

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

Ojeda Zújar, J.¹, Vallejo Villalta, I.¹, Hernández Calvento, L.², y Álvarez Francoso, J.¹.

¹Departamento de Geografía Física y AGR. Universidad de Sevilla

²Departamento de Geografía. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

RESUMEN

En este artículo se presentan diferentes resultados procedentes de la caracterización morfométrica tridimensional y el análisis de la dinámica sedimentaria volumétrica en sistemas dunares y marismas mareales. Para el levantamiento de la información topográfica (x,y,z) se hace uso de la restitución fotogramétrica digital y de sensores lidar (*Light Detection and Ranging*) y para su análisis e interpretación se utilizan las funcionalidades de análisis espacial de los SIG. Los resultados revelan el enorme potencial en geomorfología litoral de ambas fuentes de información debido a su carácter continuo espacialmente y cuasi-sincrónico desde la perspectiva temporal. Dada la variabilidad espacial y temporal a escala de detalle de los sistemas litorales estudiados, estas fuentes de información se consideran esenciales y de gran proyección futura en estudios de estas características. 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,...).

Palabras clave: fotogrametría digital, lidar, sistemas dunares, marismas mareales y SIG.

Fecha de recepción: marzo 2007.

Fecha de aceptación: septiembre 2007.

ABSTRACT

This paper shows some results focused on topographic 3D surveys and volumetric temporal changes analysis on tidal marshes and coastal dunes systems. The topographic data (x,y,z) were collected by softcopy photogrammetry and airborne lidar sensors and were analysed and integrated using the GIS capabilities for spatial analysis. The results show the advantages of these near-synoptic sources of data (with high spatial and temporal resolution) when applying to fast evolving coastal features (beaches, dunes...). The spatial and temporal topographic internal variability of these coastal systems at detailed scale, on the other hand, give to these technologies an important role within the context of future coastal geomorphology research. The spatial capabilities provided by GIS (natural risk assessment, DEM, modelling, sedimentary budgets,...) appears as the natural context for integration, analysis, visualization and modelling of these georeferenced data.

Key words: softcopy photogrammetry, lidar, coastal dunes, tidal marshes, GIS.

I. INTRODUCCIÓN

La incorporación de nuevas fuentes de información y el potencial de las herramientas de análisis espacial en geomorfología litoral se ha incrementado exponencialmente durante los últimos años (Saye et al, 2006; Mitsova et al, 2005; Stephenson y Branderb, 2003; Brown y Arbogast, 1999). Una de las consecuencias más prometedoras de este proceso es el poder incorporar el análisis cuantitativo volumétrico en la evolución de los sistemas litorales, así como la modelización espacializada de algunos procesos claves en geomorfología litoral, ya que, debido a su elevado dinamismo a escala humana (playas, dunas, etc...) y a su impacto sobre muchas actividades antrópicas (turismo, espacios urbanizados, etc...), es necesario un continuado control geométrico de las formas resultantes. Para poder llevar a cabo esta tarea de forma eficiente se ha revelado crucial la elaboración de MDEs (Modelos Digitales de Elevaciones) de precisión y su análisis en el contexto de los SIG.

Tradicionalmente la geomorfología litoral ha utilizado técnicas topográficas (Anfuso y Del Río, 2003) y recientemente la tecnología GPS para el levantamiento de los datos geométricos (x,y,z) necesarios para su análisis, si bien el sistema de toma de datos «punto a punto» limita sustancialmente su aplicación a escalas de detalle y a ámbitos espaciales reducidos (Gili et al, 2003). Por otra parte, el sistema temporalmente secuencial de los levantamientos presenta igualmente limitaciones en las escalas espaciotemporales a las que son aplicables, debido al elevado dinamismo que caracteriza a los sistemas litorales. Baste como ejemplo el caso del sistema dunar activo de Doñana, cuyas dimensiones (60 km²) y dinamismo hacen inviable una correcta caracterización volumétrica haciendo uso de estas técnicas debido ya que perderíamos el carácter sincrónico de los datos en una campaña de levantamiento exhaustiva.

Como alternativa se ha optado tradicionalmente por el uso complementario de fuentes de información de carácter cuasi-sincrónico (fotografías aéreas e imágenes de satélite) y/o continuo espacialmente (mapas y cartas náuticas), si bien su uso ha estado ligado fundamentalmente al análisis diacrónico a través de medidas superficiales o tasas puntuales (Levin, 2006).

Dado que los procesos naturales (erosión, progradación, dinámica eólica, etc...) se desarrollan en un espacio tridimensional al conllevar la erosión, transporte y sedimentación de materia y se plasman espacialmente en morfologías específicas con diferente grado de evolución, parece obvio el interés de fuentes de información que obtengan información morfométrica tridimensional con carácter masivo espacialmente y cuasi-sincrónico desde la perspectiva temporal. El descenso en los precios de los programas de fotogrametría digital y la aparición de sensores aerotransportados tipo Lidar ponen a disposición de los geomorfólogos unas fuentes de datos del mayor interés en geomorfología, y especialmente en geomorfología litoral. Por otra parte, el carácter digital de éstas y la posibilidad de integrarlas en programas con un enorme potencial analítico desde la perspectiva espacial (SIG, tratamiento digital de imágenes, etc.) abre nuevas perspectivas de análisis en esta temática. En este artículo se presentan los resultados de la aplicación de estas técnicas a diferentes problemáticas y espacios costeros.

II. OBJETIVOS Y ÁREAS DE ESTUDIO

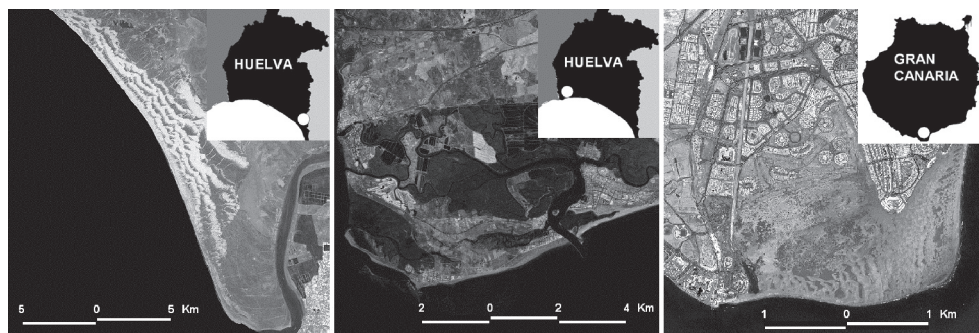
El objetivo de este artículo es doble: por una parte, realizar una reflexión sobre el interés y utilidad de estas tecnologías y fuentes de información en geomorfología litoral, especialmente en la caracterización morfométrica tridimensional y evolución de las formas costeras; por otra, presentar los resultados recientes de su aplicación a una variada tipología de problemáticas clásicas en geomorfología litoral que este equipo de trabajo ha realizado en los últimos años sobre diversos sistemas litorales.

Para ello, se han elegido tres espacios con problemáticas diferenciadas pero de amplia tradición en geomorfología costera:

- El análisis diacrónico y volumétrico del sistema de dunas activas del Parque Nacional de Doñana, haciendo uso de la fotogrametría digital como fuente para la generación de MDEs y ortofotografías para diferentes fechas: 1956, 1977 y 2001.

Figura 1

A. SISTEMA DE DUNAS MÓVILES DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA (HUELVA).
B. MARISMAS MAREALES DE ISLA CRISTINA (HUELVA). C. SISTEMA DUNAR DE MASPALOMAS (GRAN CANARIA).



- La caracterización morfométrica de las marismas mareales de Isla Cristina (Huelva) a través de los datos obtenidos con un sensor LIDAR.
- El uso de algoritmos de análisis espacial para el estudio de la dinámica eólica en el sistema dunar de Maspalomas (Gran Canaria).

El tratarse de tres espacios con problemáticas diferenciadas nos ha llevado a presentar la metodología y los resultados de forma conjunta para cada uno de ellos.

III. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

1. El sistema de dunas activas del parque nacional de Doñana (Huelva)

A pesar de su carácter emblemático dentro del Parque Nacional de Doñana, el sistema de dunas activas no ha sido objeto de trabajos de detalle en relación con la dinámica eólica. Con independencia de su descripción geomorfológica general (Vanney y Menanteau, 1979), su inserción regional en el contexto del Manto Eólico de El Abalario-Doñana del que constituye su secuencia más reciente (Borja, 1997) y su sectorización en unidades ecológicas (CMA, 1998), los estudios sobre la dinámica dunar actual se reducen a una serie de trabajos pioneros, desarrollados en la década de los setenta (Torres Martínez, 1975; Garcia Novo et al, 1975), de indudable valor aunque referidos a sectores muy concretos y realizados con la limitación de medios propia de esos años. Tanto la importancia del sistema dunar en cuestión, como la carencia de estudios sobre su dinámica geomorfológica, nos ha llevado a elegir este espacio como un auténtico laboratorio para poner en práctica distintas metodologías para la realización de una serie de estudios que ponen el acento en el empleo de nuevas fuentes de información y herramientas de análisis espacial (Ojeda y Vallejo, 2004; Ojeda et alia, 2005).

En el presente apartado se pretende mostrar algunos resultados procedentes de la explotación conjunta de 3 MDEs correspondientes a los años 1956, 1977 y 2001. Metodológicamente debe resaltarse la magnífica oportunidad que ofrece la fotogrametría digital para realizar restituciones a partir de vuelos históricos, con las que poder llevar a cabo análisis diacrónicos de carácter volumétrico; de hecho es la única fuente de información tridimensional con carácter retrospectivo. En este caso concreto, la disponibilidad de los vuelos de 1956 y 1977 permite el establecimiento de dos periodos temporales de muy similar extensión (1956-1977 y 1977-2001), lo que posibilita el análisis comparativo del comportamiento del sistema en cada momento.

A) Restitución digital con apoyo de la interpretación geomorfológica

La restitución fotogramétrica constituye, sin lugar a dudas, la fuente de información más habitual para la adquisición de datos altimétricos a escalas de semidetalle sobre amplios espacios. No obstante, las técnicas estandarizadas practicadas por las empresas del sector presentan una utilidad limitada para las aplicaciones geomorfológicas, en las que las formas adquieren igual significación que la propia altimetría. La disponibilidad de nuevos programas de fotogrametría digital hace posible la realización levantamientos altimétricos en los que el especialista en geomorfología puede intervenir en distintas fases del trabajo. En el

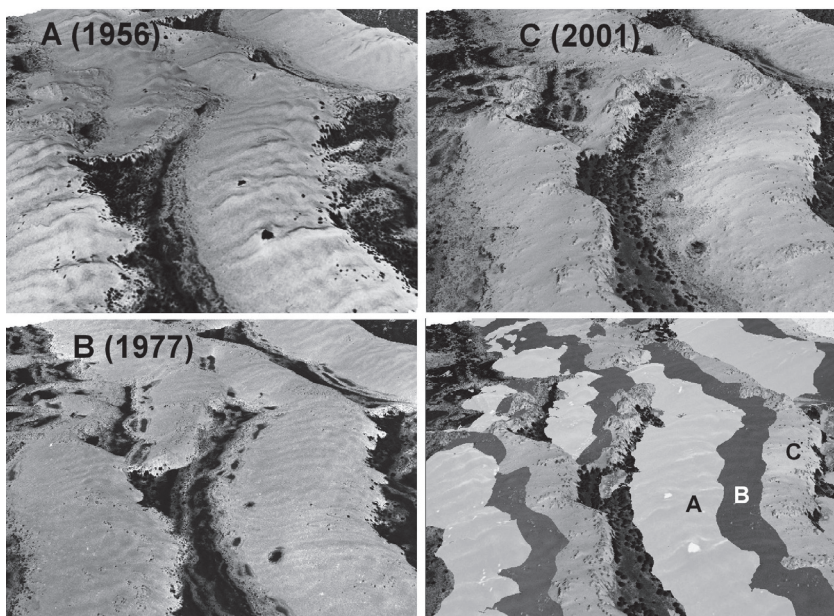
caso concreto de este trabajo, las restituciones han sido realizadas por la empresa Stereocarto S.L (estereocorrelación y líneas de estructura), con el asesoramiento de nuestro equipo en la captura de diferentes líneas de estructura (colas y frentes de dunas) y otros elementos geomorfológicos fundamentales para la correcta extracción de la morfología dunar; posteriormente, además, los datos altimétricos han podido ser editados por los miembros del equipo mediante un programa de restitución digital (*StereoCaptor*) con la finalidad de llevar a cabo una última corrección de los datos previa a la generación de los MDEs.

B) La producción de ortofotos digitales como recurso para la interpretación geomorfológica

Como resultado adicional del proceso general de restitución debe destacarse la generación de ortofotos. Este producto, en el que se corrigen las deformaciones propias de las fotografías aéreas (para cuya generación digital es necesario la disponibilidad de un MDE), posibilita, entre otras posibilidades, dos aplicaciones básicas en geomorfología. La primera de ellas se basa en la propia visualización de las ortofotos; la utilización combinada de ortofoto y MDE posibilita la visualización tridimensional, que constituye un valiosísimo recurso para la interpretación geomorfológica, la docencia y la pura divulgación (Figura 2).

Figura 2

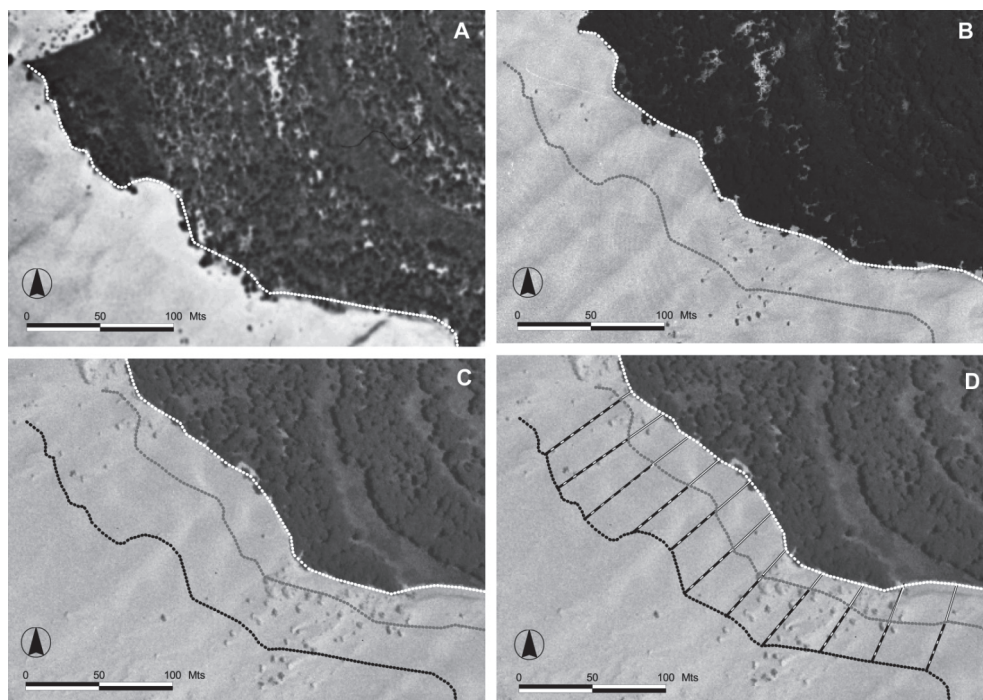
- A. VISTA TRIDIMENSIONAL DE LA ORTOFOTO DE 1956 SOBRE EL MDE DE LA MISMA FECHA.
 - B. VISTA TRIDIMENSIONAL DE LA ORTOFOTO DE 1977 SOBRE EL MDE DE LA MISMA FECHA.
 - C. VISTA TRIDIMENSIONAL DE LA ORTOFOTO DE 2001 SOBRE EL MDE DE LA MISMA FECHA.
- FINALMENTE INTEGRACIÓN DE LAS TRES VISTAS TRIDIMENSIONALES



La segunda de las aplicaciones está relacionada con la posibilidad de efectuar comparaciones y mediciones entre las distintas fechas, con la garantía de que la propia naturaleza geométrica de las ortofotografías dota de un mayor rigor a los resultados obtenidos; como ejemplo, se muestra una típica evaluación de las tasas de avance de los frentes dunares en los dos periodos considerados. (Figura 3). Tal como se muestra en el ejemplo, las longitudes de avance son sensiblemente inferiores en el segundo periodo (2,7 m/año para el periodo 1956-1977 y 1,7 m/año para el periodo 1977-2001); este hecho, generalizable a todo el sistema es una de las señales más claras que apunta hacia una progresiva ralentización de la dinámica dunar, cuyas causas están aún por determinar.

Figura 3

DETALLE DE LA EXTRACCIÓN DE LAS TASAS DE AVANCE A PARTIR DE ORTOFOTOGRAFÍAS. A, B Y C: FRENTES DE AVANCE EN 1956, 1977 Y 2001, RESPECTIVAMENTE. D. MEDICIÓN DE LAS LONGITUDES DE AVANCE EN LOS PERIODOS 1956-1977 Y 1977-2001.

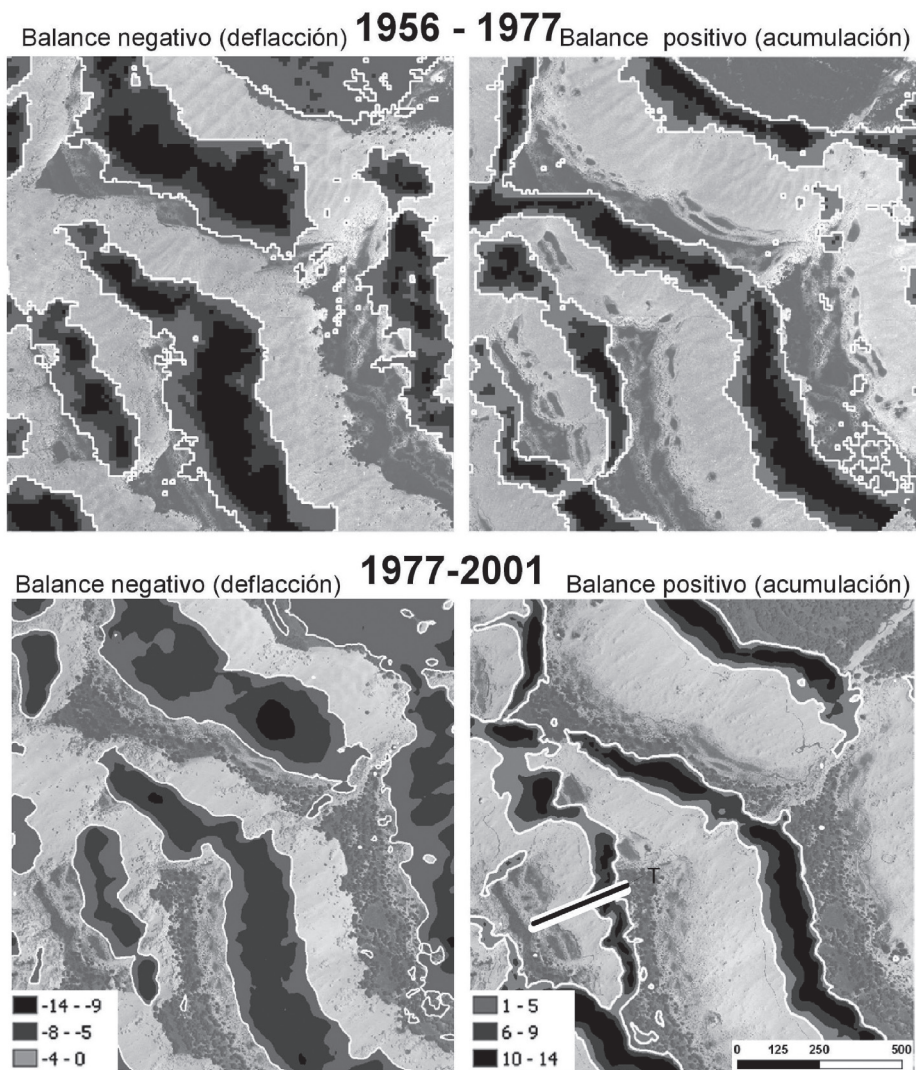


C) La explotación volumétrica de los MDTs

Un segundo grupo de aplicaciones se refiere a la explotación directa de los MDEs como fuentes de información para el análisis volumétrico y diacrónico (balances sedimentarios).

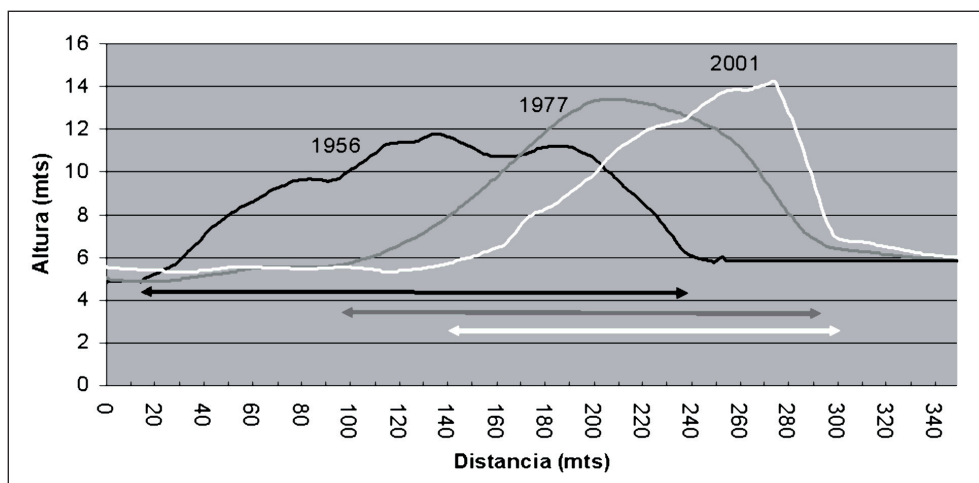
La aplicación se sustenta en el uso de algebra de mapas sobre los MDEs correspondientes a los periodos 1956-1977 y 1977-2001; el resultado de estas operaciones se plasma en una matriz numérica en la que se computan las pérdidas y ganancias sedimentarias entre las fechas de referencia, lo que, junto la intrínseca cuantificación volumétrica, permite apreciar de forma nítida el comportamiento de las dunas entre ambos periodos (Figura 4).

Figura 4
BALANCES SEDIMENTARIOS VOLUMÉTRICOS. T: TRANSEPTO PARA LOS PERFILES ALTIMÉTRICOS DE LA FIGURA 5.



En este caso concreto, los resultados parecen validar un cambio en el comportamiento de las dunas entre los dos periodos estudiados. 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 las dunas, sufren un estrechamiento motivado por las menores tasas de avance de los frentes y, como compensación, una mayor elevación o apuntamiento. 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 de los cordones dunares. Lógicamente, la suma de ambos procesos se traduce en un estrechamiento general de los cordones dunares. La figura 5 muestra una síntesis de los procesos más generalizados en la evolución de los cordones dunares.

Figura 5
PERFILES ALTIMÉTRICOS PARA LAS TRES FECHAS DE LA FIGURA 4.



2. Marismas mareales de Isla Cristina

La caracterización morfométrica detallada de las marismas mareales constituye una fase esencial de su análisis geomorfológico, ya que son espacios donde los procesos ligados a la dinámica mareal (la marea es el principal agente conformador de estos sistemas) se ejercen sobre un rango altimétrico muy estrecho (el rango de las mareas vivas se sitúa en torno a 3 m. en Isla Cristina) y el modelado resultante de su actividad se caracteriza por la levedad del relieve resultante. Por otra parte, la vegetación halófila que las caracteriza está igualmente controlada altimétricamente por el régimen mareal, el cual explica gran parte de su distribución espacial. Asimismo, estos espacios se encuentran entre los más vulnerables ante la potencial subida del nivel del mar ligado al efecto invernadero y el cambio global (Simas et al, 2001).

De todo ello se deriva que una adecuada caracterización altimétrica (x,y,z) se erige en una información crítica tanto para su precisa interpretación geomorfológica, como para el análisis de la vegetación y ecosistemas que soportan. Igualmente, el análisis de la dinámica mareal (modelización numérica de la marea) o de los riesgos de inundación presentes o futuros exigen obligatoriamente la disponibilidad de un MDE detallado para estos espacios.

Paradójicamente, los espacios mareales, especialmente los ligados a costas meso y macro-mareales, se encuentran entre los de más difícil caracterización morfométrica tridimensional con técnicas de adquisición de datos punto a punto (topografía clásica y GPS), debido al difícil acceso a las mismas, la inestabilidad del substrato (fangos y arcillas) y la variabilidad interna de las mismas (caños, esteros, levas...), a pesar de la levedad del relieve en términos altimétricos. Por otra parte, la tupida vegetación halófila presenta un conjunto de dificultades adicionales si se opta por su caracterización con técnicas fotogramétricas. Este hecho, nos llevó, en una publicación anterior (Ojeda y Márquez, 1997), a diseñar, para la generación de un MDE, una metodología muy costosa en tiempo de tratamiento, en la que se utilizaba la vegetación como indicador indirecto de la altimetría y su integración con la escasa información topográfica disponible.

La posibilidad de disponer de un vuelo con un sensor lidar (modelo Toposys II) en 2003 nos permitió llevar a cabo, de forma rápida, la elaboración de un MDE utilizando el primer retorno del sensor. Parte de los resultados y metodología de este análisis se publicaron en 2006 (Ojeda y otros, 2006). En este caso, presentamos algunos resultados nuevos derivados del mismo, con la intención de reflejar el interés de los datos Lidar en relación a dos aspectos clásicos en la geomorfología litoral de espacios marismesños: su cartografía geomorfológica y la modelización de los procesos de inundación sobre los mismos.

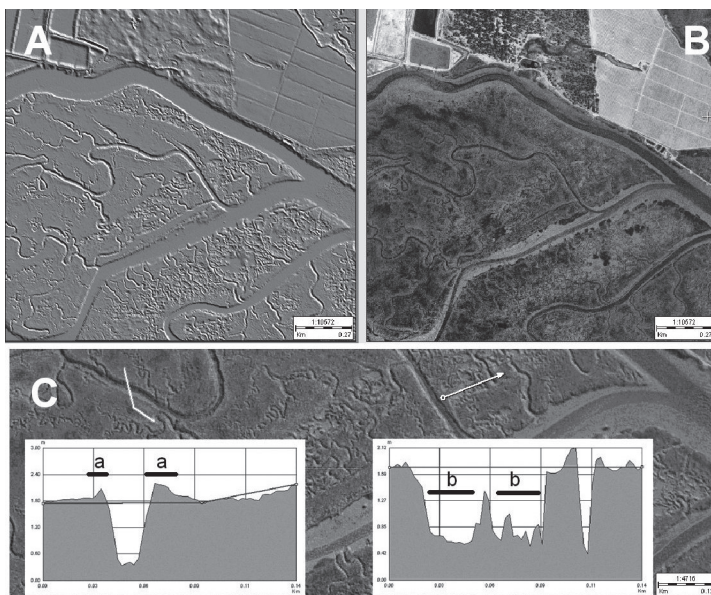
A) Cartografía geomorfológica

La generación de un MDE de 2 metros de resolución y una precisión altimétrica de 0,15 m. y su integración en un SIG (ArcGis 9.2) posibilitó de forma fácil generar dos modelos derivados de aquél: un MDT de sombras y un MDT de pendientes. El uso de las funcionalidades SIG sobre las tres superficies (altimetría, pendientes, sombreado) permite extraer de éstas, documentos cartográficos que facilitan la interpretación visual desde la perspectiva geomorfológica y la caracterización morfométrica de los principales elementos de un sector de las marismas estudiadas.

La imagen A de la figura 6 pone de manifiesto la precisa caracterización morfométrica que posibilita el la información derivada de este sensor, indentificándose visualmente sobre un simple sombreado digital del MDE la estructura geomorfológica básica de este sector de marismas mareales (superficies fangosas, caños, esteros...), incluso con una mayor nitidez que la que se puede extraer de las clásicas fotografías aéreas (imagen B). En la imagen C de la misma figura se aprecia la precisión altimétrica del lidar en la caracterización de determinados elementos de la marisma mareal, esenciales para el estudio de su dinámica (levés y pozas hipersalinas) y muestra el interés para la cartografía geomorfológica de productos derivados de algoritmos de fusión de imágenes. En este caso, la fusión del modelo de sombras con la información de la ortofoto proporciona un producto cartográfico con propiedades de

Figura 6

A.- SOMBREADO DIGITAL SOBRE EL MDE DEL PRIMER RETORNO DEL SENSOR LIDAR. B.- ORTOFOTOGRAFÍA DEL MISMO SECTOR DE 2004. C.- PERFILES ALTIMÉTRICOS SOBRE LA ORTOFOTO FUSIONADA CON LA IMAGEN DE SOMBRAS DEL LIDAR: (A) PERFIL SOBRE UN SECTOR DE LA MARISMA MAS EVOLUCIONADA DONDE SE IDENTIFICAN CON CLARIDAD LOS LEVÉS ASOCIADOS A LOS CAÑOS; (B) PERFIL SOBRE OTRO SECTOR MARISMENÑO DONDE SE APRECIA LA PRESENCIA DE POZAS HIPERSALINAS –SALT PANS–.

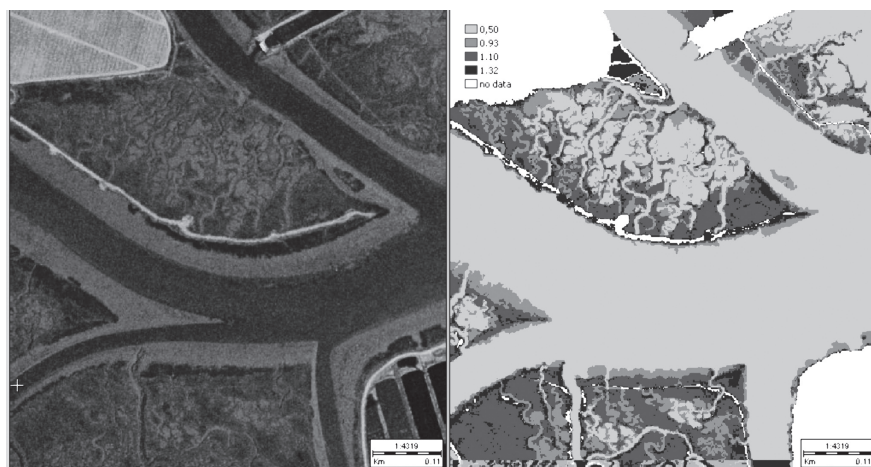


gran interés geomorfológico procedentes de ambos sensores (la precisión métrica del lidar y la multiespectralidad de la ortofoto —originalmente la ortofoto es en color—).

B) Cartografía de procesos de inundación

La alta precisión del MDE generado se revela igualmente esencial para cartografiar sobre el mismo cualquier nivel del rango mareal o nivel marino que sea útil al investigador. En este caso presentamos la cartografía de las zonas inundadas con niveles mareales de diferente coeficiente, los cuales son esenciales para, por ejemplo, el estudio de la vegetación, ya que ésta es ecológicamente dependiente del hidropereodo regido por aquellos. Para ello se han elegido el nivel de la pleamar en mareas muertas débiles —coeficiente de 0.2 y altura sobre el nivel del mar medio de Alicante 0,50 m.—; en mareas muertas ordinarias —coeficiente 0.45 y altura de 0,93 m.— y la pleamar media —coeficiente 0.7 y altura 1,32 m—. (Fraile, 2005).

Figura 7
ORTOFOTO DE 2004 Y PROYECCIÓN SOBRE EL MDE EXTRAÍDO DEL SENSOR LIDAR DE DIFERENTES NIVELES DE PLEAMAR (MAREAS MUERTAS DÉBILES, MAREA MUERTA ORDINARIA Y MAREA MEDIA)



3. El sistema dunar de Maspalomas (Gran Canaria)

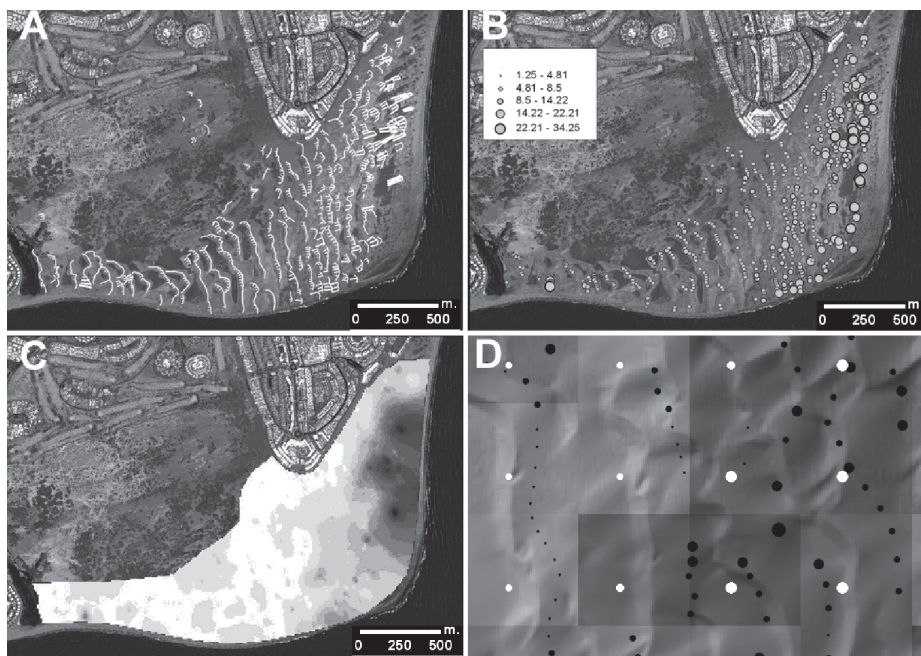
Las transformaciones experimentadas por este sistema dunar en las últimas décadas, causadas parcialmente por el desarrollo turístico, han sido objeto de trabajos de investigación (Hernández Calvento, 2002) y de un amplio número de publicaciones, que ponen de manifiesto la tendencia erosiva del sistema (Hernández et al., 2002), con aparición en superficie del material geológico subyacente (Hernández y Mangas, 2004) y variaciones en la cubierta vegetal (Hernández et al., 2006a), que, en definitiva, permiten dibujar un escenario marcado por intensas transformaciones ecológicas (Hernández et al., 2005). Los trabajos que han abordado su dinámica (Hernández et al., 2006b), mediante el seguimiento con GPS diferencial, revelan un elevado dinamismo en sus dunas litorales. En este artículo se pretende ahondar en el conocimiento sobre esta dinámica, aplicando para ello el potencial analítico de los SIG y haciendo uso de tasas de avance calculadas en trabajos más recientes, actualmente en publicación. Estas tasas, obtenidas para el periodo 2000-2006 en puntos concretos del campo de dunas, por medio del análisis de imágenes de satélite, ortofotos y un MDE obtenido con un sensor lidar, indican desplazamientos superiores, en algunos sectores, a 30 metros anuales. El objetivo del análisis que ahora se presenta es modelizar, a partir de estas tasas, el tiempo que tardaría un frente de avance en recorrer todo el sistema, bajo la hipótesis de que las tasas y direcciones de avance calculadas para el citado periodo se mantuviesen en el futuro. Dado que se trata de un objetivo puramente metodológico (desarrollar la metodología para pasar las tasas discretas medidas a una superficie sobre la que modelizar su evolución temporal) esta hipótesis puede mantenerse.

A) De los datos puntuales a una superficie de tasas de avance

La peculiaridad de la dinámica tan acelerada de las dunas del complejo dunar de Maspalomas hace que este proceso no pueda llevarse a cabo directamente con un clásico algoritmo de interpolación. Por otra parte, las tasas de avance sólo pueden medirse entre fechas muy próximas dado que la acelerada dinámica hace que no pueda reconocerse el mismo frente si el intervalo temporal es muy amplio. Por ello, los datos utilizados proceden de la fotointerpretación de ortofotos de dos periodos (2000-2003 y 2003-2006). Obtenidos los puntos con los valores de las tasas anuales, y dada su no coincidencia espacial, debieron de interpolarse para generar dos superficies (MDTs de avances para cada periodo) y posteriormente construir una superficie con los valores medios. Este MDT con las tasas medias anuales, inicialmente con 10m de resolución espacial, se remuestreó a 100x100 m. haciendo la media de los valores para cada ha., con el objetivo de obtener unos valores mas representativos del avance de los frentes completos. Con los centroides de cada celda de 100x100 se volvió a interpolar un MDT de tasas medias de 10x10 m.

Figura 8

- A. FRENTES DE AVANCE -2003- Y VECTORES DE AVANCE ENTRE 2003 Y 2006.
B. CENTROIDES DE LOS VECTORES DE AVANCE REPRESENTADOS PROPORCIONALMENTE A SU TASA ANUAL (M/AÑO). C. SUPERFICIE MEDIA DE TASAS DE AVANCE ANUALES.
D. REMUESTREO A UNA RESOLUCIÓN DE 100X100 M. Y REPRESENTACIÓN PROPORCIONAL DEL CENTROIDE RESULTANTE.



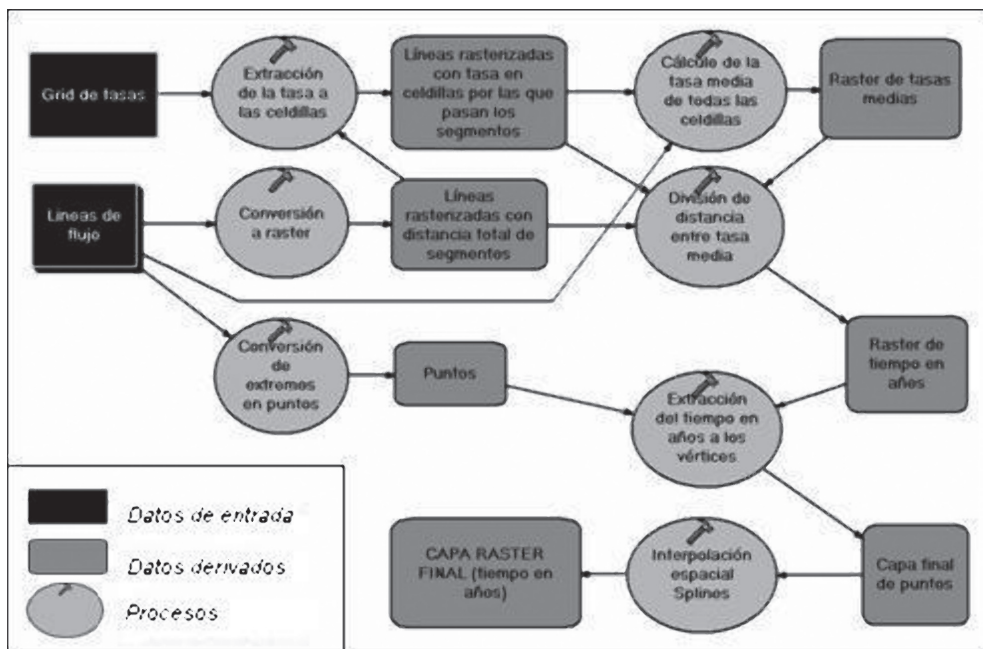
B) La generación de un algoritmo de modelización del tiempo de desplazamiento de los frentes

Una vez obtenida la superficie de las tasas medias de avance para todo el periodo (2000-2006) se procedió al diseño de un algoritmo desarrollado con la herramienta *Model builder* de *ArcGis 9.2*, tarea que conlleva varios pasos:

- El cálculo de las direcciones medias de avance y el establecimiento de una cartografía de flujos vectorial que permita simular el recorrido de los frentes desde que dejan la playa de El Inglés, en el sector oriental (área de acceso de los sedimentos al sistema) hasta que alcanzan el sector occidental de la playa de Maspalomas, al sur (área de salida de los sedimentos al mar).
- La creación de múltiples líneas de flujo a partir de la división de cada una de las líneas principales en segmentos progresivamente más distantes del sector oriental.
- La creación de dos capas raster a partir de los segmentos: una dándole a las celdillas el valor de la distancia total de los mismos y la otra con el valor de la tasa de las celdillas (extraído de la superficie de tasas medias) por las que pasan.

Figura 9

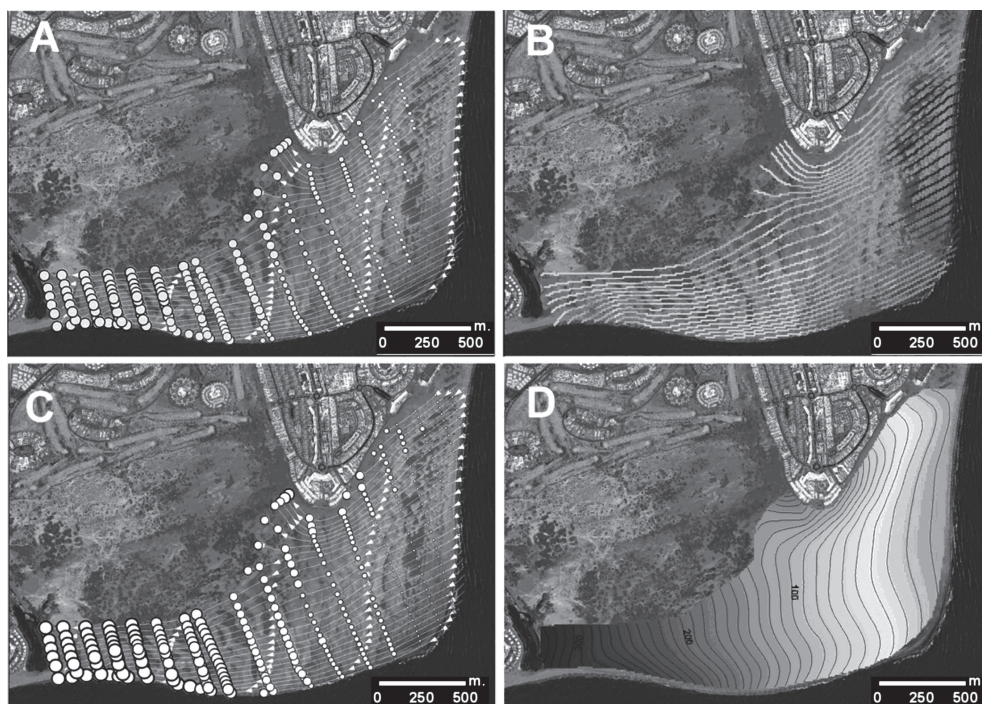
ALGORITMO DE ANÁLISIS ESPACIAL PARA LA OBTENCIÓN DE UNA SUPERFICIE DE TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO DE LOS FRENTE DUNARES, DESARROLLADO CON LA HERRAMIENTA *MODEL BUILDER* DE *ARCGIS 9.2*.



- La transformación de esta última capa creada en otra cuyas celdillas toman todas el mismo valor: la media de todas las celdillas que lo componen (con lo que obtenemos una tasa media de avance, que en realidad sólo es válida para el vértice final de cada segmento, pero como veremos en el siguiente paso, es el único que utilizaremos).
- El cálculo del tiempo que necesita un frente para llegar al extremo distal de cada segmento. Para ello, el raster de distancia de los segmentos se divide por el de la tasa media anual, y a continuación se extrae el valor de la celdilla correspondiente al extremo distal de cada segmento a una capa de puntos.
- La generación de una superficie a partir de los puntos distales calculados con un interpolador tipo *Spline (tension)* que representa el número de años que necesitan los frentes de avance para alcanzar cada celdilla del sistema dunar.

Figura 10

A: SEGMENTACIÓN DE LAS LÍNEAS DE FLUJOS EN TRAMOS PROGRESIVAMENTE MAS DISTANTES DEL SECTOR ORIENTAL; B: EXTRACCIÓN DE LOS VALORES DE LAS TASAS MEDIAS PARA CADA CELDILLA COINCIDENTE CON LAS LÍNEAS DE FLUJO; C: PUNTOS DE LOS EXTREMOS DISTALES DE LAS LÍNEAS DE FLUJO CON EL CÁLCULO DEL TIEMPO NECESARIO PARA QUE UN FRENTE LO ALCANCE; D: ISOLÍNEAS DE TIEMPO EXTRAÍDAS DE LA SUPERFICIE GENERADA CON LOS PUNTOS DISTALES.



IV. CONCLUSIONES

Los resultados de la caracterización morfométrica y la evolución sedimentaria volumétrica, extraídos para marismas mareales y sistemas dunares, creemos que reflejan con claridad el enorme potencial de la fotogrametría digital y del sensor lidar en geomorfología litoral. Las razones de ello y de su probable expansión futura entre los geomorfólogos costeros se derivan de varios hechos que han quedado igualmente recogidos en este artículo.

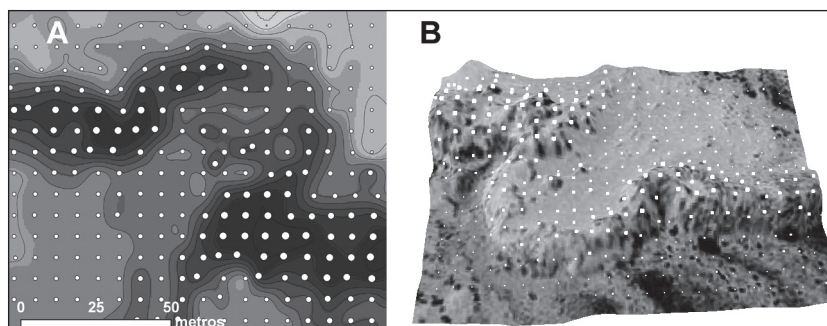
En primer lugar la necesidad de incorporar la tercera dimensión (z) como una fuente de información esencial en geomorfología. De hecho, así ha sido considerada tradicionalmente por los geomorfólogos, si bien las técnicas disponibles para su levantamiento limitaban su utilización a escalas de detalle y a espacios muy reducidos. En geomorfología litoral, esta necesidad se amplifica por dos razones: (i) el elevado dinamismo de las formas y procesos resultantes (dunas, playas, dinámica mareal...) y la enorme variabilidad espacial de las formas a pesar de su, generalmente, escasa magnitud altimétrica; (ii) la importancia adicional de la variable altimétrica por el control que ejerce sobre diferentes procesos geomorfológicos (inundación, oleaje, deflación..) y ecológicos (vegetación halófila, por ejemplo) en las zonas costeras. De ello, se deriva la necesidad de generar un preciso MDE como un inestimable punto de partida para cualquier trabajo geomorfológico. Sin embargo, este hecho, que para relieves de mayor magnitud topográfica, puede obtenerse por diversas vías (interpolación de la información de mapas topográficos, restitución fotogramétrica, etc.), presenta en los medios analizados (marismas mareales y sistemas dunares) dos limitaciones que dificultan su uso si se pretende analizar un espacio de cierta magnitud.

- En los medios dunares activos, la variabilidad espacial y dinamismo de las formas resultantes de los procesos de deflación, transporte y acumulación, exige una fuente de datos que permita obtener la altimetría de forma cuasi-sincrónica. En caso contrario, si el área a estudiar es de suficiente magnitud, podríamos estar midiendo los mismos sedimentos varias veces y/o sería muy difícil la integración de información diacrónica para ver la evolución temporal.
- En los espacios de marismas mareales, la levedad altimétrica de las formas (no más de 3 m. de rango altimétrico en una costa mesomareal como la onubense) exige bastante precisión en la técnica de levantamiento. Esto no sería problema para datos puntuales (estaciones totales o D_GPS) pero, para la caracterización completa del espacio (también de gran variabilidad espacial por la profusión de caños, esteros, levés, pozas salinas, etc.), el substrato fangoso y la propia inundabilidad natural (con carácter semidiurno en Huelva) dificultarían mucho una toma de datos exhaustiva. En este caso, el recurso a la fotogrametría presenta el problema adicional de la presencia de una tupida cubierta de vegetación halófila que impide ver el terreno (y por lo tanto medirlo) presentando, a veces, esta cubierta vegetal una mayor magnitud altimétrica que la propia morfología que la sustenta. En estos casos el uso de sensores lidar con vuelos de baja altitud (para garantizar la penetrabilidad de la vegetación) proporciona una información de elevada precisión altimétrica, exhaustiva espacialmente y de carácter cuasi-sincrónico.

De todo lo anterior puede extraerse como conclusión la necesidad de utilizar, especialmente en los medios costeros, fuentes de información altimétrica que proporcionen información continua desde la perspectiva espacial y cuasi-sincrónica temporalmente. Tanto la fotogrametría digital como el lidar cumplen con esas condiciones de partida. En relación a la fotogrametría digital habría que resaltar el valor adicional que resulta del hecho de que la fotografía aérea sea la única fuente de información altimétrica con carácter retrospectivo, aunque presente algunas limitaciones en casos de vegetación muy tupida. Por otra parte, el descenso de los precios del software para entornos de PC y su creciente facilidad de uso hará posible que los propios especialistas temáticos (geomorfólogos en este caso) trabajen directamente con los programas de restitución (Fig. 11) y sean ellos quienes decidan dónde y como obtener información morfométrica, así como controlar su calidad y el proceso de extracción. Este hecho es crucial para la generación de un MDE de calidad y, por otra parte, la visión tridimensional en el restituidor no es ajena a la mayor parte de ellos, ya que ésta ha sido siempre una fuente de información básica en geomorfología, si bien en su formato analógico (fotografías aéreas y estereoscopos) y como fuente morfométrica 2D.

Figura 11

MDE GENERADO POR ESTÉREO-CORRELACIÓN SOBRE LOS FOTOGRAMAS DEL VUELO DE 1977 EN UN SECTOR DE LAS DUNAS DEL PN DE DOÑANA. VISIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA ORTOFOTO CON LOS PUNTOS PARA SU EDICIÓN MANUAL POR EL GEOMORFÓLOGO. ELABORACIÓN PROPIA.

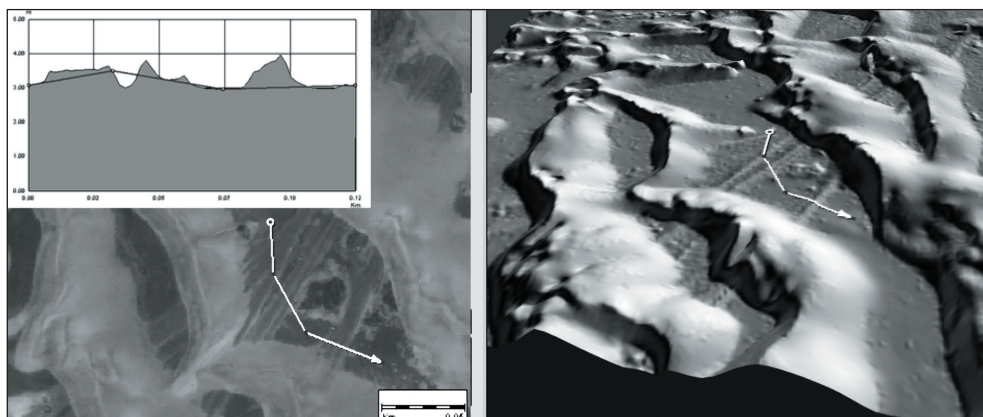


En segundo lugar, los resultados reflejan con claridad que cuando la información altimétrica exija una elevada precisión (riesgos de inundación, por ejemplo), el sensor aerotransportado lidar es la fuente de información de futuro. La combinación de un distanciómetro de barrido láser con los sistemas de navegación inercial (INS) y el GPS garantizan una calidad geométrica a los datos no accesible, con otras técnicas, para espacios de una determinada magnitud. La sensibilidad de la geomorfología litoral a la variable altimétrica (Fig.12) favorecerá el uso de estos sensores de forma habitual en el futuro, máxime si terminan por ser operativos los nuevos sensores lidar que trabajan en dos longitudes de onda: el infrarrojo

próximo para los terrenos emergidos y el verde para las áreas someras sumergidas (Finkl y otros, 2005; Moyles y otros, 2005). La progresiva aparición de empresas e instituciones que ofrecen esta tecnología, sin duda, contribuirá a descender los precios de los datos en el futuro y favorecerá su incorporación a un colectivo cada vez más amplio de especialistas temáticos.

Figura 12

IMAGEN QUICKBIRD DE 2003 Y VISIÓN TRIDIMENSIONAL DE MDE CON SOMBREADO DIGITAL CORRESPONDIENTE AL VUELO LIDAR REALIZADO EN NOVIEMBRE DE 2006 EN EL SISTEMA DUNAR DE MASPALOMAS. EL PERFIL ALTIMÉTRICO RECOGE LA ALTIMETRÍA (DE ORDEN SUBMÉTRICO) DE LAS ANTIGUAS BARRAS DE GRAVAS LITORALES SOBRE LAS QUE SE DESPLAZAN LAS DUNAS BARJANOIDES. ELABORACIÓN PROPIA.



Por último, cualquiera de las fuentes de información recogidas en este artículo proporciona un conjunto de datos morfométricos que amplifican su potencial al ser explotados temáticamente, por su carácter continuo espacialmente, en el contexto de métodos y técnicas que proporcionen herramientas de análisis adecuadas (algoritmos de interpolación, álgebra de mapas, correlación espacial, modelización,...) y, en este sentido, los Sistemas de Información Geográfica constituyen, sin duda, la opción más eficiente.

V. BIBLIOGRAFÍA

- ANFUSO, G. y DEL RÍO, L. (2003): «Cuantificación de las variaciones volumétricas y evolución del litoral entre Chipiona y Rota (Cádiz) durante el periodo (1996-1998)». *Geomorfología y Cuaternario*, nº 17 (3-4), págs. 17-27.
- BORJA, F., 1997. «Dunas litorales de Huelva (sw de España). Tipología y secuencia pleistoceno superior-Holoceno». En Rodríguez Vidal, J. (ed.): *Cuaternario Ibérico*. AEQUA, págs. 84-97.

- BROWN, D.G., ARBOGAST, A.F., 1999. «Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan». *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 65, págs. 467-474.
- CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA (1998): *Reconocimiento biofísico de espacios naturales protegidos. Doñana*. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, 311 págs.
- FINKL, C., BENEDIT, L. y ANDREWS, J., (2005): «Interpretation of seabed geomorphology based on spatial analysis of high-density airborne Laser bathymetry». *Journal of Coastal Research*, 21-3, págs. 501-514.
- FRAILE, P., (2005): *Niveles medios y máximos del mar en los mareógrafos del litoral andaluz*. Memoria de Investigación de Tercer Ciclo (inédita), Universidad de Sevilla.
- GARCÍA-NOVO, F.; RAMÍREZ DIAZ, L. and TORRES MARTINEZ, A., (1976): «El sistema de dunas de Doñana». *Naturalia Hispanica*, 5. Madrid, ICONA, 52 págs.
- MOYLES, D., ORTHMANN, A., LOCKHART, C. y DASILVA, J., (2005): «Hydrographic Mapping by combined operations using bathymetric lidar and multibeam ecosounder in Alaska». *Hydrographic Journal*, nº 117, págs. 17-21.
- GILI, J. A., GONZÁLEZ, J., PUIG, C., LANTADA, N., BUIILL, F., IBÁÑEZ, E., NÚÑEZ, A. y LÓPEZ R., (2003): «Perfiles GPSRTK para el estudio del manto eólico litoral del P.N de Doñana». *5ª Semana Geomática*, Barcelona, págs. 1-8.
- HERNÁNDEZ CALVENTO, L., (2002): *Análisis de la evolución del sistema de dunas de Maspalomas, Gran Canaria, Islas Canarias (1960-2000)*. Tesis Doctoral (Inédita), Departamento de Geografía de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 408 págs.
- HERNÁNDEZ, L., ALONSO, I., RUIZ, P., PÉREZ-CHACÓN, E., SUÁREZ, C. y ALCÁNTARA, J. (2002): «Decadal environmental changes on the dune field of Maspalomas (Canary Islands): Evidences of an erosive tendency». En VELOSO-GOMES, F. Y OTROS (Ed.): *Littoral 2002. The Changing Coast*. EUROCOAST, Oporto, Portugal, págs. 519-527.
- HERNÁNDEZ, L. y MANGAS, J. (2004): «Caracterización de los materiales sedimentarios aflorantes en el sistema de dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)». En BLANCO-CHAO, R., y OTROS (Ed.): *Procesos geomorfológicos y evolución costera*. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, págs. 67-81.
- HERNÁNDEZ, L., RUIZ, P., PÉREZ-CHACÓN, E., ALONSO, I., ALCÁNTARA-CARRIÓ, J. Y SUÁREZ, C. (2005): «Transformaciones ambientales en ecosistemas dunares producidas por el desarrollo turístico: el ejemplo de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias)». En SANJAUME, E. y MATEU, J. F. (Ed.): *Geomorfología litoral y Cuaternari*. Universitat de Valencia, Valencia, págs. 203-214.
- HERNÁNDEZ, A., PÉREZ-CHACÓN, E. y HERNÁNDEZ, L., (2006a): «Vegetation colonization processes related to the reduction in sedimentary contributions in the coastal dune field of Maspalomas (Gran canaria, Canary Islands, Spain)». *Journal of Coastal Research*, SI 48: págs. 69-76.
- HERNÁNDEZ, A., HERNÁNDEZ, L., PÉREZ-CHACÓN, E., MÁYER, P., ROMERO, L., ALONSO, I., SÁNCHEZ, I., MARTÍN, M., MEDINA, S. y MIRANDA, Y. (2006b): «Seguimiento de la dinámica de dunas litorales en la playa de Maspalomas (Gran

- Canaria, Islas Canarias, España». En PÉREZ-ALBERTI, A. y LÓPEZ BEDOYA, J. (Eds.): *Geomorfología y territorio*. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, págs. 389-400.
- LEVIN, N., (2006): «The Palestine Exploration Fund Map (1871–1877) of the Holy Land as a Tool for Analysing Landscape Changes: the Coastal Dunes of Israel as a Case Study». *The Cartographic Journal*, vol. 43, n°1, págs. 45-67.
- MITASOVA, H., OVERTON, M. y HARMON, R. S. (2005): «Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina». *Geomorphology*, 72, págs. 204-221.
- OJEDA ZÚJAR, J. y MÁRQUEZ PÉREZ, J. (1997): «Modelos digitales de elevaciones (MDE) para la caracterización altimétrica de espacios marismesños: las marismas del Odiel (Huelva, España)». *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 10 (1-2), págs. 147-161.
- OJEDA, J. Y VALLEJO, I. (2004): «El Empleo de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) para la Caracterización Geomorfológica del Sistema de Dunas Móviles del Parque Nacional de Doñana (Huelva)». En BLANCO-CHAO, R. y OTROS (Eds.): *Procesos geomorfológicos y evolución costera*. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, págs. 119-132.
- OJEDA, J., VALLEJO, I. y MALVÁREZ, G. C. (2005): «Morphometric evolution of the active dunes system of the Doñana National Park, Southern Spain (1977-1999)». *Journal of Coastal Research*, SI 49, págs. 40-45.
- OJEDA ZÚJAR, J., MÁRQUEZ PÉREZ, J. y GÓMEZ, A. (2006): «Restitución analítica, estéreo-correlación y lidar para la generación de modelos digitales de terreno en marismas mareales». En CAMACHO, M. T. y OTROS (Eds.): *El acceso a la información espacial y nuevas tecnologías geográficas*, Editorial de la Universidad de Granada, págs. 1121-1134.
- SAYE, S.E y OTROS (2006): «Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data». *Geomorphology*, 72 (1-4), págs. 128-155.
- SIMAS, T., NUNES, J. P. y FERREIRA, J. G. (2001): «Effects of global climate change on coastal salt marshes». *Ecological Modelling*, 139, (1), págs. 1-15.
- STEPHENSON, W. J. y BRANDERB, R. W. (2003): «Coastal geomorphology into the twenty-first century». *Progress in Physical Geography*, 27, 4, págs. 607-623.
- TORRES MARTÍNEZ, A. (1975): *Estudio ecológico cuantitativo de los sistemas de dunas y marisma de la Reserva Biológica de Doñana*. Tesis doctoral inédita. Universidad de Sevilla. 303 págs.
- VANNEY, J. R. y MENANTEAU, L. (1979). *Types de reliefs littoraux et dunaires en basse Andalousie (de la ria de Huelva à l'embouchure du Guadalquivir*. Sevilla, Publicaciones de la Casa de Velázquez, 15, 52 págs.