 | 6.49 | 0.93 |
| 950 | 3.12 | 0.10 | -14.74 | -0.87 | -35.12 | -4.39 | 6.71 | 0.96 |
| 1000 | 1.65 | 0.05 | -16.92 | -1.00 | -27.57 | -3.45 | 6.57 | 0.94 |
| 1050 | 5.67 | 0.18 | -17.00 | -1.00 | -25.57 | -3.20 | 7.74 | 1.11 |
| 1100 | 5.70 | 0.18 | -13.61 | -0.80 | -24.78 | -3.10 | 9.92 | 1.42 |
| 1150 | 6.07 | 0.19 | -14.26 | -0.84 | -21.75 | -2.72 | 2.31 | 0.33 |
| 1200 | 8.60 | 0.27 | -22.69 | -1.33 | -18.38 | -2.30 | 6.59 | 0.94 |
| 1250 | 2.05 | 0.06 | -22.48 | -1.32 | -16.65 | -2.08 | 3.94 | 0.56 |
| 1300 | 3.39 | 0.11 | -25.05 | -1.47 | -20.55 | -2.57 | 6.54 | 0.93 |
| 1350 | 8.38 | 0.26 | -37.83 | -2.23 | -17.08 | -2.13 | 9.85 | 1.41 |
| 1400 | 3.83 | 0.12 | -68.25 | -4.01 | -13.86 | -1.73 | -14.64 | -2.09 |
| 1450 | -0.88 | -0.03 | -16.29 | -0.96 | -54.60 | -6.82 | 4.37 | 0.62 |
| 1500 | -61.48 | -1.92 | 5.04 | 0.30 | 9.74 | 1.22 | -1.59 | -0.23 |

ortofoto correspondiente a 2014. En esta se observa la posición de las crestas y surcos del campo dunar, destacando las dos lenguas en la zona occidental, un cordón dunar en la zona media, una formación compuesta por varias lenguas de menor extensión y una explanada en la zona correspondiente a la duna restaurada. Frente al cordón dunar, en la zona entre la duna vegetada y la activa, se observa una fuerte pendiente, reflejo de una pérdida de sedimentos por acción de la dinámica litoral.

En la Figura 5b se representa la nube de puntos del 2020 sobre la ortofoto del año 2021, junto con la posición de las crestas en el año 2012, de modo que se pueda establecer una comparativa. En el detalle de la Figura 6a y la Figura 6b se observa el avance de las lenguas situadas en el extremo occidental, especialmente de la segunda en dirección este. El cordón dunar situado en la zona media (Figura 7a) ha desaparecido en 2020 (Figura 7b), provocando el retroceso del frente dunar. De nuevo se genera una pared de

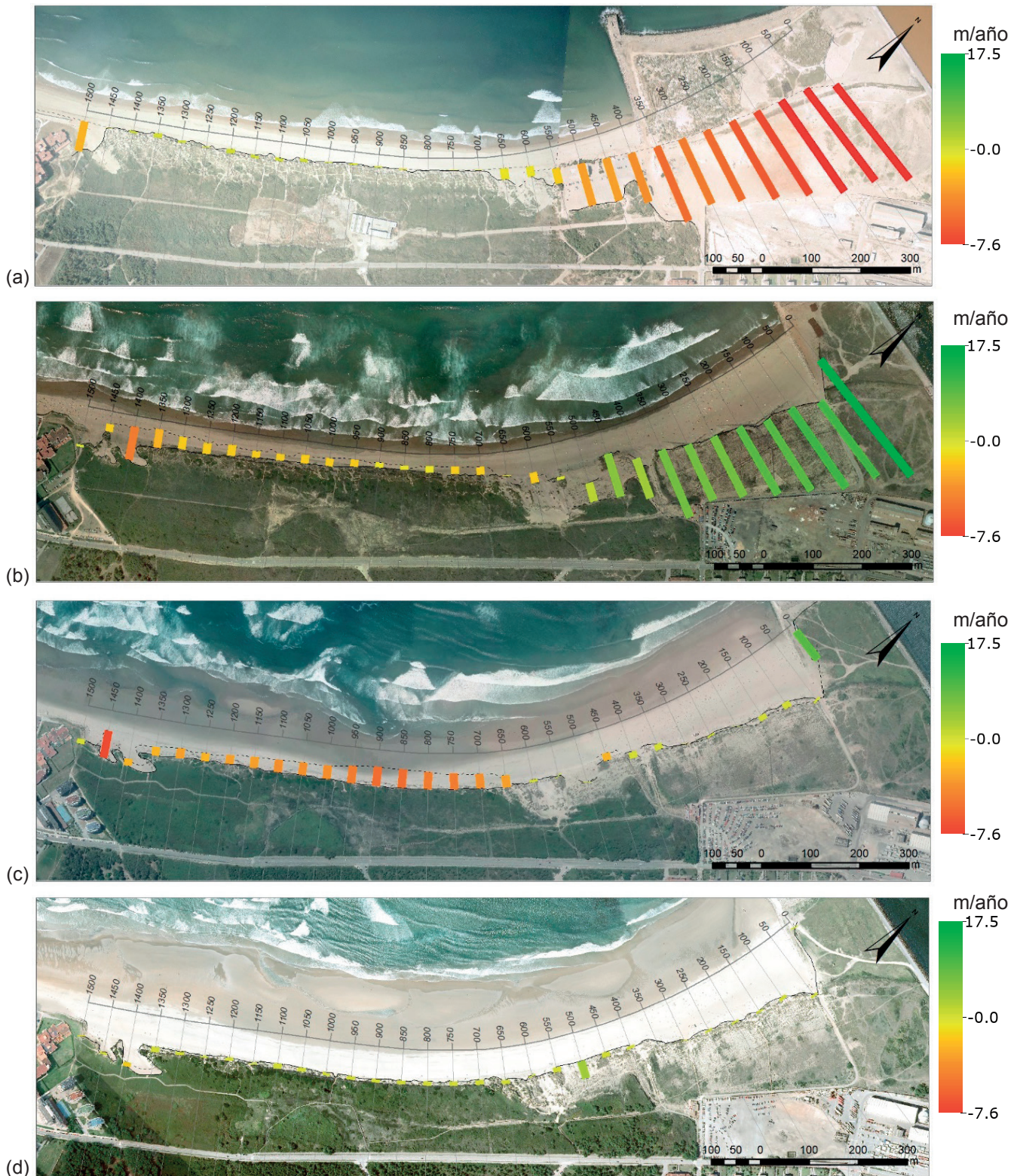


Figura 3 | Posición inicial y final del frente dunar, longitud y velocidad de desplazamiento a lo largo de perfiles longitudinales sobre ortofoto del año final para los periodos: (a) 1957-1989, (b) 1989-2006, (c) 2006-2014, (d) 2014-2021.

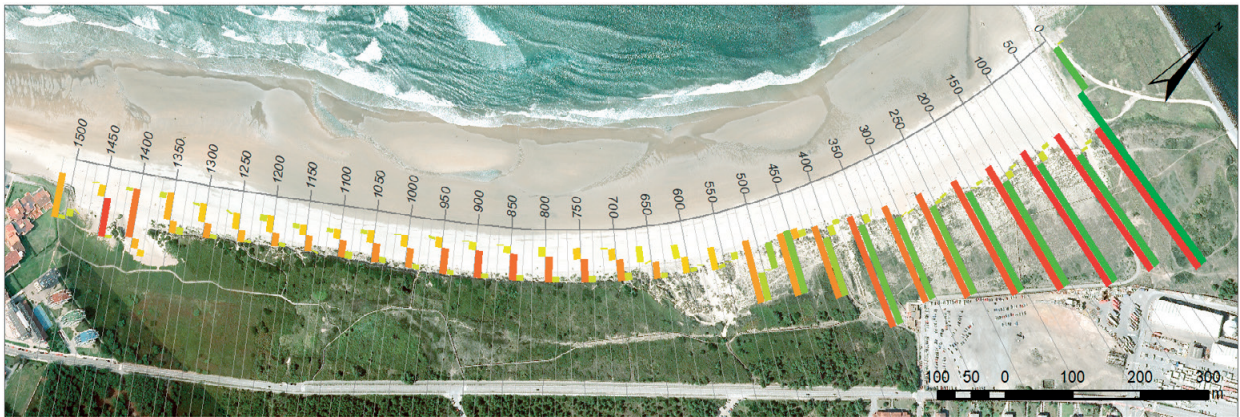


Figura 4 | Superposición de la evolución a lo largo de los cuatro períodos. Los huecos corresponden a periodos en los que no se ha producido avance ni retroceso.

inclinación pronunciada, resultado de la pérdida de sedimentos y posterior hundimiento y pérdida la capa vegetada. En el conjunto de lenguas orientales (Figuras 6c y 6d) se observan pocos cambios, más allá de la misma pérdida de sedimentos que en la zona contigua y pequeñas alteraciones en la cresta, posiblemente por la acción del pisoteo. En la explanada oriental, correspondiente a la duna restaurada, se observan pocos cambios, salvo un moderado incremento de cota generalizado, que podría corresponderse a la incorporación de sedimentos por influencia del espigón.

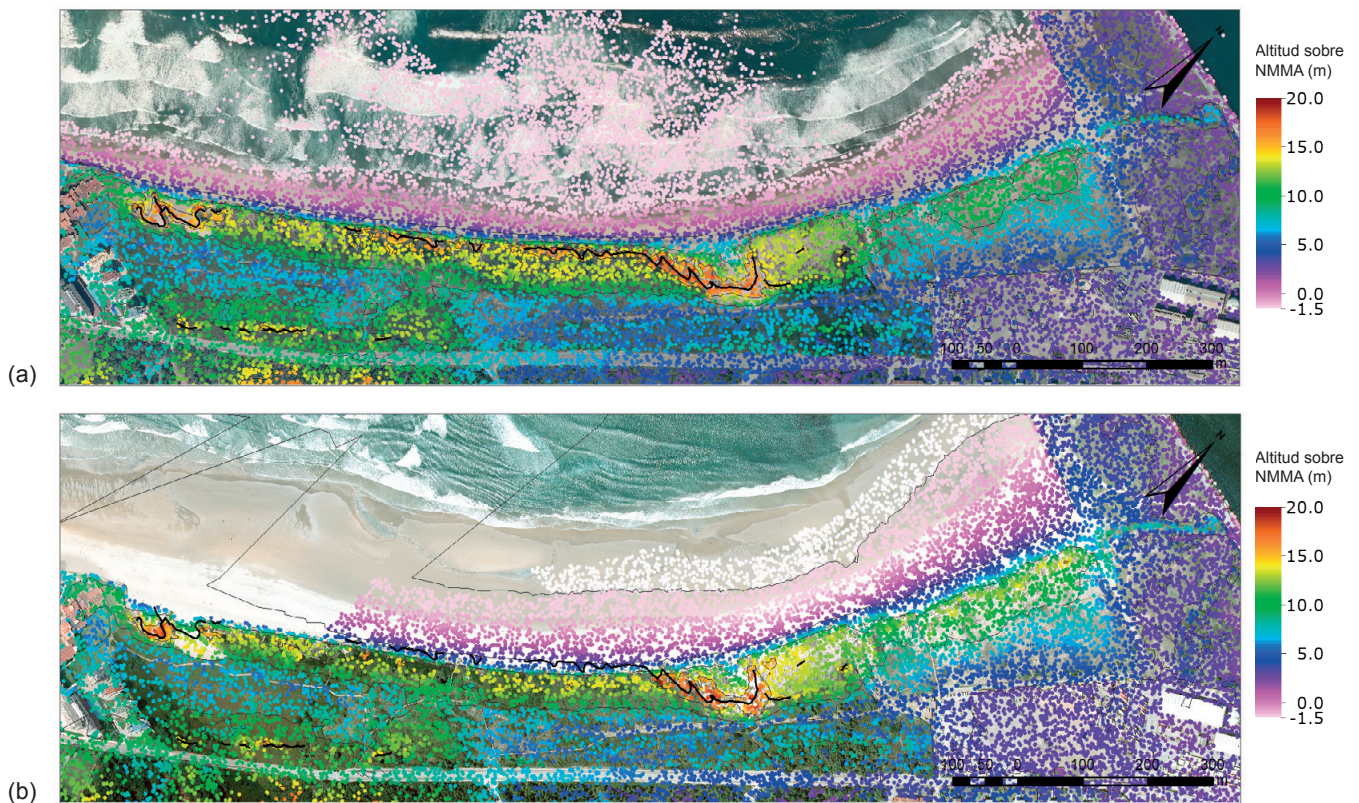


Figura 5 | Determinación de las unidades morfológicas a partir de nubes de puntos LIDAR. (a) 2012, (b) 2020.

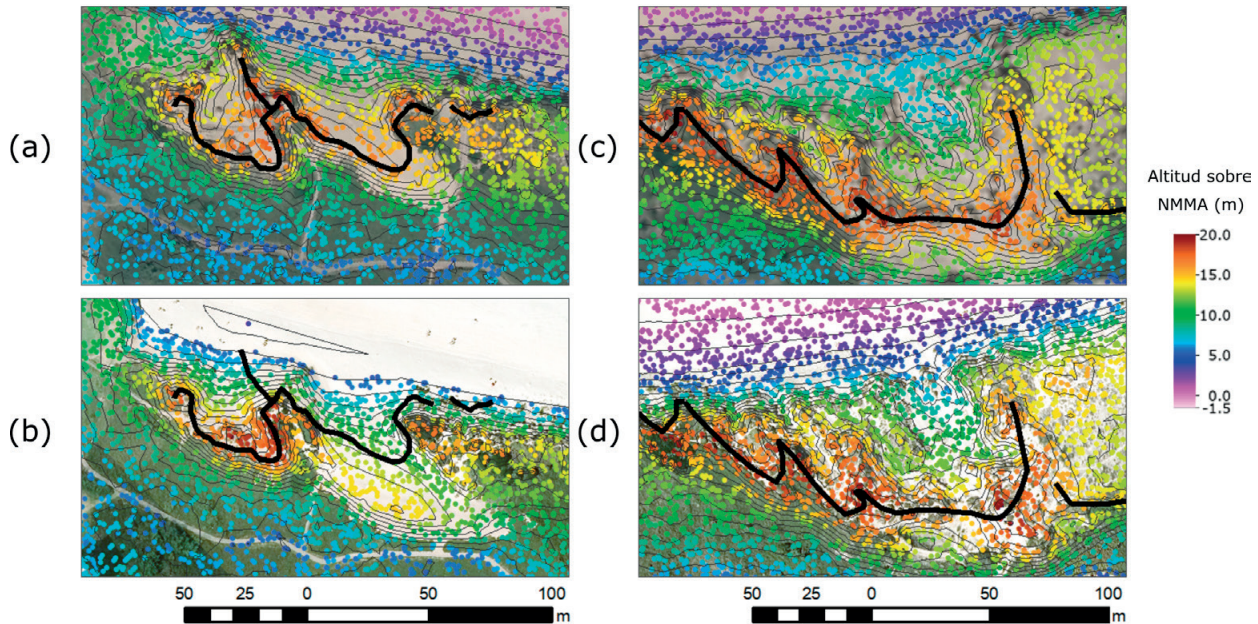


Figura 6 | Detalles de la morfología obtenidos con LIDAR: (a) lenguas occidentales en 2012 y (b) 2020, (c) lenguas orientales en 2012 y (d) 2020.

La Figura 8a muestra el hundimiento de la capa vegetada por un proceso de descalzamiento, conforme a lo observado en las imágenes del LIDAR. Por otro lado, en la Figura 8b se observa la invasión de la antigua pasarela por el avance de la lengua representada en la Figura 6b y la construcción de un nuevo tramo en 2022.

Respecto a la ocupación del campo dunar, la comparativa pone de manifiesto el evidente deterioro del sistema dunar. En la Figura 9a se puede observar como en la imagen de 1957 la zona natural que todavía no se ha antropizado (verde) es mucho mayor que en la actualidad y corresponden a la duna vegetada y a la duna activa. La zona antropizada incluye escasas edificaciones y no

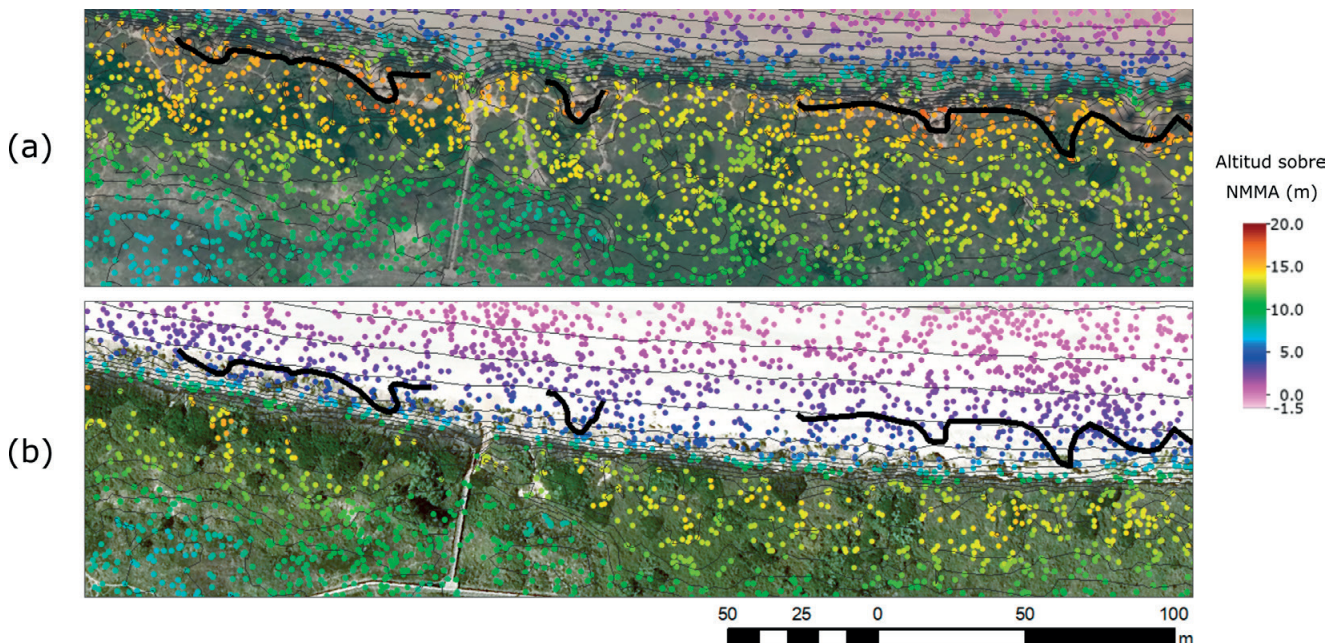


Figura 7 | Detalles de la morfología obtenidos con LIDAR: (a) cordón dunar situado en la zona media en 2012 y (b) 2020.

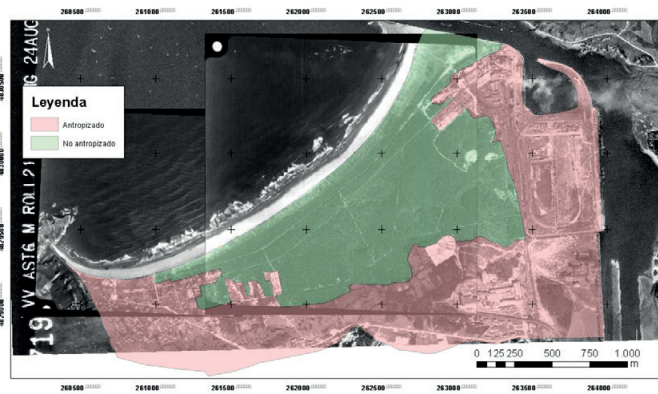


(a)



(b)

Figura 8 | Imagen de campo de detalle: (a) hundimiento del frente dunar, (b) avance de la lengua.



(a)



(b)

Figura 9 | Zonificación del campo dunar. (a) 1957, (b) 2021.

aparece el paseo marítimo, ya que se construyó en 1965. En la imagen más reciente de 2021 (Figura 9b) la zona natural ha disminuido y alcanza un total de 62.31 Ha (14.46%) del total, lo que supone una pérdida de más del 60% de la superficie natural disponible en 1957. Sin embargo, no se encuentra relación entre la pérdida de superficie vegetada en los últimos años con la ocupación de suelo, ya que, partir de su declaración como Monumento Natural en 2006, la ocupación de la duna deja de extenderse, al mismo tiempo que se registra un notable retroceso del frente vegetado junto con daños en el paseo marítimo causados por diferentes temporales entre los años 2006 y 2014. Esto pone de manifiesto la insuficiencia de las medidas adoptadas hasta el momento, especialmente si se limitan a la protección del banco de arena emergido sin considerar la afección de los dragados de la bocana del Puerto de Avilés.

CONCLUSIONES

Los sistemas dunares tienen gran importancia pues son fundamentales para el equilibrio ecológico y la biodiversidad. La mayor amenaza para su supervivencia son la sobreexplotación, la expansión urbana, la minería, la contaminación y el turismo. El estudio de su conservación hace necesario el análisis de su evolución a lo largo del tiempo. El complejo dunar de Salinas–El Espartal ha sufrido un importante deterioro en el último medio siglo, debido a la urbanización y los intensos dragados dando como resultado un deterioro del sistema dunar. En este trabajo se estudió la evolución del sistema dunar entre 1957 y 2021 observando en el primer

período (1957-1989) un crecimiento de las áreas urbanizadas y de la ocupación del suelo en la zona oriental. En el segundo período (1989-2006), se muestran los primeros esfuerzos por recuperar el campo dunar, restaurando parte de la playa, aunque se observan los primeros indicios de retrogradación del campo dunar, con pérdida de la cobertura vegetal. En los últimos dos períodos de estudio 2006-2014 y 2014-2021, se observa un retroceso del frente vegetado y un avance de hasta 100 m de las lenguas occidentales. El estudio sobre nubes de puntos LIDAR en los últimos años hace posible determinar con mayor precisión la posición de las crestas y observar la evolución con mayor detalle. Finalmente, en cuanto al análisis superficie antropizada, los resultados muestran un importante deterioro del sistema dunar con una pérdida de la superficie natural que supera el 60%.

REFERENCIAS

- Abhar, K.C., Walker, I.J., Hesp, P.A., Gares, P.A. 2015. Spatial-temporal evolution of aeolian blowout dunes at cape cod. *Geomorphology*, 236, 148-162. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.015>
- AEMET. 2013. Agencia Estatal de Meteorología, Gobierno de España. En: *El Tiempo*. <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos>. Accessed 23 Dec 2020
- BOE. 2013. Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas (BOE núm. 129, de 30 de mayo de 2013). *Actualidad Jurídica Ambiental*, 74-76.
- CECAF. 1957. Ejército del Aire - Organización - Unidades - Detalle unidad. In: Ministerio De Defensa. Gobierno De España. <https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/organizacion/unidades/unidad/Centro-Cartografico-y-Fotografico-CECAF/>. Accessed 23 Dec 2020.
- Centro Nacional de Información Geográfica. 1989. Vuelo de 1989-1991 Costas. <https://datos.gob.es/es/catalogo/e00125901-spaingvuelocostas>. Accessed 1 Jul 2023.
- Do Carmo, J.A., Reis, C.S., Freitas, H. 2010. Working with Nature by Protecting Sand Dunes: Lessons Learned. *J. Coast. Res.*, 26, 1068-1078. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00022.1>
- Flor-Rodríguez, G.S. 1979. Depósitos arenosos de las playas del litoral de la región de Cabo Peñas (Asturias): sedimentología y dinámica.
- Flor-Blanco, G., Alcántara-Carrió, J., Jackson, D.W.T., Flor G., Flores-Soriano, C. 2021. Coastal erosion in NW Spain: Recent patterns under extreme storm wave events. *Geomorphology* 387:107767. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2021.107767>
- Flor-Blanco, G., Flor, G., Pando, L. 2013. Evolution of the Salinas-El Espartal and Xagó beach/dune systems in north-western Spain over recent decades: Evidence for responses to natural processes and anthropogenic interventions. *Geo-Marine Letters*, 33, 143-157. <https://doi.org/10.1007/s00367-012-0301-3>
- Flores-Soriano, C. 2015. Evolución de los campos dunares de Asturias desde mediados del Siglo XX hasta 2014.
- Garrote, J., Díaz-álvarez, A., Nganhane, H.V., Heydt, G.G. 2018. The Severe 2013–14 Winter Storms in the Historical Evolution of Cantabrian (Northern Spain) Beach-Dune Systems. *Geosciences*, 8, 459. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES8120459>
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., Pérez, X.L.O. 2019. Recent Evolution (1956–2017) of Rodas Beach on the Cíes Islands, Galicia, NW Spain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 125. <https://doi.org/10.3390/JMSE7050125>
- IGN. 2020. Instituto Geográfico Nacional. <https://www.ign.es/web/ign/portal>. Accessed 30 Oct 2020.
- Instituto Geográfico Nacional. 2023. PNOA - LIDAR. <https://pnoa.ign.es/web/portal/pnoa-lidar/presentacion>. Accessed 1 Jul 2023.
- Instituto Geográfico Nacional. 2023. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. <https://pnoa.ign.es/web/portal/pnoa-imagen/estado-de-los-vuelos>. Accessed 1 Jul 2023.

- López-Peláez, J., Flor-Rodríguez, G. 2008. Evolución ambiental del estuario de Avilés (1833-2006). *Trabajos de geología*, 135, 119-135
- Martínez, M.L., Maun, M.A., Psuty, N.P. 2008. The Fragility and Conservation of the World's Coastal Dunes: Geomorphological, Ecological and Socioeconomic Perspectives. *Coastal dunes: ecology and conservation*, 355-369. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_21
- MITECO. 2018. Playas, arenales y sistemas dunares. <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/conociendo-litoral/zonas-litorales-espanolas/clasificacion-tipologica/playas-arenales-sistemasdunares.aspx>. Accessed 16 Jun 2023
- Montés, I. 2014. El primer gran temporal del invierno castiga el entorno de la playa de Salinas - La Nueva España.
- Muñiz, R. 2018. “Hugo” llega con vientos huracanados y destroza el puerto de Cudillero | El Comercio: Diario de Asturias. <https://www.elcomercio.es/asturias/borrasca-hugo-asturias-temporal-destroza-puerto-cudillero-20180325010648-ntvo.html>. Accessed 17 Jun 2023.
- Nicolae-Lerma, A., Ayache, B., Ulvoas, B., et al. 2019. Pluriannual beach-dune evolutions at regional scale: Erosion and recovery sequences analysis along the aquitaine coast based on airborne LiDAR data. *Cont. Shelf. Res.*, 189, 103974. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2019.103974>
- Pagán, J.I., Bañón, L., López, I., Bañón, C., Aragonés, L. 2019. Monitoring the dune-beach system of Guardamar del Segura (Spain) using UAV, SfM and GIS techniques. *Science of the Total Environment*, 687, 1034-1045. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.186>
- Puertos del Estado. 2022. Predicción de oleaje, nivel del mar; Boyas y mareógrafos | puertos.es. <https://www.puertos.es/es-es/oceanografía/Paginas/portus.aspx>. Accessed 30 Mar 2023
- Rodríguez-Santalla, I., Gómez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Sánchez-García, M.J., Montoya-Montes, I., Martín-Velázquez, S., Barrio, F., Serra, J., Ramírez-Cuesta, J.M., Gracia, F.J. 2021. Study and Evolution of the Dune Field of La Banya Spit in Ebro Delta (Spain) Using LiDAR Data and GPR. *Remote Sensing*, 13, 802. <https://doi.org/10.3390/RS13040802>
- Roig-Munar, F.X., Vicens, J., Mir-Gual, M., Martín-Prieto, J.A., Pons, G.X. 2013. Evolución espacio temporal (1956-2012) de los sistemas dunares del Baix y Alt Empordà (Girona, Cataluña). *Geo-Temas*, 14, (VII Jornadas de Geomorfología litoral), 99, 102.
- RTPA. 2016. El puerto de Avilés cierra debido al temporal - Noticias RTPA.
- Stockdon, H.F, Doran, K.S, Sallenger, A.H. 2009. Extraction of lidar-based dune-crest elevations for use in examining the vulnerability of beaches to inundation during hurricanes. *J. Coast. Res.*, 10053, 59-65. <https://doi.org/10.2112/S153-007.1>
- U.S. Geological Survey. 2022. Digital Shoreline Analysis System (DSAS). <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas>. Accessed 1 Jul 2023
- USGS. 2023. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) | U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas>. Accessed 17 Jun 2023