

Uso de modelos lidar para el análisis multitemporal de la vulnerabilidad costera ante temporales excepcionales en litorales altamente antropizados

I. Sánchez, J. Guillén^{1,4}, J. Jiménez^{2,4} y A. Ruíz³

¹Instituto de Ciencias del Mar (CSIC). Departamento de Geología Marina.

²Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Laboratorio de Ingeniería Marítima.

³Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). Unidad de Desarrollo en Fotogrametría.

⁴Unidad Asociada de Geología, Morfodinámica y Gestión Costera (UPC-CSIC).

jorge@icm.csic.es

RESUMEN

Los litorales altamente antropizados tienen una problemática específica respecto a los riesgos costeros a causa de la modificación de su dinámica natural por la ocupación urbanística del medio. En este estudio se aborda el análisis del impacto de un temporal excepcional en el litoral catalán a partir de los datos obtenidos con vuelos lidar y su integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la cuantificación de los cambios morfológicos, la definición de parámetros morfológicos para el estudio de la vulnerabilidad y la valoración de las capacidades de la técnica lidar frente al uso de la fotografía aérea. El análisis de los datos lidar y el estudio y la definición de los parámetros morfológicos útiles han permitido cuantificar los cambios morfológicos ocasionados por el temporal y la variación de la línea de costa. El estudio pone de manifiesto que los datos lidar permiten la evaluación de la erosión e inundación en playas antropizadas cuando se utiliza un protocolo de análisis adecuado, así como la importancia de integrar la información de todo el perfil de playa para comprender la dinámica litoral tras un evento excepcional.

PALABRAS CLAVE

Lidar, ArcGIS 10, vulnerabilidad costera, dinámica litoral.

ABSTRACT

Coastal areas that are highly inhabited have specific problems with regard to coastal risks due to the modification of its natural dynamics by the urban occupation of the environment. This study deals with the analysis of the impact of an exceptional storm on the Catalan coast from airborne lidar data and its integration into a Geographic Information Systems (GIS) in order to measure the morphological changes, define morphological parameters for the vulnerability study and assess the ability of the lidar technique versus the use of aerial photography. The analysis of lidar data and the study and definition of useful morphological parameters have allowed quantifying the morphological changes caused by the storm/because of the storm and the variation of the coastline. The study shows that lidar is appropriate for the evaluation of erosion and flooding in anthropised beaches, and the importance of integrating information across the beach profile to understand coastal dynamics after an exceptional event.

KEY WORDS

Lidar, ArcGIS 10, coastal vulnerability, coastal dynamics.

1 INTRODUCCIÓN

Una característica común a lo largo del litoral catalán es la fuerte presión urbanística, consecuencia del impacto del turismo -que en los últimos veinte años ha aumentado su actividad-, y de las actividades de ocio (bloques de apartamentos, campings, hoteles, paseos marítimos, golf, puertos de recreo). Sin olvidar la construcción del trazado del ferrocarril, longitudinal a la costa y a lo largo de todo el litoral, como alteración importante y de modificación del paisaje natural en áreas de litoral. Actualmente, esta franja está prácticamente urbanizada en su totalidad y las edificaciones e infraestructuras limitan o invaden la propia playa. La sobreocupación del suelo en esta frágil área conlleva la pérdida de espacios naturales y cambios en el uso del espacio. Este hecho se traduce en un fuerte impacto ambiental que ha ocasionado cambios importantes en la morfología de la línea de costa, así como en la dinámica sedimentaria.

El litoral está expuesto al peligro natural que suponen los temporales excepcionales. La probabilidad de ocurrencia de un temporal de una cierta magnitud en un lugar determinado se cuantifica asignando un periodo de retorno. En el campo de los riesgos naturales, hay dos fenómenos de máximo interés en la zona litoral: a) erosión y cambios en la configuración de la línea de costa y b) inundación de áreas emergidas. La vulnerabilidad y la exposición son factores de riesgo modificables; se pueden reducir con acciones de mitigación planificadas como la prevención, la predicción, la protección y un buen planeamiento territorial, es decir, aplicando una buena gestión del riesgo.

Como consecuencia de la alta ocupación de la costa, se precisa de una gestión adecuada en la planificación y en la ordenación territorial de la franja costera y por ello se recomienda conocer con precisión la dinámica de las playas para así determinar soluciones de carácter preventivo ante eventos excepcionales como los temporales de gran intensidad.

(http://www.magrama.gob.es/es/costas/temas/el_litoral-zonas-costeras/08_terminadas_tcm7-29999.pdf). Es necesario hacer compatible el uso de ese territorio con los efectos potenciales de los fenómenos naturales.

El objetivo del trabajo es la evaluación del lidar como técnica para la determinación de las variaciones morfológicas de las áreas de estudio

(erosión y acreción), y el análisis de la vulnerabilidad a través de unos parámetros morfológicos.

2 ÁREAS DE ESTUDIO

La selección de las áreas de estudio se basó en los datos disponibles de vuelos lidar sobre el litoral catalán realizados por el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) para el estudio de los impactos del temporal que tuvo lugar el 26 de diciembre de 2008 (temporal de "San Esteban"). Se seleccionaron dos áreas de estudio, una en un sector del Maresme y otra en la ciudad de Barcelona basándose en los datos lidar disponibles, las fotos aéreas del ICC y utilizando el servicio ortoXpres (<http://www.ortoxpres.cat>) (figura 1). Ambas zonas presentan diferencias morfológicas, de orientación y fueron alcanzadas por diferentes intensidades del oleaje durante el temporal.



Figura 1. Localización de las áreas de estudio

El Maresme se extiende de norte a sur desde el río Tordera hasta la población de Montgat. Estas playas están constituidas por arena gruesa y segmentadas en seis grandes células sedimentarias, a consecuencia de la construcción de puertos deportivos que impiden el transporte sedimentario longitudinal. El área de Barcelona se extiende desde el río Besòs hasta el río Llobregat (Puerto de Barcelona) y es una costa con playas artificiales formadas por arena de tamaño grueso. Se trata de playas urbanas, sin aporte natural de sedimentos y que deben ser mantenidas de forma artificial (Ojeda y Guillén, 2008). En definitiva, se han seleccionado tres playas para este estudio: Nova Icària y Bogatell, en la costa de Barcelona, y la playa de Santa Susana en la costa del Maresme. Son tres playas de tipología urbana, por estar próximas o incluso dentro del núcleo urbanizado y están muy integradas en el paisaje litoral.

La playa de Bogatell se extiende desde el espigón del Bogatell hasta el espigón de la Mar Bella. Tiene una longitud de 640 m y una anchura media en torno a 40 m antes de los temporales. La playa de Nova Icària ocupa desde el Port Olímpic hasta el espigón del Bogatell. Tiene una longitud de 400 m y una anchura media de 60 m. Esta playa cuenta con la presencia de dos estructuras que sirven de protección y contención de la arena; se trata del espigón de Nova Icària, paralelo a la playa y una prolongación del brazo sur del espigón dándole forma de diapasón de desagüe de Bogatell (brazo de Bogatell poniente), orientado hacia el Sur, y rematado en su morro con una losa circular de hormigón emergida (figura 1). Tanto la playa de Nova Icària como la de Bogatell, presentan una morfología regresiva pero es, en la segunda, donde encontramos una tendencia al retroceso en casos de temporal de levante y suroeste (Ojeda y Guillén, 2008).

La segunda zona analizada está situada en Santa Susana (Maresme), compuesta por las playas de Les Caletes y de Llevant (límitrofe con el municipio de Malgrat de Mar) (figura 1). La playa de Les Caletes está formada por un primer tramo de 550 metros de calas separadas por rocas, seguida de la playa de Llevant, paralela al paseo marítimo, de 650 metros de longitud; limita con la playa del Astillero (Malgrat de Mar). Tiene una anchura variable de entre 25 y 75 metros y una morfología abierta. Estas playas, no tienen la protección de espigones por lo que potencialmente son playas más vulnerables a la erosión y a la inundación de la playa emergente que las playas protegidas.

3 CARACTERIZACIÓN DEL TEMPORAL Y DEL OLEAJE

Este trabajo se centra en un evento concreto, ocurrido el día de San Esteban del año 2008. Ese día se dieron las condiciones meteorológicas favorables para que se produjera una situación de temporal excepcional. La situación sinóptica estaba caracterizada por un marcado anticiclón centrado en el norte de Europa con estabilidad atmosférica relativa en Cataluña (presiones de 1016 hPa). Las características meteorológicas más destacables fueron la dirección, el recorrido y la fuerza del flujo del viento. El gradiente de presión a nivel continental favorecía un flujo continuo de viento de componente este. Esto permitió que las olas adquirieran altura en su recorrido a través del Mediterráneo desde las costas de Córcega y el Norte de Italia hasta llegar a la costa catalana y se registró un temporal marítimo de gran magnitud. En los mapas del área del Mediterráneo podemos observar para las 18UTC cómo las olas más significativas se concentran en el área de la Costa Brava y disminuyen en altura en dirección SW.

La influencia de las olas en el litoral, sea por erosión o por deposición de sedimentos, es determinante en la morfología costera. Típicamente, la caracterización de un temporal marítimo se realiza a partir de la información de altura sobre la ola significativa (H_m0), altura de ola máxima (H_{max}) y periodo de pico (T_p). Se han utilizado los datos registrados en las boyas direccionales de los Deltas Llobregat y Tordera-Blanes localizadas a 45 y 74 metros de profundidad, respectivamente. Las boyas dependen de la Red de Instrumentos Oceanográficos y Meteorológicos (XIOM) de la Generalitat de Catalunya. Para nuestro estudio se han representado los datos horarios desde el 02/12/08 hasta el 30/01/09, para poder describir el temporal en un marco temporal amplio.

Las dos boyas registraron un máximo de 4,65 m en H_m0 . Podemos destacar que el día 28 la boyas de Tordera-Blanes señaló dos máximos de 3,0 y 2,75 m, y que se registraron valores de 1.5 m hasta 72h después del máximo anotado. Este evento excepcional también se caracteriza por ser un temporal largo. En el gráfico de H_{max} se aprecia un pico de más de 2,0 m entre los días 30 y 31 de diciembre (72h después del máximo registrado). La altura de ola máxima registrada fue de 7,31 m en la boyas de Blanes y de 7,99 m en la del Llobregat. Finalmente, los periodos de pico máximos observados fueron, de 14,3s y 13,3s en Tordera-Blanes y Llobregat, respectivamente (figura 2).

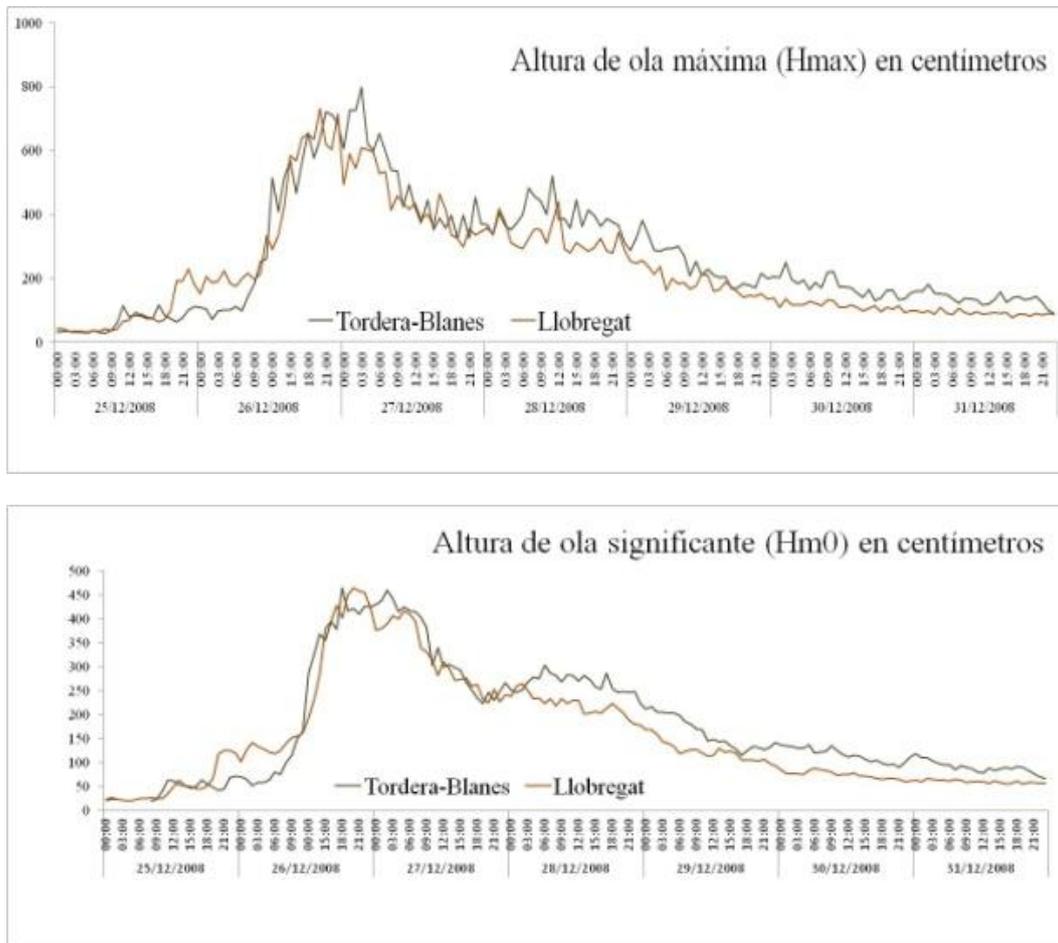


Figura 2. Altura de ola máxima (H_{max})-arriba,- y significativa (H_{m0})-abajo-, registradas del 25 al 31 de diciembre de 2008. Datos de las boyas de Tordera-Blanes y Llobregat

4 METODOLOGÍA

La utilización del lidar en el análisis de los cambios morfológicos de la costa proporciona datos de alta resolución y precisión y pueden ser obtenidos con gran rapidez. Al ser un sensor activo, existe la posibilidad de trabajar de noche y resulta muy apropiado para áreas de bajo relieve y con poca textura como las playas, condiciones en las cuales la fotogrametría tiene dificultades. También proporciona información sobre cambios en la costa después de temporales severos de manera casi inmediata, pudiéndose obtener la cartografía del área.

4.1 LIDAR (Light Detection and Ranging)

El lidar aerotransportado es un sistema de teledetección basado en la medida de distancias con un láser que emite pulsaciones y realiza un barrido de la superficie terrestre para obtener una nube de puntos sobre el terreno. Se caracteriza por la rapidez en la obtención de datos, la alta

resolución y su precisión (Ruíz, 2008). Esta técnica se ha utilizado para el estudio de daños sobre estructuras urbanas (diques, puertos, paseos marítimos), en el control de cambios en la línea de costa, así como en el estudio de la dinámica sedimentaria en playas. La captura de datos lidar utilizados en este estudio se realizó con un sensor Leica ALS50-II, propiedad del ICC. Emplea un láser infrarrojo y, por tanto, no hay penetración del rayo en el agua. El ICC realiza un vuelo anual de la costa catalana y se realizan vuelos adicionales si se producen temporales excepcionales. Este estudio se ha realizado con datos capturados en los vuelos ordinarios correspondientes a los años 2008 y 2009 y con un vuelo realizado a comienzos de 2009 correspondiente al temporal que se produjo entre el 26 y el 29 de diciembre de 2008. Los datos corresponden a dos vuelos para cada área de estudio. Anteriores al temporal de 03/11/08 para Barcelona y de 16/10/08, Maresme, y posttemporal de 17/01/09 para ambas zonas. También, en el área del Maresme, se ha

dispuesto de datos posteriores, obtenidos el 17/08/09.

4.2 Tratamiento de datos

Para reducir los errores sistemáticos debidos a la orientación directa se realizó un ajuste de las pasadas lidar con campos de control siguiendo el procedimiento habitual del ICC (Kornus *et al.* 2003). Para ello se utilizaron campos de control y pasadas adicionales, a las que denominamos transversales, pertenecientes al proyecto LidarCat que cubre con lidar toda Catalunya. Cada uno de los campos de control dispone de unos 40 puntos medidos con GPS-RTK que tienen una precisión de 2 ó 3 cm. Las pasadas transversales, que se han utilizado en el ajuste, pasan sobre estos campos y se cruzan con las pasadas correspondientes a la costa. Mediante un ajuste por mínimos cuadrados se ha calculado para cada pasada lidar una corrección vertical que minimiza las diferencias en las áreas de solapamiento (Ruiz, 2009). Algunos de los campos de control no se utilizaron en el ajuste y se reservaron como campos de comprobación para tener una estimación de los errores. En el ajuste, para la época 2008, se utilizaron 65 pasadas, de las cuales 22 eran transversales, 18 campos de control y 16 campos de comprobación. El error sigma de esos campos de comprobación fue de 3,1 cm, con un error máximo de 5,5 cm (Ruiz *et al.*, 2010).

Los puntos lidar se clasificaron de manera automática con TerraScan de Terrasolid (<http://www.terrasolid.fi>) que emplea el algoritmo de triangulación incremental de Axelson (Axelson 1999, 2000). Con los puntos clasificados como terreno se generó un modelo de malla irregular de triángulos (TIN) mediante una triangulación de Delaunay. Los puntos situados sobre la superficie del agua también fueron clasificados como terreno. Se utilizó TerraModeler, también de Terrasolid, para convertir el modelo TIN en un modelo del terreno de malla regular (DEM) con paso de 1 m para cada una de las épocas. Para hacer la interpolación este programa considera que las caras de los triángulos son planas.

En el análisis espacial se ha empleado la herramienta ArcGIS/ArcMap 10 como Sistema de Información Geográfica que permite el proceso de datos espaciales y la elaboración de documentos cartográficos a través del procesado digital.

Dado que uno de los objetivos fue cuantificar el volumen de material erosionado y sedimentado después del temporal, sólo nos interesan aquellos valores de píxel que corresponden al área de playa. Se debe delimitar el área de estudio creando un polígono vectorial a partir del cual se desarrolla el análisis y la cuantificación de la variación morfológica

Se utilizaron las ortofotos para delimitar el límite superior de la playa, asumiendo que más allá de este límite no deben ocurrir cambios morfológicos asociados al temporal. Las fechas de los vuelos lidar y de las ortofotos utilizadas no coinciden exactamente, pero esto no es un inconveniente a la hora de definir el límite dinámico de las playas. Principalmente, se ha trabajado a E: 1/2.500, y a E: 1/5.000 para el área de Santa Susana (16/10/08).

4.3 Límites de las playas (interior e inferior)

La definición de los límites de las playas de Barcelona no ha presentado dificultad porque quedan definidos por los espigones que separan las playas de Nova Icaria y Bogatell y el Puerto Olímpico de Barcelona. La parte interior de las mismas queda definida por el Paseo Marítimo, en nuestro caso paralelo a las playas. Más compleja ha sido la delimitación del litoral de Santa Susana, porque no hay una definición perfectamente clara de sus límites. El trazado seleccionado está ocupado de forma heterogénea a lo largo de toda el área por un camping, varias infraestructuras hoteleras, zonas habilitadas como aparcamiento y una zona residencial. Se incluyeron en el área a investigar zonas de vegetación rala dado que el lidar atraviesa la vegetación y proporciona puntos sobre la superficie del terreno. En aquellas zonas donde fue posible se marcó el límite de la playa en el paseo marítimo. Para la definición del límite inferior de la playa, zona de *swash*, utilizamos un intervalo comprendido entre las cotas de 0,30 y los 0,10 metros. Esta es una zona importante porque nos define las variaciones temporales que dependen de la llegada de la ola a la zona de *swash*.

4.4 Análisis con ArcMap

Se ha extraído una máscara ráster para cada uno de los polígonos vectoriales que nos ha permitido aislar el área que nos interesa analizar del total de la capa ráster. El resultado son dos capas ráster, una pretemporal y otra posttemporal, para cada una de las zonas de estudio, además de una tercera correspondiente a la playa de Santa Susana con los datos correspondientes a unos meses después del temporal.

Para analizar con mayor detalle los cambios morfológicos se utilizó la herramienta *Cutfill* de ArcGIS *Spatial Analyst* que calcula los volúmenes de material ganados y perdidos y las áreas en donde se ha producido la ganancia o pérdida de material. El resultado es el volumen de sedimento ganado o perdido únicamente de las áreas donde se ha producido erosión o acreción. En el proceso se añade un nuevo

campo en la tabla de atributos vectorial y se edita para la campaña correspondiente. Fue necesario aislar previamente las áreas de interés para no contabilizar como cambio las diferencias que aparecen en los modelos pre y en zonas muy irregulares o con grandes pendientes, como los espigones. Se hizo con la herramienta *overlay* que permitió calcular la intersección geométrica de cada uno de los modelos de entrada con el área de interés. Esto nos permite detectar aquella información correspondiente a los cambios de un año respecto al otro pudiendo obtener una nueva capa vectorial con dos polígonos superpuestos con información pre y posttemporal.

En el último paso se selecciona cada polígono teniendo en cuenta la campaña y se edita creando una nueva capa vectorial que sólo contiene datos de la parte seleccionada que corresponde a un momento pretemporal. Volvemos a repetir el mismo paso de extracción de máscara para poder ejecutar el análisis espacial. Este proceso se realiza en las tres playas pre y posttemporal.

Finalizada la operación de tratamiento se lleva a cabo el análisis de los cambios volumétricos para, de este modo, completar la cuantificación. Hay que tener en cuenta que solo podemos evaluar una cota mínima, porque no podemos contabilizar los cambios producidos en las zonas cubiertas con agua debido a que este lidar no penetra en el agua. El análisis se aplica a un plano de referencia por encima de los 0 metros. Con ArcGIS obtendremos el área y el volumen de acreción y erosión, así como el área y perímetro total de los polígonos en donde se ha producido acreción o erosión.

4.5 Parámetros morfológicos

Además de cuantificar los cambios de volumen, se definen tres parámetros morfológicos que pueden ser de utilidad para el análisis de la vulnerabilidad costera en las áreas objeto del estudio. Se ha definido la **cota máxima** de cambios morfológicos significativos, que indica el límite superior de la playa seca donde el impacto de las olas llega a causar una variación morfológica significativa y que, de forma indirecta, da información sobre la vulnerabilidad de la playa inundada y la **variación de la línea de costa**, que cuantifica la variabilidad del límite inferior de la playa. En el proceso utilizamos las capas vectoriales que hemos creado anteriormente. En ellas se observan los límites superiores que nos muestran la vulnerabilidad de la playa ante un nuevo episodio de temporal excepcional con las mismas características de oleaje.

Otro de los parámetros analizados se centra en los cambios morfológicos en **el perfil de**

playa. La diferencia entre los modelos del terreno con datos pretemporal y posttemporal en la playa de Santa Susana (que es la que presenta más variaciones a lo largo del área analizada) permite identificar las áreas donde se ha producido un cambio de volumen, sea erosión o acumulación. Se han seleccionado tres perfiles en lugares que aparecen como significativos entre el extremo sur de la playa, el centro y el extremo norte, con el objetivo de determinar el balance sedimentario en perfiles de playa que presentan una acumulación de sedimento en su parte inferior. Estos perfiles se trazan desde el límite superior hasta el límite inferior de la playa, para obtener una visión integrada de los cambios de comportamiento que se han originado.

Finalmente, se ha analizado **la pendiente**, que proporciona información de la morfología a través de los cambios de pendiente ocasionados por el temporal. A partir de las capas ráster originales se crean nuevas capas para mostrar la pendiente de la playa.

5 RESULTADOS

5.1 Variación de la línea de costa y análisis de volúmenes

Los cambios en el volumen de la playa emergida y la variación de la línea de costa se calculan por la resta de mallas de los datos post y pretemporal y se representan en mapas con una escala de valores donde el azul representa acreción y el rojo erosión.

Las playas de Barcelona han tenido un comportamiento basculante debido a los efectos del temporal. En la playa de Nova Icària este basculamiento se traduce en erosión hacia la mitad sur de la playa y acreción en el norte. El punto de pivotaje de este basculamiento está ligeramente desplazado hacia el sur de la parte central de la playa. En la playa de Bogatell, la basculación tiene un comportamiento opuesto a Nova Icària, con acreción en el sur y erosión hacia el norte de la playa (figura 3). La playa de Santa Susana ha experimentado procesos de erosión y acreción en diferentes sectores a lo largo de la playa. En esta playa se ha observado que en determinadas zonas la erosión de la línea de costa está acompañada por la acumulación de sedimento en la parte superior del perfil de playa (figura 4).

Todas las playas presentan una pérdida de volumen después del temporal. La mayor pérdida de volumen de arena tiene lugar en la playa de Bogatell (13,168 m³), seguida de Santa Susana (6,689 m³) y de Nova Icària (3,408 m³), aunque en términos relativos respecto a la longitud de la playa representan pérdidas de 10,89 m³/m, 3,1 m³/m y 1,4 m³/m respectivamente. Finalmente, la playa de Santa Susana experimenta una

recuperación después del temporal, con un aumento de volumen de $5.1 \text{ m}^3/\text{m}$ entre enero y agosto de 2009, de tal forma que el volumen final de la playa es superior al medido antes del temporal (figura 5). Puesto que no se han realizado aportaciones artificiales de arena durante este período, este crecimiento del volumen de arena debe estar relacionado con los aportes procedentes de la deriva litoral.

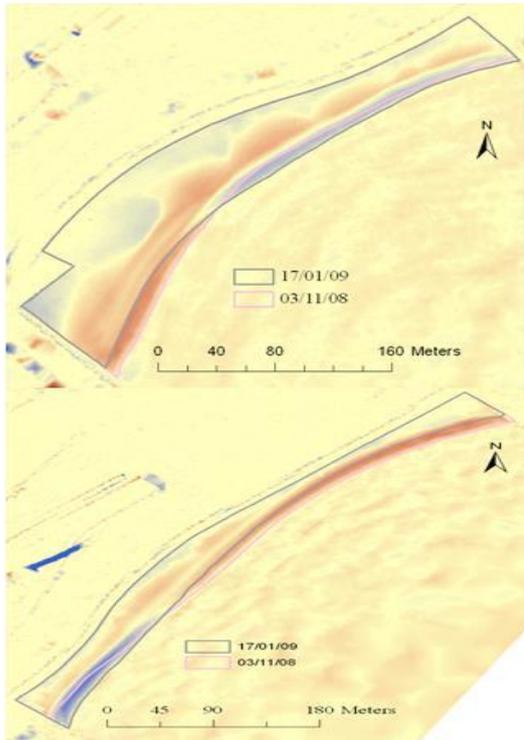


Figura 3. Variación de la línea de costa en las playas de Nova Icaria (arriba) y Bogatell (abajo). Estos cambios se representan con una paleta de colores que asocia el color rojo con la pérdida de sedimento y el azul con la sedimentación.

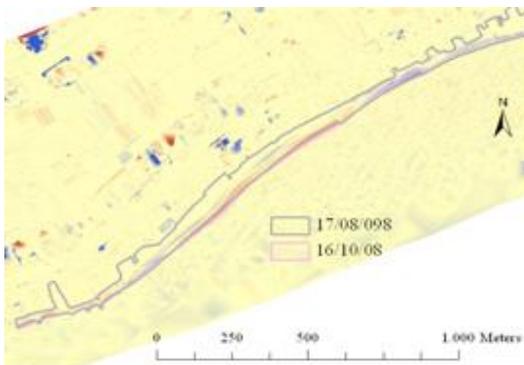


Figura 4. Variación de la línea de costa en la playa de Santa Susana con acumulación de sedimento en la parte superior del perfil de playa.

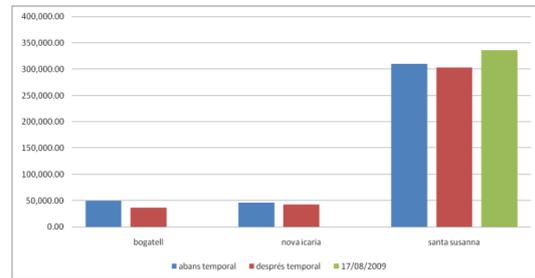


Figura 5. Gráfico comparativo del cálculo de volumen. Bogatell (Izda.), Nova Icaria (centro) y Santa Susana (Dcha). Datos representados en azul para pretemporal, en rojo para posttemporal y verde para datos de agosto de 2009 en Santa Susana.

5.2 Variación de la pendiente de la playa

Las variaciones en la pendiente de las playas están estrechamente relacionadas con los cambios volumétricos en la playa emergida. En la playa de Bogatell se observan cambios significativos de la pendiente en los dos extremos de la playa. De tal forma que la pendiente se suaviza en la parte acrecional (sur) y aumenta en la parte erosional (norte). En la playa de Nova Icaria, se observan cambios de la pendiente en la zona central y norte de la playa. La pendiente presenta cambios poco significativos hacia el sur de la playa; en cambio, la pendiente aumenta en la zona central, justo en el punto de pivotaje del basculamiento de la variación de la línea de costa. En las zonas donde hay acreción la pendiente queda suavizada. En el caso de la playa de Santa Susana se observa un cambio significativo en la pendiente a lo largo de la línea de costa, en general con un aumento de la pendiente después del temporal. No obstante, los cambios de pendiente son muy irregulares a lo largo del perfil de playa.

5.3 Cambios morfológicos en el perfil de playa

La diferencia entre los modelos del terreno con datos pretemporal y posttemporal en la playa de Santa Susana permite identificar las áreas donde se ha producido un cambio de volumen, sea erosión o acreción. Se han seleccionado tres perfiles significativos en el sector sur de la playa, la parte central y en el sector norte, con el objetivo de determinar el balance sedimentario en perfiles de playa que presentan una acumulación de sedimento en su parte interior.

La comparación entre los perfiles de la playa de Santa Susana, de la zona sur de la playa (figura 6, perfil 1), indica que la morfología antes del temporal estaba caracterizada por un escarpe en la parte alta de la playa, seguido por un

trazado más suave y con una berma hasta la línea de mar. El perfil de la playa después del temporal nos muestra la destrucción de los elementos morfológicos previos. En la parte superior de la playa desaparece el escalón como consecuencia de la acumulación de sedimento dando lugar a un relieve de pendiente más suave. Por el contrario, en la parte inferior del perfil se observa una fuerte erosión y una pendiente más acentuada hasta llegar a la línea de costa. El cambio morfológico después del temporal muestra que se produce acreción en la parte superior de la playa y erosión en la parte inferior de la misma.

En el perfil de la zona central (figura 6, perfil 2) se observa un perfil previo al temporal con un escarpe de pendiente suave desde la parte superior de la playa hasta encontrar una primera berma con una pendiente pronunciada y una

segunda berma hasta el límite inferior de la playa. Después del temporal se identifica una acumulación de sedimento en la parte superior del perfil, erosión parcial de la berma anterior y la formación de una nueva berma con dos escarpes de fuerte pendiente. Las diferencias entre el perfil anterior y posterior al temporal permiten interpretar una sucesión de eventos de acumulación/erosión y erosión/acumulación a lo largo del perfil de playa.

En el perfil representativo del sector norte de la playa (figura 6, perfil 3) observamos que antes del temporal existía un escarpe suave con berma hasta llegar al límite inferior de la playa. Después del temporal, se ha formado un nuevo escarpe y la berma ha perdido elevación con una pendiente suave hasta el límite inferior. El cambio morfológico muestra una sedimentación y una erosión que suavizan la pendiente del escalón.

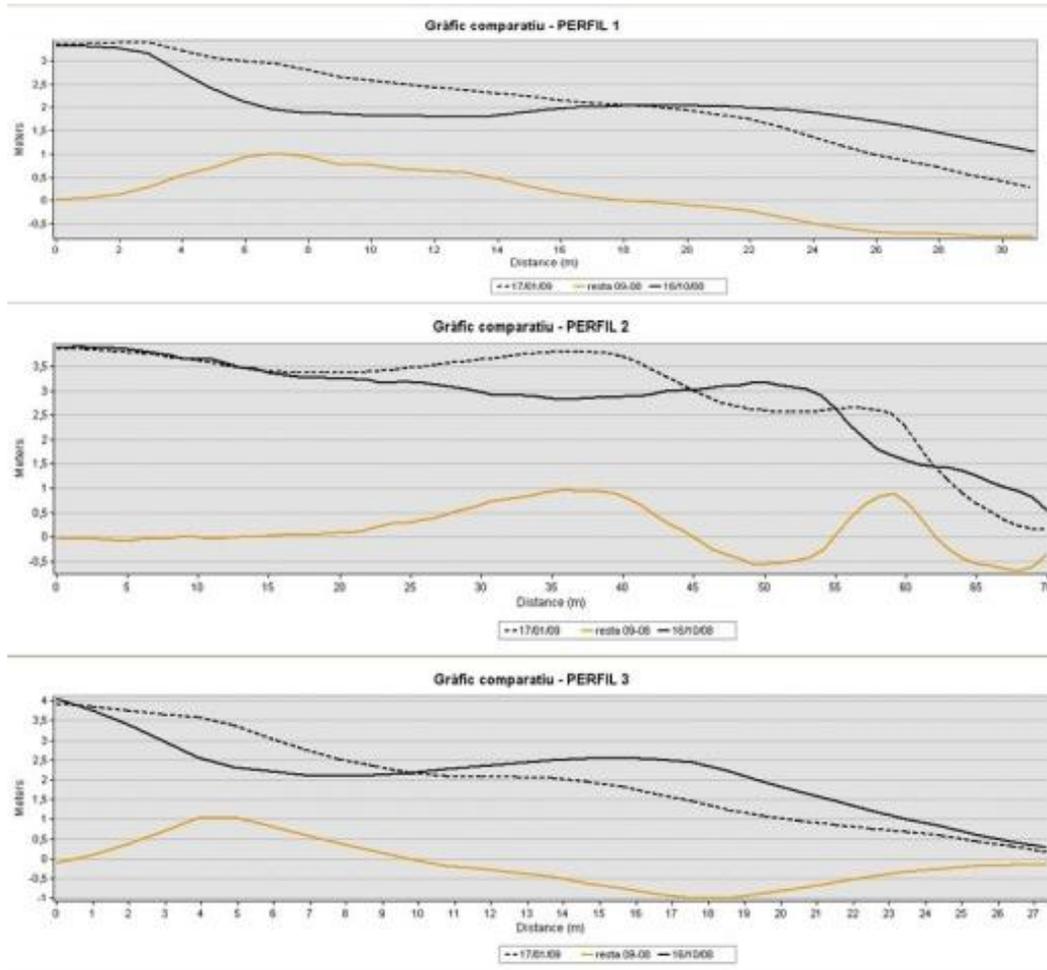


Figura 6. Perfiles de la playa de Santa Susana. Perfil 1 (arriba) de la zona sur de la playa. Perfil 2 (centro) de la zona central de la playa. Perfil 3 (abajo), de la zona norte. Resultados pretemporal, línea negra continua, posttemporal, línea discontinua y la diferencia se presenta en línea continua naranja.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se valida el sistema de teledetección lidar como una técnica adecuada para el estudio de los cambios morfológicos en playas antropizadas y se demuestra que puede ser una herramienta útil para el análisis de los riesgos naturales que ocurren en la franja costera. Respecto a la fotografía aérea, el lidar ofrece las ventajas de permitir la aplicación del análisis volumétrico y la obtención de información topográfica. En este trabajo se ha puesto de manifiesto la importancia de desarrollar protocolos de análisis apropiados puesto que los resultados obtenidos con lidar pueden ser diferentes en función del método aplicado. Por este motivo, este estudio desarrolla y propone la utilización de un protocolo metodológico para optimizar el análisis de los datos lidar.

Se ha aplicado la técnica lidar para evaluar los cambios morfológicos provocados por un temporal de alta energía en tres playas del litoral catalán. Los parámetros que se han analizado son la cota máxima de afectación, los cambios en la línea de costa, cambios de pendiente y cambios en el perfil de playa, de los que se han extraído las variaciones volumétricas. Estos parámetros son de utilidad para la evaluación de la erosión e inundación de las playas afectadas por un temporal. La técnica lidar también ha permitido el análisis de los elementos morfológicos situados en la playa. Se ha observado la formación de escarpes y bermas en la playa de Santa Susana que originan cambios en la pendiente.

El temporal de Sant Esteve de 2008 con un periodo de retorno de 10 años es un excelente ejemplo para la evaluación del impacto de los temporales sobre la costa catalana y para evaluar la utilidad de los datos lidar para el estudio de los riesgos litorales.

Las tres áreas de estudio presentan variaciones de la línea de costa, pendiente y cambios volumétricos después del temporal. Las playas más protegidas, Nova Icària y Bogatell, han tenido un comportamiento basculante en la variación de la línea de costa (erosión/acreción) debido a los efectos del transporte longitudinal de sedimento.

En las playas analizadas se han observado cambios morfológicos significativos desde la línea de costa hasta la cota de los 4 metros. La playa de Santa Susana es la que ha sufrido menos erosión y de manera más irregular a lo largo de la línea de costa, aunque es la que presenta una morfología más abierta y por lo tanto está más expuesta a los fenómenos naturales. En contra, la playa del Bogatell protegida por espigones, es el área de estudio

que presenta una erosión más intensa después del temporal.

Las tres playas perdieron volumen de sedimento a causa del temporal. La pérdida de arena de las playas corresponde a un porcentaje respecto al volumen total inicial de Bogatell, Nova Icària y Santa Susana del 26,6%, 7,4% y 2,2%, respectivamente. Bogatell es la que presentó una pérdida más severa de sedimento hasta el punto de perder gran parte de la franja superior del sector norte de la playa. En las tres playas se observó que las pendientes son más pronunciadas donde hay erosión y se suavizan cuando hay acreción en la línea de costa.

La importancia de los procesos que suceden en la parte superior de la playa para la comprensión de la dinámica sedimentaria de la playa también se ha puesto de manifiesto en este estudio. Por ejemplo, se ha observado acreción en la parte superior de la playa de Santa Susana, probablemente como consecuencia del transverse de la arena erosionada en la línea de orilla hacia la parte superior del perfil durante el temporal.

En el futuro, la sistematización de la obtención de datos lidar y su análisis permitirán un conocimiento cuantitativo de precisión de toda la franja costera catalana para una correcta gestión de los riesgos naturales asociados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado como tesina final de maestría por un convenio de prácticas con el Departamento de Geología Marina del ICM-CSIC, así como también, gracias al acceso a datos, tanto de oleaje como de datos lidar, cedidos por el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya y del Institut Cartogràfic de Catalunya, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Axelsson P. 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and applications, *ISPRS, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 138-147.
- Axelsson P. 2000. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, Netherlands 32,B4/1, 110-117.
- Ojeda, E. y Guillén, J. 2008. Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology*, 253, 51-62.
- Kornus W. y Ruiz A. 2003. Strip Adjustment of LIDAR Data, *V Semana Geomática de Barcelona*, Barcelona.

- Ruiz, A. 2009. Aplicaciones del Lidar i Fonaments dels Lidar, Altímetre láser, 8 anys d'experiència a l'ICC, *Institut Cartografia de Catalunya* (comunicación oral).
- Ruiz, A., Kornus, W. y Talaya, J. 2009. Coastal applications of lidar in Catalonia. *6th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems*, Munich, Alemania.
- Ruiz, A. 2010. ALS Processing at the Institut Cartogràfic de Catalunya. *1st European Lidar Mapping Forum*. Den Haag, Netherlands. 30.11.2010 – 1.12.2010 (comunicación oral)