

ARTÍCULO

Evolución de médanos costeros del Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, costado este del río Magdalena, Caribe colombiano

Evolution of the Coast sand dune system of the Salamanca Island National Natural Park, the Magdalena River Eastern side, Colombian Caribbean

Fecha recepción: 2009-06-16 / Fecha aceptación: 2009-10-28



Andrés Felipe Carvajal Díaz, andresfcarva@hotmail.com

Fernando Afanador Franco, FAfanador@cioh.org.co

Johanna Paola Echeverry Hernández, paolechhe@gmail.com

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, Cartagena de Indias, D.T. y C.

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización morfométrica tridimensional y la evolución de los sistemas de médanos en el Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, costado este del río Magdalena (departamento del Magdalena) en el Caribe colombiano. Los análisis efectuados incluyeron una estimación de los cambios superficiales de los médanos (4.24 m/año de retroceso) que tuvieron lugar entre los años 2005 y 2008 con base en la información de los modelos digitales de terreno (MDTs) obtenidos con el sensor LiDAR, así como una evaluación de la tasa de retroceso de la línea de costa calculada con fotografías aéreas del año 1961 y el ortofotomosaico del año 2008 (5.70 m/año). Por último, se realizó una estimación del volumen de arena correspondiente a los médanos activos en un sector específico para los años 2005 y 2008 y se cuantificó el balance volumétrico mediante una diferencia de MDTs.

Palabras claves: Médanos, Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, LiDAR, MDTs, SIG.

Abstract

In this paper, results of the three-dimensional morphometric characterization and the evolution of the sand dune systems (in the Salamanca Island National Natural Park), East shore of Magdalena River (department of Magdalena) in the Colombian Caribbean. The analyses carried out included an estimate of the superficial changes of the dunes (4.24 m/year of falling behind rate) that had taken place between the years 2005 and 2008 based on the digital field information (DTMs) obtained with the LiDAR sensor, as well as an evaluation of the falling behind rate of the coastline based on aerial photographs from 1961 and the ortho-photospectrum from 2008 (5.70 m/year). Finally, an estimate of the sand volume corresponding to the active dunes in a specific sector from 2005 and 2008, and the volumetric balance, was quantified through a DTMs difference.

Key words: Sand dune, Salamanca Island National Natural Park, LiDAR, DTMs, GIS.

Introducción

El sistema de médanos activos del Parque Nacional Natural Isla de Salamanca (costado este del río Magdalena, en inmediaciones a su desembocadura al mar Caribe) no ha sido objeto de estudios detallados relacionados con su formación y evolución, de tal forma que permitan entender la naturaleza y características de estos terrenos. En este sentido, el estudio y análisis cuantitativo del sistema de médanos costeros es un elemento fundamental para el entendimiento de la dinámica litoral, ya que constituye una defensa natural ante el ataque del oleaje y las corrientes.

Los médanos costeros son formas terrestres eólicas que se desarrollan en la costa en situaciones en donde existe una amplia disponibilidad de sedimento suelto o no consolidado y que está disponible para ser transportado hacia el continente por el viento. Forman parte de la transición entre el mar y el continente y normalmente, se encuentran distribuidos y asociados a playas arenosas, produciendo un amplio rango de formas costeras relacionadas con cambios espacio-temporales en la disponibilidad de sedimento y el régimen de vientos [1]. Los principales factores que afectan el desarrollo de los campos de médanos y que influyen en su sucesión ecológica y geomorfológica, son los cambios temporales en el clima, cambios temporales en el mar, modificaciones en el suministro de arena y las variaciones causadas por la acción del hombre y de los animales [2].

Una de las más sobresalientes características de los ecosistemas de médanos es su amplia distribución y diversidad ecológica (en términos de dimensiones geomorfológicas, heterogeneidad ambiental y variabilidad de especies). No obstante lo anterior, muchos ecosistemas de médanos han sido severamente degradados como resultado de una explotación excesiva de los recursos naturales, expansión demográfica caótica y crecimiento industrial [1].

Debido a la necesidad de identificar de forma clara y exacta los procesos naturales que se desarrollan en el litoral del departamento del Magdalena, se planteó como problema a resolver, la falta de información detallada sobre la evolución de los sistemas de médanos del Parque Nacional Natural Isla de

Salamanca, costado este del río Magdalena, su formación, sus procesos y su dinámica, de tal forma que se cuente con suficientes elementos técnicos y científicos que permitan sustentar la naturaleza y características de estos terrenos para fines de control y administración por parte de la Autoridad Marítima Nacional. El resultado final de la investigación consistirá en una caracterización morfométrica tridimensional, así como el análisis de la dinámica sedimentaria volumétrica de los sistemas de médanos en un sector específico del área de estudio.

Por estas razones y dado que la mejora y generalización de diferentes fuentes de información geográfica (aerofotografías digitales y escaneo láser, especialmente), así como de herramientas para su tratamiento, han supuesto un significativo relanzamiento y una importante renovación de los estudios del medio físico y particularmente, de aquellos que tienen como escenario las zonas costeras [3], [4], [5], se adelantó la presente investigación. Gran parte de estos avances guardan relación con la tradicional pobreza, tanto en número como en calidad, de las fuentes de información disponibles para estos entornos. En el caso concreto de los médanos costeros, los problemas vinculados a las fuentes de información espacial tradicionales, pueden resumirse en tres aspectos fundamentales [6]:

- Problemas para el cubrimiento de grandes extensiones en sistemas que suelen requerir de tratamientos integrales desde el punto de vista espacial.
- Problemas vinculados a la precisión geométrica, sobre todo en el caso de la variable altura, en formaciones donde la escala de detalle es fundamental.
- Problemas vinculados a la actualización de la información, al ser sistemas de un gran dinamismo.

El área de estudio se encuentra localizada dentro del Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, costado este del río Magdalena, en inmediaciones a su desembocadura al mar Caribe, en el departamento del Magdalena (figura 1). Geográficamente, se encuentra entre las coordenadas 11° 06' 17.490"N y 74° 50' 55.710"W y entre los 11° 05' 57.300"N y 74° 49' 57.560"W.

Los médanos mejor desarrollados en todo el parque se presentan como montículos arenosos agrupados de forma alargada y paralelos a la dirección prevaleciente del viento, es decir, noreste (figura 2). Se encuentran limitados hacia el mar por las playas y se extienden hasta el continente, a través de zonas inundables y ciénagas, que se amontonan frente al manglar.

En este sector se presentan médanos de sombra que se forman por acumulación de arenas detrás de un obstáculo vegetal, permitiendo su crecimiento a sotavento de aquella. El frente de manglar constituye el obstáculo al avance de los médanos, provocando mayor acumulación de arenas frente al mismo y es el lugar donde su altura máxima es de 1.5 m [7].

Una faja pequeña de médanos activos son formados debido a un obstáculo vegetal que bordea toda la costa del parque destacándose grandes médanos estabilizados en el sector oriental adyacente a la ciénaga Cuatro Bocas, las cuales alcanzan alturas de hasta 5 m; se trata de médanos de tipo parabólico longitudinal, limitados hacia el interior por llanuras de manglar muerto, indicando que se desarrollaron como un amontonamiento de arena contra el frente costero del manglar, penetrando como grandes lenguas en las partes más débiles del último. Principalmente se encuentran como un cinturón de médanos estabilizados que bordean la línea de costa y retroceden junto con ella, por efectos de la erosión marina [8], [9].

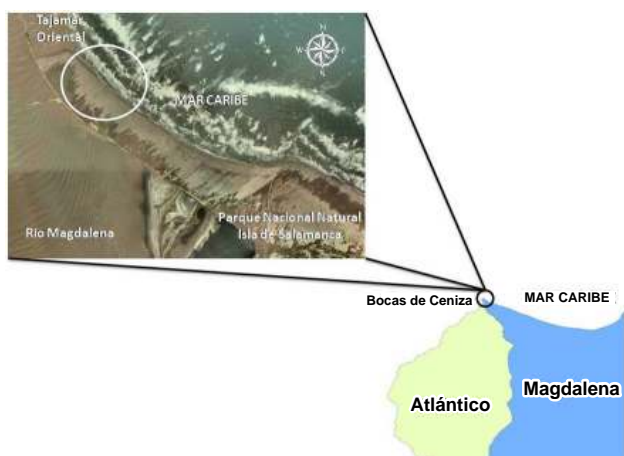


Figura 1. Localización del área de estudio en el Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, costado este del río Magdalena, departamento del Magdalena. El recuadro blanco indica el sector específico del área de estudio en donde se realizó el análisis volumétrico.



Figura 2. Panorámica de los médanos costeros desarrollados en el costado este del río Magdalena, pertenecientes al Parque Nacional Natural Isla de Salamanca (departamento del Magdalena).

Materiales y métodos

La realización de la caracterización morfométrica tridimensional y el análisis de la evolución del sistema de médanos del Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, costado este del río Magdalena, se llevó a cabo utilizando ortofotografías digitales de los años 2005 y 2008, fotografías aéreas de años anteriores del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y datos del sensor LiDAR - Light Detection and Ranging (figura 3).

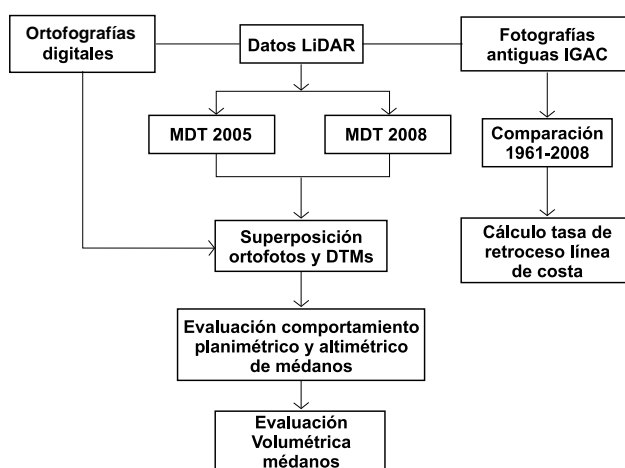


Figura 3. Flujograma de actividades para el análisis de la evolución de los médanos en el Parque Nacional Natural Isla de Salamanca, costado este del río Magdalena.

Con base en los datos LiDAR filtrados correspondientes al terreno (suelo desnudo), se generaron los correspondientes modelos digitales del terreno (MDTs) para los años 2005 y 2008. Dado que los datos LiDAR y las ortofotos digitales comparten el mismo sistema de referencia (dátum MAGNA-SIRGAS, origen MAGNA-Central), se superpusieron digitalmente posibilitando, de esta manera, la visualización tridimensional del terreno, lo que constituyó un valioso recurso para la interpretación geomorfológica de la zona de estudio.

Como primera cuantificación de la dinámica de los médanos de la zona de estudio, se utilizaron los MDTs de los años 2005 y 2008 y a través de las funciones del SIG (aplicación DSAS® - Digital Shoreline Analysis System), el empleo del método de transectos y el ajuste por mínimos cuadrados, se estableció la tasa de retroceso/avance de los frentes de médanos en el período 2005-2008.

Complementariamente y dada la disponibilidad de material aerofotográfico de años anteriores a 2005 (vuelo IGAC C-986 del año 1961), se georeferenció dicho material con base en las ortofotografías digitales de la zona de estudio y se efectuó un análisis comparativo del comportamiento de la posición de la línea de costa en el período 1961-2008. A través de la utilización, nuevamente del método de transectos, se estimaron las tasas de retroceso/avance de la línea de costa.

Adicionalmente, con base en los datos LiDAR de terreno y a través de las funciones de análisis espacial del software MARS®, se efectuaron perfiles altimétricos en sitios representativos del área de estudio, con el fin de evaluar el comportamiento de los médanos en los dos años (2005 y 2008). Otra aplicación de la información obtenida por el sensor LiDAR, consiste en la explotación directa de los MDTs como fuente de información para el análisis volumétrico y diacrónico (balances sedimentarios de un área representativa de la zona de estudio). Con ello, se obtiene una cuantificación volumétrica, permitiendo apreciar el comportamiento de los médanos en dicho periodo. Para realizar este análisis, se estableció un área representativa de la zona estudiada, restringiendo el MDT sólo a los datos de terreno pertenecientes a ésta, buscando con esto excluir los datos de otras geoformas y/o

infraestructuras presentes en el terreno para llevar a cabo el cálculo del volumen de sedimento de médanos para dos años diferentes.

Resultados

La aplicación de la metodología propuesta en la presente investigación, permitió en primer lugar, la generación de los modelos digitales del terreno del área de estudio para los años 2005 y 2008. Los ortofotomosaicos digitales y los modelos digitales del terreno se ilustran en las figuras 4 a 7. Los colores representan las diferentes alturas elipsoidales del terreno en el sector de estudio. En la figura 8C el color rojo indica el rango correspondiente a las alturas de los médanos activos: -7 a -6.5 m referidos al elipsoide WGS-84 para el año 2008 y el color naranja, indica los médanos activos: -7 a -6.5 m referidos al elipsoide WGS-84 para el año 2005.



Figura 4. Ortofotomosaico del Parque Nacional Natural Isla de Salamanca (costado este del río Magdalena), año 2005.



Figura 5. Ortofotomosaico del Parque Nacional Natural Isla de Salamanca (costado este del río Magdalena), año 2008.



Figura 6. Modelo digital del terreno costado Este del río Magdalena, generado a partir de datos obtenidos por el sensor LiDAR en el año 2005. El rango de colores de la izquierda representa la altura elipsoidal del terreno en cada punto.

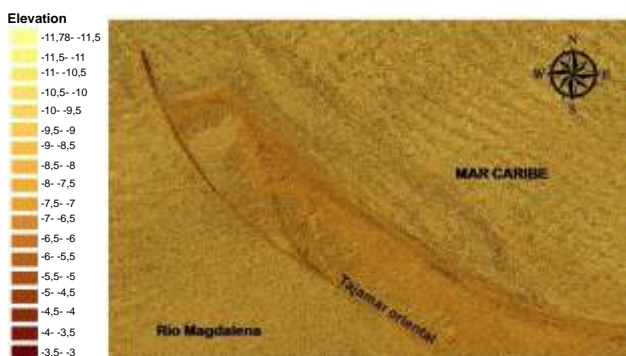


Figura 7. Modelo digital del terreno costado este del río Magdalena, generado a partir de datos obtenidos por el sensor LiDAR en el año 2008. El rango de colores de la izquierda representa la altura elipsoidal del terreno en cada punto.

Al realizar las comparaciones y mediciones entre las distintas fechas, se efectuó una evaluación de las tasas de retroceso de los frentes de médanos en los dos años considerados (figura 9). La tasa de retroceso de los frentes activos para el período 2005 a 2008 fue de 4.24 m/año (figura 10). Este hecho, generalizable a todo el sistema, es una de las señales más claras que apuntan

hacia un progresivo y lento retroceso de los médanos, cuyas causas están aún por determinar.

Por otra parte, con base en la información proveniente del vuelo IGAC C-986 del año 1961 (figura 11), se efectuó una comparación con el ortofotomosaico del año 2008, lográndose un periodo de estudio de 47 años. Se cuantificó el retroceso de la línea de costa (5.70 m/año) al parecer, debido a la fuerte dinámica marina del sector (figura 12).

Con base en los datos LiDAR de los años 2005 y 2008 se seleccionó un transecto representativo del área de estudio, en el cual se realizó un perfil altimétrico con el fin de evaluar el comportamiento de los médanos para los dos años. Las figuras 13A y 13B muestran respectivamente, el comportamiento altimétrico de los dos años, en donde se observa que la máxima altura elipsoidal del cordón de médanos activos de dicho transecto fue de -6.47 m y de -6.56 m respectivamente (alturas elipsoidales referidas al WGS-84). La suma de ambos procesos se traduce en un estrechamiento general de los cordones de médanos. La figura 13C muestra una síntesis de los procesos más generalizados en la evolución de los cordones de médanos. De manera complementaria, en la figura 14 se ilustran los resultados del análisis volumétrico en un sector específico del área de estudio.

En este caso concreto, los resultados evidencian un cambio en el comportamiento de los médanos y de la línea de costa en el periodo estudiado. Este cambio supone una disminución del área de intercambio sedimentario entre las zonas de acumulación y las zonas de deflación. Las zonas de acumulación, en la parte superior de los médanos, sufren un estrechamiento causado por las tasas de retroceso de los frentes. Las zonas de deflación, por su parte, también muestran una reducción general, traducida en la mayor convexidad de las pendientes en las caras de barlovento del cordón de médanos.

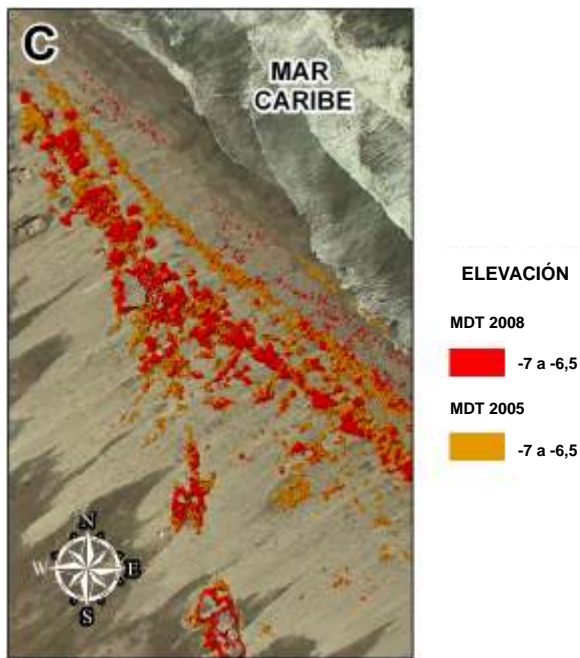
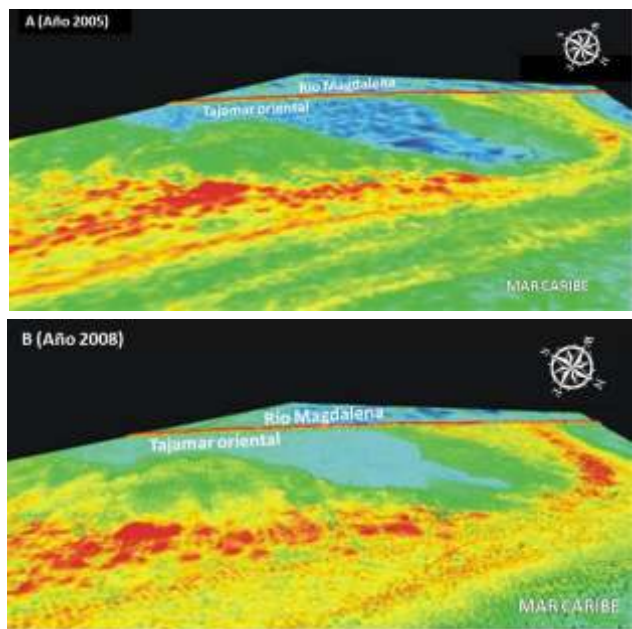


Figura 8. A. Vista tridimensional del costado este del río Magdalena, según datos LiDAR del año 2005, B. Vista tridimensional del costado este del río Magdalena, según datos LiDAR del año 2008, C. Superposición de las dos MDTs sobre el ortofotomosaico del año 2008 (los datos en color rojo corresponden a las alturas de médanos activos en el año 2008 y los datos en color naranja corresponden al año 2005).

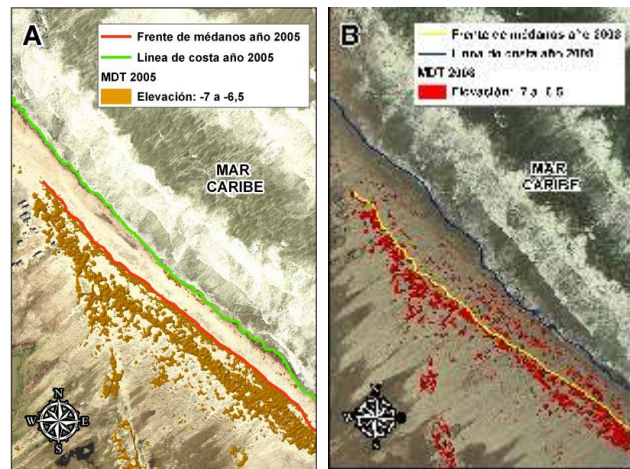


Figura 9. A. Estado del frente de médanos activos y línea de costa para el año 2005 según el MDT y la ortofotografía del respectivo año, B. Estado del frente de médanos activos y línea de costa para el año 2008 según el MDT y la ortofotografía del respectivo año.

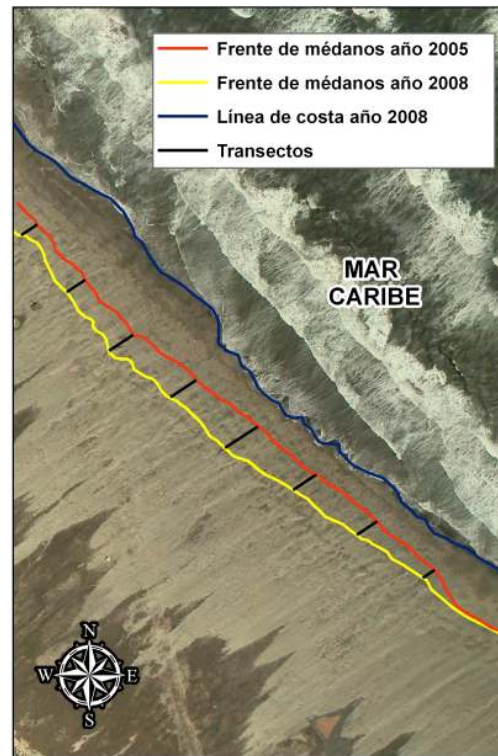


Figura 10. Medición de las longitudes de retroceso del frente de médanos activos para el periodo 2005-2008, en un sector del área de estudio.



Figura 11. Fotografía IGAC No. 208 del vuelo C-986 año 1961 georreferenciada a partir del ortofotomosaico del año 2008.

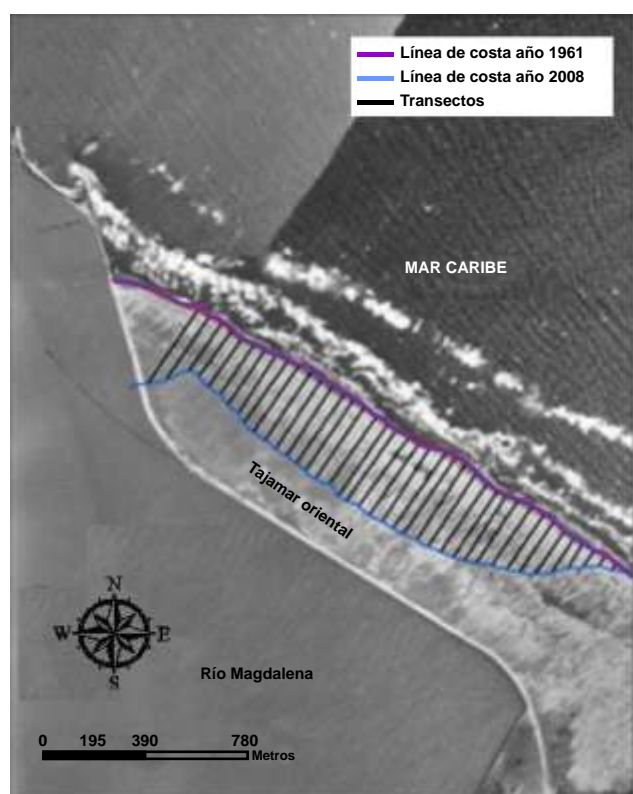


Figura 12. Análisis multitemporal de la línea de costa de los años 1961 y 2008, en la cual se observa un significativo retroceso al parecer, producto de la alta actividad marina del lugar.

Discusión

Metodológicamente, es significativo el aporte de la ortofotografía digital y el escaneo láser (sensor LiDAR) para realizar análisis diacrónicos de carácter planimétrico y volumétrico, útiles en investigaciones y aplicaciones en el campo de la geomorfología litoral. Una de las principales ventajas de la utilización del sensor LiDAR es la obtención de información en la tercera dimensión (z) para extensas zonas de trabajo, en especial zonas costeras, en un tiempo de vuelo bastante reducido si se compara con el tiempo empleado por las técnicas tradicionales de altimetría. Por otra parte, el carácter geométrico de las ortofotografías digitales, permite realizar comparaciones y mediciones entre distintas fechas, con un mayor rigor en los resultados obtenidos. Además, el carácter digital de éstas y la posibilidad de integrarlas en programas con un enorme potencial analítico desde la perspectiva espacial (SIG y tratamiento digital de imágenes) abre nuevas perspectivas de análisis en esta temática [10].

En geomorfología litoral, el elevado dinamismo de las geoformas y procesos resultantes (médanos, playas, etcétera), la enorme variabilidad espacio-temporal de las formas y el control que ejerce la variable altimétrica sobre diferentes procesos geomorfológicos (inundación, oleaje, deflación) y biológicos en las zonas costeras, hace necesario contar con un MDT y aerofotografías de alta resolución, como punto de partida para el trabajo geomorfológico. Igualmente, las funciones de análisis espacial en un entorno SIG, aplicadas a estos datos, abren igualmente nuevas expectativas y enfoques metodológicos en geomorfología litoral (evaluación de riesgos, modelización temporal, balances sedimentarios, etcétera).

Una aplicación similar de estas técnicas ha sido desarrollada por [11] a través de la implementación de un método para analizar y visualizar la topografía y sus cambios, en las islas Barrera de una parte de la costa de Carolina del Norte en Estados Unidos. El método se basa en la aplicación de modelos digitales del terreno con resolución de 1.5 m obtenidos de datos LiDAR de los años 1997, 1998, 1999 y 2000. Por otra parte, en los estados que bordean el Golfo de México (Florida, Alabama, Mississippi, Louisiana y Texas), se han venido adelantando investigaciones similares

acerca de las tendencias históricas y presentes de las tasas de cambio de la línea de costa (comparando líneas de costa históricas de los años 1800, 1920, 1930 y 1970 con una actual obtenida con el sensor LIDAR para el año 2002). Las líneas de costa utilizadas en cada periodo de análisis fueron desplegadas con software SIG y el cálculo de las tasas de cambio fue realizado con la extensión DSAS® (Digital Shoreline Analysis System) utilizando las diferentes funcionalidades que para el efecto posee [12]. Igualmente, [13] reporta la utilización de tecnología de SIG y datos LiDAR a través de MDTs de diferentes resoluciones espaciales para caracterizar los cambios en los sistemas dunares del Cape Aterras National Seashore en Carolina del Norte, Estados Unidos.

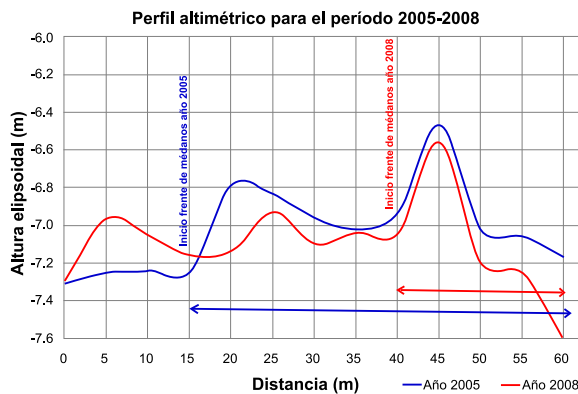
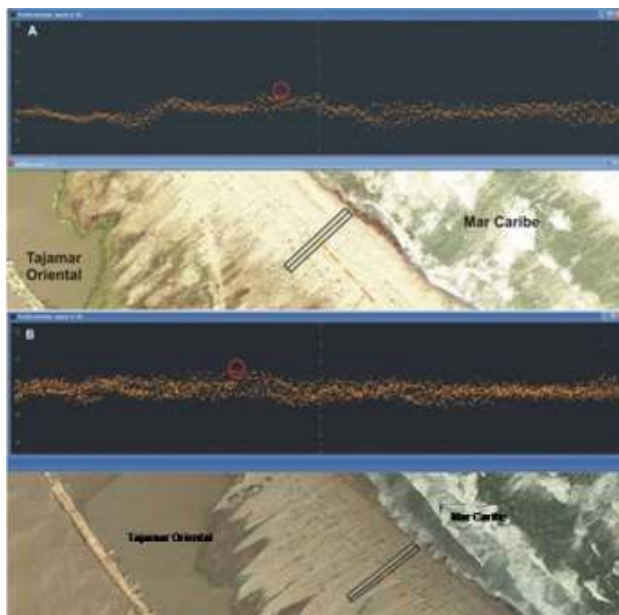


Figura 13. Perfiles altimétricos en un sector del área de estudio obtenidos a partir de datos LiDAR de terreno. A.

Perfil del año 2005. El círculo rojo muestra la máxima altura elipsoidal en el tramo (-6.47 m). B. Perfil del año 2008. El círculo rojo muestra la máxima altura elipsoidal en el tramo (-6.56 m). C. Gráfico del tramo analizado donde se muestra el comportamiento de la actividad de los médanos para los años 2005 y 2008 a lo largo del perfil elaborado.

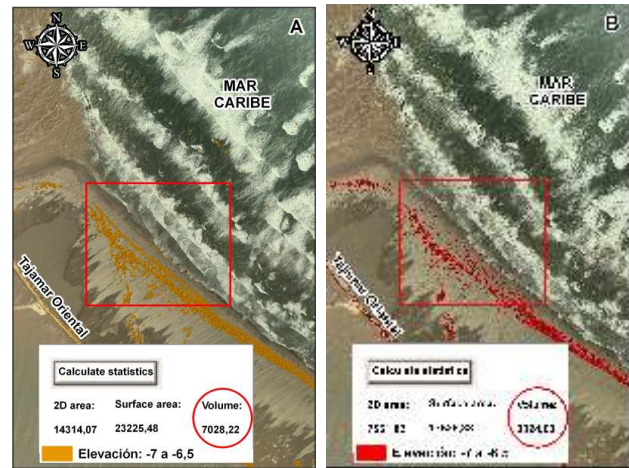


Figura 14. Cálculo de los volúmenes sedimentarios para un sector específico del área de estudio (recuadro rojo). A. Resultados de la cuantificación del volumen sedimentario del área específica según datos LiDAR del año 2005 (7028.22 m³), B. Resultados de la cuantificación del volumen sedimentario del área específica según datos LiDAR del año 2008 (3824.00 m³).

La utilización de la información contenida en los MDTs, ortofotografías digitales y aerofotografías antiguas de épocas diferentes (a través de indicadores como las tasas de avance/retroceso de línea de costa y de médanos y cálculos volumétricos), permite determinar la ocurrencia o no y la cuantificación de fenómenos de interés para el conocimiento de las zonas costeras como la erosión, acreción y el transporte eólico; que por lo general, se encuentran asociados la dinámica marina y condiciones climáticas del sector que se estudie.

Agradecimientos

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos al personal de la Subdirección de Desarrollo Marítimo de la Dirección General Marítima, por su valioso apoyo en el suministro de la información del sensor LiDAR, aerofotografías

antiguas y ortofotos digitales, fundamentales para el desarrollo de la presente investigación.

Referencias bibliográficas

[1] Martínez, N.P. Psuty, R.A. Lubke. Coastal Dunes. Ecology and conservation. Ecological studies 171. Springer-Verlag. Berlin; 2004.

[2] Hellemaa, P. The Development of Coastal Dunes and their Vegetation in Finland. Doctoral dissertation, Department of Geography. University of Helsinki; 1998.

[3] Saye S, Van Der Wal D, Pye K, Blott S. Beach dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LiDAR data. *Geomorphology*: 2006; 72: 128-155.

[4] Mitsova H, Overton M, Harmon R. Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina. *Geomorphology*: 2005; 72: 204-221.

[5] Stephenson W, Brander R. Coastal geomorphology into the twenty-first century. *Progress in Physical Geography*: 2003; 27, 4:607-623.

[6] Ojeda J, Vallejo I. El Empleo de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) para la Caracterización Geomorfológica del Sistema de Dunas Móviles del Parque Nacional de Doñana (Huelva). In: Blanco-Chao y otros, editor. *Procesos geomorfológicos y evolución costera*. Universidad de Santiago de Compostela. 2004. p. 119-132.

[7] Martínez J, Molina L. Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe, sector: Bocas de Ceniza-Parque Tayrona. INGEOMINAS Informe Inédito. Bogotá, Colombia. 1992.

[8] Carvajal A. Caracterización físico-biótica del litoral del departamento del Atlántico. En: DIMAR-CIOH. Caracterización físico-biótica del litoral Caribe colombiano. Tomo I. Serie Publicaciones Especiales CIOH Vol. 1. Cartagena de Indias, Colombia; 2009. Pp. 97-110.

[9] Marriaga L. Caracterización físico-biótica del litoral del departamento del Magdalena. En: DIMAR-CIOH. Caracterización físico-biótica del litoral Caribe colombiano. Tomo I. Serie Publicaciones Especiales CIOH Vol. 1. Cartagena de Indias, Colombia; 2009. Pp. 67-96.

[10] Ojeda J, Vallejo I, Hernández L, Álvarez J. Fotogrametría digital y LiDAR como fuentes de información en geomorfología litoral (marismas mareales y sistemas dunares): el potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín de la A.G.E.* 2007; 44: 215-233.

[11] White S, Wang Y. Utilizing DEMs derived from LiDAR data to analyze morphologic change in the North Carolina coastline. *Remote Sensing of Environment*: 2003; 85: 39-47.

[12] U.S. Geological Survey. Center for Coastal and Watershed Studies. National Assessment Of Shoreline Change: Part 1 Historical Shoreline Changes And Associated Coastal Land Loss Along The U.S. Gulf of Mexico. Open File Report 2004-1043; 2004.

[13] Woolard J, Colby J. Spatial characterization, resolution and volumetric change of coastal dunes using airborne LiDAR: Cape Hatteras, North Carolina. *Geomorphology*: 2002; 48: 269-287.