

Cruz Averó, N., Vallejo Villalta, I., Hernández Calvento, L. y Ojeda Zújar, J. (2010): Sectorización del campo de dunas de Corralejo (Fuerteventura, Islas Canarias) mediante la integración de características espectrales y morfométricas derivadas de datos LIDAR: propuesta metodológica y resultados preliminares. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 788-802. ISBN: 978-84-472-1294-1

SECTORIZACIÓN DEL CAMPO DE DUNAS DE CORRALEJO (FUERTEVENTURA, ISLAS CANARIAS) MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES Y MORFOMÉTRICAS DERIVADAS DE DATOS LIDAR: PROPUESTA METODOLÓGICA Y RESULTADOS PRELIMINARES

Cruz Averó, N. ¹, Vallejo Villalta, I. ², Hernández Calvento, L. ¹ y Ojeda Zújar, J. ²

(1) Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, C/Pérez del Toro, nº1, 35003, Las Palmas de Gran Canaria, ncruz@becarios.ulpgc.es; lhernandez@dgeo.ulpgc.es

(2) Universidad de Sevilla, C/ Doña María de Padilla, s/n, 41004, Sevilla, ivallejo@us.es; zujar@us.es

RESUMEN

Se presenta en este trabajo una propuesta metodológica para la sectorización del campo de dunas de Corralejo (Fuerteventura, Islas Canarias) a partir de características morfoespectrales extraídas de MDT y ortofotos derivados de un vuelo combinado de cámara digital y sensor LIDAR. Los resultados preliminares obtenidos de diversas combinaciones son comparados con los resultados de otras sectorizaciones establecidas a través de otros métodos no cuantitativos.

Palabras Clave: LIDAR, SIG, sectorización, sistemas sedimentario eólicos, Islas Canarias.

ABSTRACT

In this paper we present a methodology for the sectorization of the Corralejo's dunes field (Fuerteventura, Canary Islands) using morphological and spectral features extracted from DTM and orthophotos from a flight that combined a digital camera and a LIDAR sensor. Preliminary results obtained from different combinations are compared with the results from other sectorization established through other methods rather than quantitative.

Key Words: LIDAR, GIS, sectorization, aeolian sedimentary systems, Canary Islands.

INTRODUCCIÓN

Los espacios costeros, como ámbitos de gran dinamismo, complejidad y fragilidad, requieren de fuentes de datos de gran precisión y carácter sincrónico para que de su análisis puedan derivarse estrategias de gestión efectivas. Los sistemas de dunas móviles litorales representan un claro exponente de esta realidad, teniendo en cuenta aspectos como la movilidad de sedimentos y geoformas, las fluctuaciones en la línea de costa y los cambios en los usos del suelo, producidos tanto en sus alrededores como en su interior por las fuertes presiones

socioeconómicas a las que han venido siendo sometidos en las últimas décadas (Mitasova et al., 2005). No obstante, son ampliamente reconocidas las carencias en cuanto a calidad y cantidad de las fuentes de datos tradicionales para el estudio de las zonas costeras en general y de los sistemas dunares en particular. Entre sus limitaciones, cabe destacar los problemas de precisión geométrica de la variable altura, tan fundamental para el estudio de las morfologías específicas y con evolución diferencial propias de los espacios dunares (Vallejo y Zújar, 2008). De aquí la importancia del desarrollo de nuevos métodos y técnicas para la extracción de información, impulsadas en los últimos años por los avances en las Tecnologías de la Información Geográfica.

En el seno de las nuevas fuentes de información espacial, la tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*) constituye una de las herramientas más útiles para la extracción de variables topográficas con gran precisión. La tecnología láser aerotransportada, que iniciara su desarrollo en torno a las décadas de los años setenta y ochenta, ha conseguido ver generalizadas en la actualidad variadas aplicaciones prácticas (Ackermann, 1999). El alto nivel de cobertura espacial, la elevada exactitud altimétrica, la idoneidad en la caracterización de microtopografías y las posibilidades de realizar seguimientos multitemporales son las principales ventajas de su aplicación en el caso concreto de los estudios sobre sistemas de dunas litorales, especialmente cuando éstos son móviles, dada la posibilidad de realizar el seguimiento de su dinámica (Vallejo et al. 2007). Además, resulta de gran utilidad la posibilidad de captar otra información espectral si, de manera conjunta, se realizan vuelos combinados con sensores LIDAR y cámaras fotogramétricas digitales. Con ello es posible extraer tanto modelos digitales como imágenes multiespectrales, de interés en numerosos estudios, como los dedicados al análisis de parámetros morfométricos en campos de dunas (Cruz et al., 2009), o en caracterizaciones medioambientales donde los objetivos se centran principalmente en la gestión de estos espacios costeros (Fernández et al., 2009).

En el caso concreto de los sistemas sedimentarios eólicos de Canarias, la evolución que en las décadas han experimentado herramientas, métodos y técnicas englobadas en las tecnologías de la información geográfica (TIG) ha favorecido avances significativos en su conocimiento, especialmente en lo que respecta a su dinámica (Hernández-Cordero et al., 2006, 2008; Vallejo et al., 2009). Estas investigaciones se han centrado principalmente en el campo de dunas de Maspalomas (Gran Canaria), espacio que ha funcionado, en este sentido, como laboratorio de pruebas, dada su compleja dinámica ecoantrópica.

El objetivo ahora es aplicar estas tecnologías al estudio de la dinámica espacio-temporal de otro sistema de dunas de especial importancia en el Archipiélago, el campo de dunas de Corralejo (Fuerteventura), objeto de estudio de este trabajo. Sobre este espacio se han desarrollado en las últimas décadas diversas investigaciones que, entre otros aspectos, han abordado en profundidad la geología y geomorfología del sistema (Criado, 1987; Criado et al., 2004, 2007). También se han llevado a cabo trabajos que abordan la sectorización y caracterización de este campo de dunas (Dirección General de Costas, 2006; Cruz, et al., en prensa). Considerando estos antecedentes, el objetivo principal de este trabajo es presentar una propuesta preliminar de procedimiento para la extracción de variables morfométricas y espectrales con las que establecer clasificaciones que permitan caracterizar y sectorizar este sistema de dunas. A diferencia de estos antecedentes, en los que la delimitación de unidades ambientales se ha abordado a través de métodos clásicos de fotointerpretación y posterior digitalización de unidades con características semejantes, siguiendo, por tanto, un criterio sistémico, se propone este trabajo el desarrollo, de forma preliminar, de un procedimiento de clasificación de variables, atendiendo a los valores que se obtengan de la integración de los datos digitales presentados anteriormente.

ÁREA DE ESTUDIO

Localizado en el extremo noreste de Fuerteventura, el campo de dunas de Corralejo (1829 Ha, aproximadamente) constituye el único sistema sedimentario-eólico activo que se conserva en la isla de Fuerteventura, y junto con Maspalomas (en Gran Canaria), uno de los dos campos de dunas móviles que aun prevalecen en el Archipiélago Canario (Hernández et al., 2009).

Entre los factores de importante contribución al funcionamiento del sistema, cabe hacer referencia, en primer lugar, a algunos de sus rasgos climáticos. Destaca, por una parte, la elevada sequedad, (85,1 mm de precipitación media y sequía estival), relacionada con su localización latitudinal, su cercanía al África sahariana y la ausencia de elevaciones montañosas que retengan los vientos alisios. Asimismo, cabe señalar la predominancia de las componentes N y NNO en los vientos, cuya alta velocidad media determina un transporte efectivo de sedimentos arenosos norte-sur. Esta dirección del transporte sedimentario también se relaciona con la presencia del islote de Lobos, cuya situación unos 2 km al noreste de Corralejo, establece cambios en el viento, así como efectos de refracción y difracción en el oleaje que definen una deriva litoral de sedimentos hacia el sur. El suave relieve costero

en los primeros 4 km, de norte a sur, condiciona a su vez el desarrollo de playas arenosas, siendo más frecuentes en el sur los salientes rocosos de naturaleza volcánica, dada la presencia del edificio de Montaña Roja. Ello explica que las interpretaciones recientes apunten a la entrada de sedimentos al sistema a través de las playas situadas al sur de Punta Tivas, teniendo asimismo en cuenta que el acceso por la zona norte ha quedado obstaculizado casi por completo con el crecimiento en las últimas décadas del núcleo urbano-turístico de Corralejo. En investigaciones recientes (Dirección General Costas, 2006) se ha identificado un déficit sedimentario, especialmente acusado en el sector norte del campo de dunas, donde se constata la ausencia de geoformas dunares relevantes desde el punto de vista del transporte sedimentario eólico. Éstas se desarrollan desde la zona central del sistema hacia el sur, siendo predominantes las tipologías de cordones barjanoides. (Cruz et al. en prensa)

La vegetación del campo de dunas ha desarrollado estrategias de adaptación a estas condiciones climáticas y a la dinámica sedimentaria eólica, así como a otros factores, como la distancia al mar y las actuaciones antrópicas. En este sentido, la mayoría de las especies son xerófitas, psamófilas y halófilas, adaptadas a la aridez climática, a la movilidad del sustrato y a la alta salinidad, respectivamente. La distribución de las comunidades vegetales atiende a estos condicionantes, siendo también destacable el tipo de sustrato a la hora de diferenciar entre la vegetación de arenas y la vegetación de las arenas sobre malpaís (Fernández et al, 1982). Así, puede hablarse de una disposición en bandas desde la costa hacia el interior: una primera franja compuesta por matorrales de *Traganum moquinii*, tras la que se desarrollan comunidades de *Euphorbia paralias*, de *Ononis natrix* y aulagares de *Launaea arborescens* en las zonas activas. Ya hacia el interior, en zonas más estabilizadas donde la arena se funde con el malpaís, predominan salsolares de *Salsola vermiculata*. Las actividades humanas introducen algunas modificaciones en esta distribución, a consecuencia del pastoreo, la extracción de sedimentos, la introducción de especies de jardinería o la degradación de la vegetación por el uso intensivo del litoral. Estas y otras intervenciones antrópicas son asimismo las responsables de los principales problemas ambientales que afectan al sistema, tal y como se ha venido argumentando. Entre estos, destaca la alteración de la dinámica eólica y sedimentaria derivada de la proliferación de edificaciones turísticas y residenciales, acontecida desde que a mediados de los años setenta se revalorizara el interés turístico por la zona y se produjera con ello una profunda modificación de su régimen de usos. Por otra parte, el reconocimiento de los valores ambientales del sistema se ha visto materializado a través de distintas iniciativas de protección, que si bien son varias y de diversa índole (Parque Natural, zona de especial protección para aves -ZEPA- y lugar de interés comunitario -LIC-) no han impedido su progresivo deterioro (Cruz et al. en prensa).

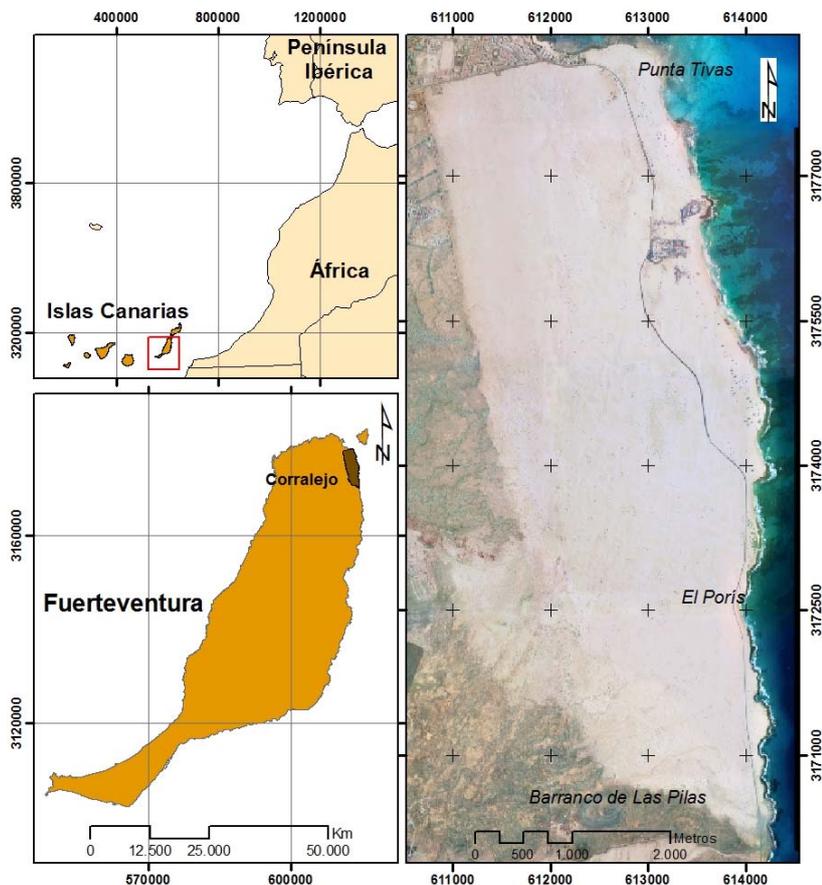


Figura 4. Localización del campo de dunas de Corralejo

METODOLOGÍA

Los datos utilizados han sido derivados de los productos capturados en un vuelo combinado de sensor LIDAR aerotransportado (ALS50 II) y cámara fotogramétrica digital (DMC), realizado entre los días 15 y 21 de Febrero de 2009 sobre el campo de dunas y sus alrededores (2589 Ha.) con una altura de vuelo de 900 m. sobre el terreno.

Con respecto a las características básicas y a la parametrización de los sensores, cabe indicar para el caso del LIDAR, un ángulo de visión (FOV) de 48°, la captación de hasta 4 echos de 1 intensidad por retorno, una densidad promedio de 1,38 ptos/m² y una precisión de entre 9 y 11 cm. en la dirección de la pasada. Por su parte, la cámara digital se caracteriza por un GSD nominal de 9 cm., una resolución espectral de 4 bandas multispectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) y una pancromática, y una resolución radiométrica de 12 bits.

De los datos brutos capturados por sendos sensores, esto es, la nube de puntos registrada por el sistema LIDAR (formato LAS) y las imágenes pancromáticas y multispectrales obtenidas con la cámara, se derivan los productos finales que constituyen las fuentes de información de partida empleadas. Su descripción es la que sigue:

- Modelo digital del terreno (MDT), con 1 m. de resolución espacial.
- Ortofotografías mosaicadas de 3 bandas, con composiciones RGB en color natural y en falso color (IRC, rojo y verde), ambas con resolución geométrica de 9 cm. y radiometría de 8 bits por píxel.

En la secuencia metodológica seguida se distinguen las siguientes etapas:

1. Elección de variables a incorporar en el análisis; se seleccionaron como aspectos de interés las variables morfométricas de altitud, pendiente del terreno y altura de la vegetación, y como variables de carácter espectral las bandas del rojo, verde, azul e infrarrojo cercano de las ortofotos.

2. Obtención de nuevos productos derivados, dado que no todas las variables seleccionadas se encontraban disponibles a priori.
 - 2.1. Partiendo de la nube de puntos capturada por el sensor LIDAR, se generó, en primer lugar, un modelo digital de alturas de la vegetación (MDAV). Para ello, los ficheros LAS, que tras el primer postproceso sólo permiten distinguir las categorías terreno/no terreno, fueron sometidos a nuevas clasificaciones (haciendo uso de las herramientas de clasificación de los módulos *Terrascan* y *Terramodel* del software *Microstation*), fundamentadas en criterios geométricos y basadas principalmente en datos de elevación. Con ello se individualizaron las clases *edificación* y *vegetación*; cabe destacar que en el caso de la vegetación se especificó como criterio el rango de elevación comprendido entre 15 cm. y 10 m; se excluye con ello a una parte de la vegetación de porte herbáceo, establecido generalmente entre 0 y 50 cm., para procurar una menor confusión con las rugosidades del terreno de elevación inferior a la altura mínima especificada. Una vez separadas como clases independientes, fue posible generar en el mismo software nuevos modelos para cada clase (modelo *edificación* y modelo *vegetación*), con la intención final de obtener un modelo de superficies (MDS). Este último se obtuvo de la suma del modelo de vegetación recién creado y el MDT disponible (haciendo uso de *Global Mapper*). Quedó excluida, por tanto, la edificación, al ser la vegetación de mayor interés para los objetivos que se abordó en este trabajo. Mediante nuevas combinaciones de capas (también en *Global Mapper*), se extrajo del modelo de superficies creado la altura del terreno (MDS - MDT), obteniendo así el modelo final de alturas de la vegetación (MDAV), con 1 m. de resolución espacial.
 - 2.2. Se obtuvo un modelo digital de pendientes (MDP) derivado del MDT, también con 1 m. de resolución espacial (utilizando el módulo *Spatial Analyst* del programa *ArcGIS*).
3. Integración del conjunto de variables seleccionadas (MDT, MDAV, MDP y bandas espectrales), remuestreo de las bandas del rojo, verde, azul e infrarrojo cercano a la resolución de los modelos (1 m.) y normalización del rango de valores que toma cada variable a partir de su reclasificación de 0 a 255 niveles digitales (haciendo uso de *ArcGIS*).
4. Clasificación digital de las variables seleccionadas a partir del método no supervisado, considerando varias posibilidades: una primera clasificación a partir de variables morfométricas (MDT, MDAV y MDP); una segunda que considera sólo variables espectrales (bandas azul, verde, roja e IRC); y por último, una tercera clasificación con criterios morfoespectrales, que integra a las dos anteriores (empleando asimismo *ArcGIS* para estas clasificaciones). En este ejercicio cabe diferenciar las siguientes fases:
 - 4.1. Definición digital de clases, usando como criterio de agrupación de píxeles con ND homogéneos (*cluster*) el algoritmo *Isodata*, a través de la opción *Isocluster*. Como parámetros de control más relevantes se especificaron 10 clases y 20 interacciones.
 - 4.2. Asignación de los píxeles a las clases correspondientes, usando como entrada el archivo de firmas generado en la fase anterior y el método de clasificación de máxima probabilidad, al ser el uno de los que se ajustan con mayor rigor a la disposición original de los datos (Chuvieco, 2007).

RESULTADOS

Valoración de las clases definidas

Con los resultados obtenidos de las clasificaciones realizadas, se inspeccionaron en primer lugar, los archivos de firmas generados tras la fase de definición digital de clases, para examinar las tendencias medias que tomaba cada categoría y con ello evaluar la definición de clases.

Se construyeron así diagramas de firmas para cada clasificación, en los que se recogen las bandas o variables que intervienen en el análisis (eje x) y los valores medios que toman los píxeles en las distintas categorías (eje y). El correspondiente a la clasificación con variables morfométricas, resalta que la heterogeneidad de valores medios es máxima para la variable altitud, disminuye en la variable pendiente y es mínima en la variable altura de la vegetación. Resulta obvio si se tiene en cuenta que, sin la normalización de las variables, el rango de altitudes es mucho mayor que el de altura de la vegetación; no obstante, se considera oportuno resaltar este aspecto, puesto que puede desprenderse de ello que la discriminación entre clases presenta menos problemas considerando la altitud del terreno. Se distingue una tendencia similar en la distribución de valores medios de las clases, pues por lo general presentan valores más elevados para la variable altitud, que disminuyen en gran medida en la variable altura de la

vegetación y vuelven a aumentar en la variable pendientes. Los comportamientos más peculiares los muestran la clase 2, con un valor medio de pendiente muy alto, así como las clases 8 y 10, que presentan los valores medios más elevados para la altura de la vegetación.

De la segunda clasificación, realizada con las variables espectrales, resulta un gráfico de firmas en el que los valores medios de todas las clases aumentan desde la banda del azul hacia la del rojo, y decrecen nuevamente en el infrarrojo cercano en la mayoría de los casos, sin que se muestren grandes contrastes. El infrarrojo y el rojo son las bandas que registran los valores medios más elevados, mientras que el azul comprende los valores más bajos. Aunque no se trata de un gráfico de curvas espectrales, propiamente dicho, se pone claramente de manifiesto el comportamiento espectral típico de la arena desnuda. Cabe señalar los casos de las categorías 1 y 2, que son las únicas que en la banda del infrarrojo tienen un valor medio más alto.

La tercera clasificación, que integra aspectos morfométricos y espectrales, muestra a grandes rasgos las tendencias comentadas en las dos clasificaciones anteriores. Se distinguen, no obstante, algunas variaciones en el comportamiento de las siguientes clases: la 9, aumenta significativamente su valor medio, que ahora es alto, en contraposición con la clase 2, que en la primera clasificación era la que registraba el dato más alto, pero que con la integración de las variables espectrales pasa a tener una menor influencia en cuanto a valor medio. En el rango de las variables espectrales, las clases 1 y 2 ahora se distancian con respecto a la separación de valores medios que presentaban en la segunda clasificación; por otra parte la clase 8 muestra un decremento considerable, pasando de valores altos y muy altos en la segunda clasificación a valores medios.

El archivo de firmas permitió también generar un inventario del área clasificada, considerando el número de píxeles incluidos en cada clase. En la clasificación con variables morfométricas, las clases 3 y 5 resultan ser las que cuentan con un mayor número de píxeles, representando el 21% y el 18%, respectivamente, del total de píxeles de las capas de entrada, lo cual se evidencia también en la extensión superficial que ocupan ambas clases en la imagen final resultante de la clasificación. Las clases 2 y 8, con el 1% y el 3% son las que cubren una menor superficie. En el caso de la clasificación de variables espectrales, las categorías que cuentan con mayor representación en función del número de píxeles son la 6 y la 7 (21% y 22%) y de menor extensión la 1 y la 2 (2% y 3% respectivamente). En la tercera clasificación, se repiten las tendencias de las clases 6 (21%) y 1 (2%), que siguen siendo las que ocupan mayor y menor superficie, respectivamente.

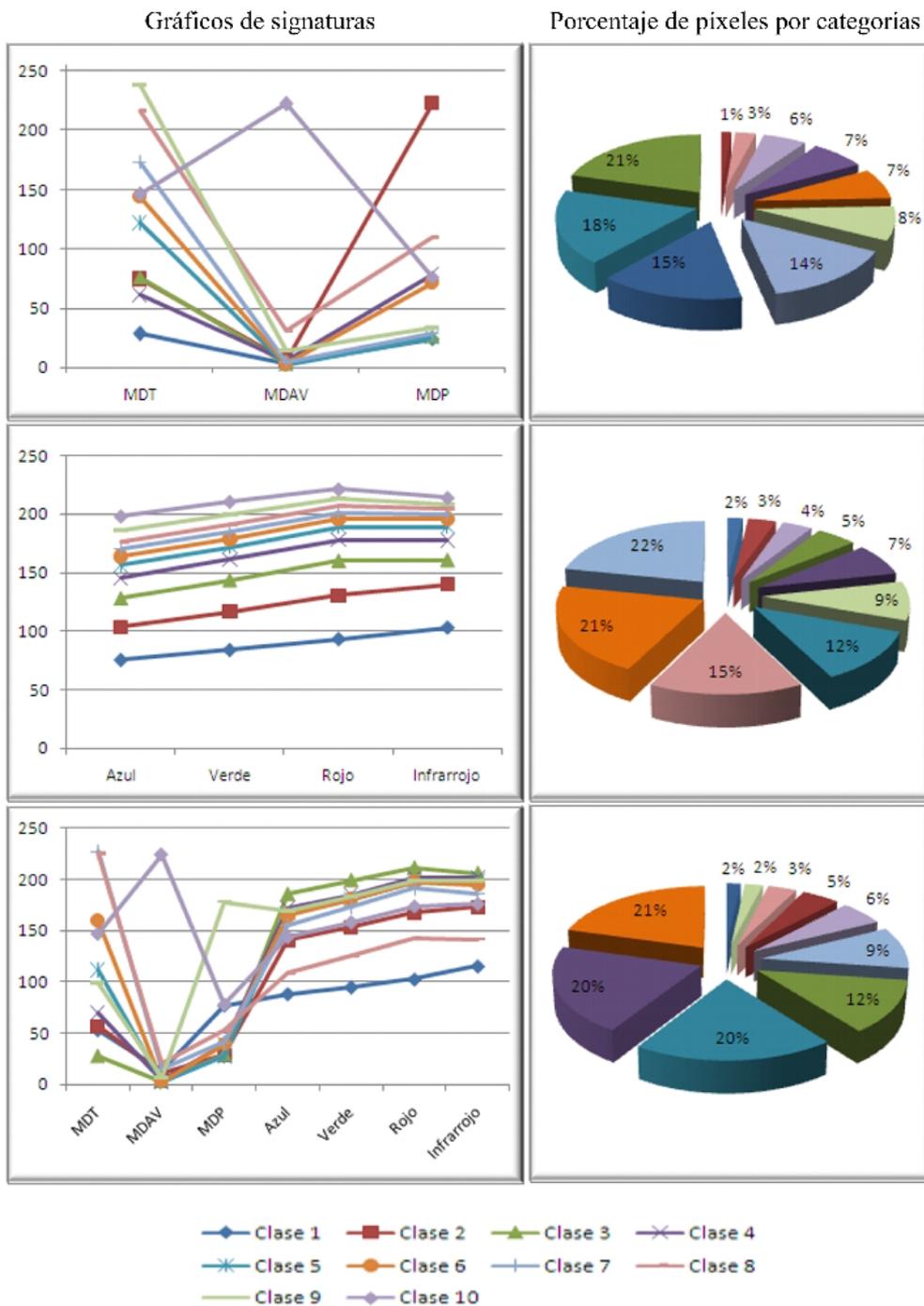


Figura 2. Resultados de la definición digital de clases. En orden descendente se muestran los resultados de la clasificación morfométrica, de la clasificación espectral y por último de la clasificación morfoespectral.

Asignación de clases

El resultado de la última parte del proceso de clasificación es una imagen en la que cada píxel se ha adscrito a una de las clases definidas anteriormente, por lo que, en definitiva, muestra la distribución espacial de las categorías. A partir de las apreciaciones extraídas de la fase anterior, del patrón y distribución espacial que describan en la imagen y, muy especialmente, del conocimiento del área de estudio, se han traducido las clases obtenidas con

cada clasificación en categorías temáticas o coberturas. El apoyo en la ortofoto también ha sido de gran importancia en este sentido.

Con respecto a las categorías que se identifican, con todas las clasificaciones realizadas se distinguen las construcciones urbanas más significativas (clase 2 de la clasificación morfométrica, clases 1 y 10 de la clasificación espectral y clase 9 de la clasificación morfoespectral); estas son: los hoteles situados en la mitad norte del sistema, próximos a la línea de costa, la carretera que lo cruza de norte a sur, y dos pequeñas parcelas edificadas situadas en el extremo septentrional. No obstante, aparecen incluidos en estas clases otras coberturas no urbanas; en las clasificaciones morfométrica y morfoespectral se mezclan con la vegetación más alta y con las caras de avalancha de algunos cordones de dunas, posiblemente porque la edificación está relativamente próxima a estas coberturas en cuanto a valores de altura o pendiente. En la clasificación con variables espectrales, los elementos urbanos pintados de blanco se confunden con los sectores de arena muy clara y poco compactada, pues todos ellos se caracterizan por valores altos de reflectividad.

Se señalan también en las tres clasificaciones las pendientes más acusadas, representativas de las caras de avalancha, del frente y de la dirección de avance de las dunas, aunque existen matices en función de las variables de entrada de la clasificación. La primera clasificación distingue la pendiente en dos clases (4 y 6), la segunda sólo en una (10) y la tercera únicamente las incluye en la clase que recoge las construcciones urbanas (9). La extensión que éstas ocupan también difiere en cada clasificación, siendo mayor en las dos primeras (morfométrica y espectral). Cabe señalar que en la primera clasificación, al incluir dos clases, y por tanto detallar en mayor medida los rangos de pendiente, se recogen más claramente las variaciones de pendiente que son consecuencia de las huellas de antiguas extracciones de arena que se localizan en el sector norte del campo de dunas. La tercera clasificación también permite identificarlas, aunque con menos claridad, y por su parte, la clasificación de variables espectrales las incluye en la clase de sustrato arcilloso (4), que goza de buena representación en esta clasificación, ya que registra la tonalidad más oscura de este sustrato.

La vegetación es otra de las coberturas identificadas; a pesar de mezclarse en ocasiones con las clases que representan los elementos urbanos, por lo general se presenta bien definida en las imágenes finales. Tanto los ejemplares de balancón (*Traganum moquinii*) distribuidos en la franja de influencia marina, como el resto de especies del interior del sistema dunar, se identifican claramente en las tres clasificaciones (clase 10 en la primera clasificación, 2 en la segunda, y 1, 2, y 10 en la tercera). En función de su ubicación, de su patrón espacial y de su densidad (o cobertura) dan asimismo indicios de la localización de elementos o ambientes importantes asociados a los ejemplares o comunidades vegetales: las dunas en montículo formadas por balancones en la franja costera, constitutivas de la duna costera, primaria o *foredune*; las áreas semiestabilizadas, donde la menor movilidad del sedimento está vinculada a una cobertura vegetal mayor que la de las arenas libres; y los espacios interdunares, donde se concentra la mayor parte de la vegetación de la zona de dunas móviles.

A la zonificación de ambientes contribuyen también el resto de clases obtenidas, de manera aún más significativa si cabe. Con cualquiera de los tres criterios de clasificación, se distingue, por una parte, el sector de mayor influencia litoral (clases 1, 9 y 3 de las clasificaciones primera, segunda y tercera, respectivamente), que constituye la zona de entrada y salida de arena al/del sistema y que por lo tanto, cuenta con dinámica eólica-sedimentaria activa. Cabe señalar que la extensión superficial de este ámbito difiere según las variables que participen en la clasificación; la clasificación morfométrica y la morfoespectral le asignan una mayor superficie en el sector norte, mientras que si se considera únicamente el criterio espectral, esta zona quedaría restringida a una estrecha franja próxima a la costa. La diferencia se debe a que la incorporación de variables morfométricas determina que prime la altitud para establecer la zonificación, y por consiguiente, se esté indicando con esta clase la zona más baja, que incluye un sector más amplio. En este sentido, el resto de clases de las clasificaciones morfométrica y morfoespectral (3, 5, 7 y 9 para la primera, y 4, 5, 6, y 7 para la tercera clasificación) continúan con la diferenciación de rangos de altitud del sistema, que aumenta progresivamente hacia el límite occidental. También hay una cierta correspondencia con la movilidad del sustrato, pues las clases que identifican rangos de altitud intermedia (3, 5 y una parte importante de la 7 en la clasificación morfométrica; 4, 5 y 7 en la morfoespectral) se corresponden con las zonas de mayor movilidad, en las que se concentran las geoformas barjanoides, separadas por los espacios interdunares, que avanzan hacia el sur; por otra parte, las clases que señalan la zona más alta (9 y 7), son también las de menor movilidad y las de mayor influencia del malpaís, que limita con el campo de dunas en el sector occidental.

En la clasificación con variables espectrales, esta correspondencia entre clases y ambientes con diferente grado de actividad sedimentaria-eólica es máxima. Aquí juegan un papel fundamental las diferentes respuestas espectrales del sustrato en función de su movilidad (asociada también al grado de compactación), pedregosidad, contenido en arcilla y colonización vegetal. Con estos preceptos, la clasificación espectral distingue también el

ambiente más dinámico (clases 6, 7 y 8), en la zona central, del más estabilizado (clases 4, 3, 2, y 6), que se extiende por todo el borde oeste y por un sector más reducido en la parte norte, que abarca desde la zona oeste de la carretera hasta el sur de los hoteles. Con la distribución y el patrón espacial de las clases en cada ámbito, es posible diferenciar inclusive las geoformas en la zona de mayor movilidad, distinguiéndose las vertientes a barlovento de la mayor parte de las dunas y cordones (clase 6). Esto a su vez facilita el reconocimiento de la zona sin geoformas dunares propiamente dichas, que se extiende a modo de cuña por el norte de la parte móvil, debido al efecto de obstaculización de la entrada de sedimentos a consecuencia del desarrollo del núcleo urbano-turístico de Corralejo y a las extracciones de arena que se llevaron a cabo de forma paralela al crecimiento urbano. En cuanto a la zona de menor movilidad, el alto grado de mezcla entre distintas clases (principalmente 2, 3, 4, y 6), permite apreciar la conjunción de arena, arcilla, materiales volcánicos y vegetación propia de un ambiente estabilizado y/o en proceso de estabilización.

DISCUSIÓN

Las sectorizaciones obtenidas han sido comparadas con las realizadas en otros estudios, basadas en criterios geomorfológicos y ambientales y desarrolladas mediante métodos tradicionales de fotointerpretación de unidades homogéneas con apoyo de trabajo de campo (Dirección General de Costas, 2006; Cruz et al., en prensa). De esta comparación se han obtenido similitudes, que permiten valorar las fuentes de datos y la metodología empleada.

Con respecto a los resultados de Dirección General de Costas, 2006, se confirma la identificación y zonificación de los ambientes sedimentarios propuestos por este trabajo (zonas estabilizadas, con arenas móviles y con dunas), pues a pesar de estar basado en datos de 1987 y 2002 y de que la extensión de sus límites presentan algunas diferencias con respecto al presente, se mantiene en líneas generales dicha sectorización entre ambas delimitaciones. Cabe especificar que se dan las mayores coincidencias si se considera la clasificación con variables espectrales. No obstante, las clasificaciones morfométricas y morfoespectrales, aunque no se ajustan de forma precisa en todas las clases, son asimismo coincidentes, en la medida en que permiten deducir la diferenciación de los principales ambientes.

Pueden extraerse las mismas apreciaciones de la comparativa con los resultados de Cruz et al. (en prensa) - basada en datos de 2009-, puesto que las variables espectrales son también las que se ajustan en mayor medida a los resultados de dicho estudio. Asimismo, conviene indicar que el referido trabajo hace uso de dos escalas de detalle o rangos espaciales, que van de lo general a lo particular, y que en el primero de estos rangos (el de escala general) se han identificado 4 unidades (zona con alto grado de alteración antropogénica, área de influencia litoral, dunas móviles con morfología barjanoide y arenales sobre malpaís) y en el segundo (escala detallada) 43 subunidades. Dado que aquí se han definido tan sólo 10 clases, la sectorización resultante es comparable únicamente con la del primer rango. Por otra parte, también debe tenerse en cuenta que los criterios que intervienen en la delimitación de unidades en Cruz et al. (en prensa) son de carácter ambiental y por consiguiente, incorporan otros matices, tales como la concentración de impactos, que no se recogen de manera explícita en las variables morfométricas o espectrales que se han manejado en el presente trabajo. Es por esto que en el caso concreto de la unidad "zona de dunas móviles con morfología barjanoide" de ese estudio previo, no haya quedado incluida la franja de dinámica activa sin geoformas dunares identificada a partir de la clasificación espectral, sino que ésta se ha considerado parte de la "zona con alto grado de alteración antropogénica" por su localización en un entorno altamente modificado por las actividades humanas. Por las mismas razones, el sector costero de esta última unidad no se incluye dentro del "área de influencia litoral". Por último, con respecto a las unidades que conforman el segundo rango, a pesar de no ser comparables por su nivel de detalle, podrían verse matizadas tanto por las variables morfométricas como por las espectrales, que podrían contribuir a la corrección de sus límites o a su subdivisión, por ejemplo, para separar sectores en función de la altitud o de la cobertura vegetal.

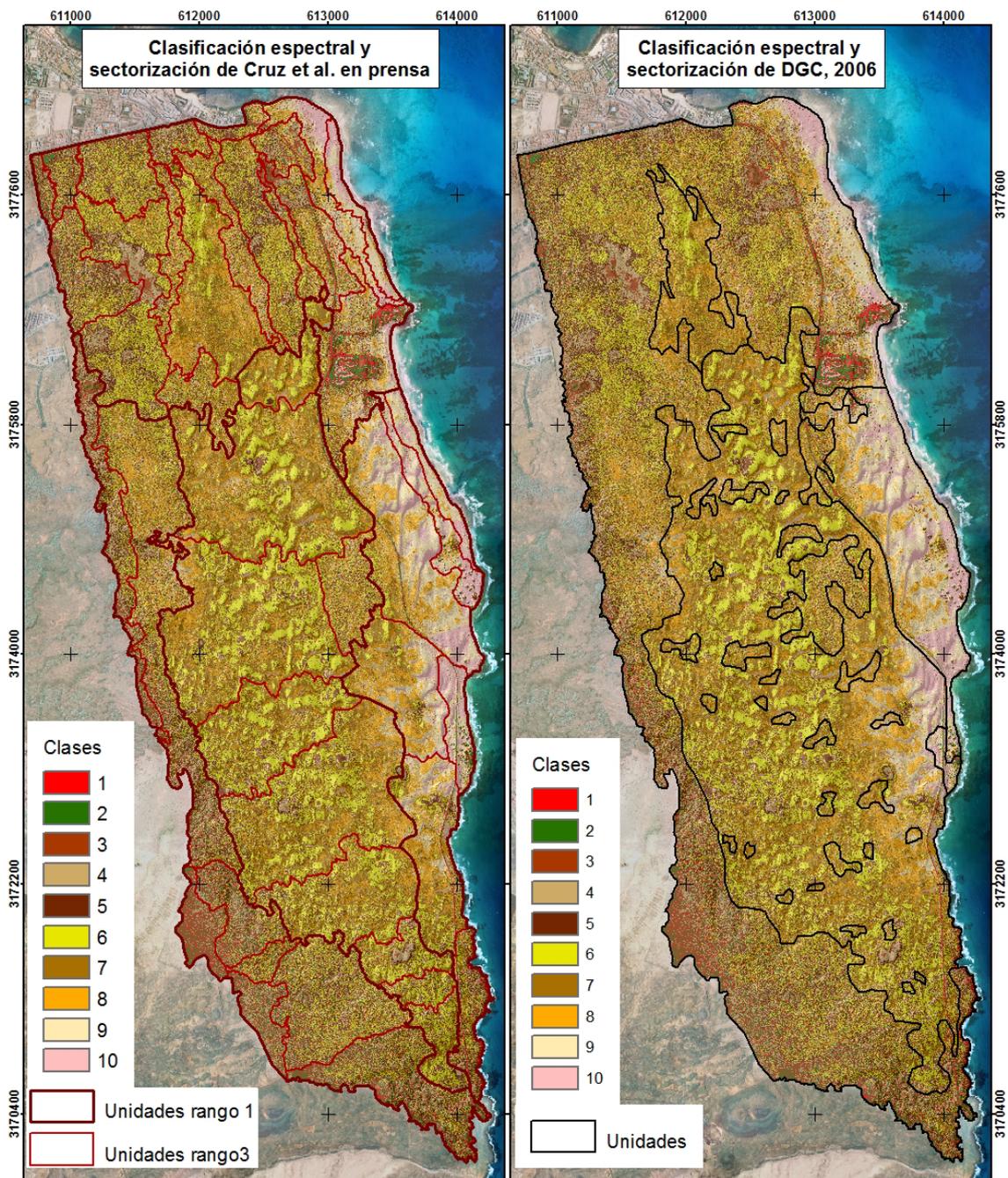


Figura 3. Imagen final resultado de la clasificación con variables espectrales comparada con la sectorización establecida en trabajos previos. (Unidades de Dirección General de Costas, 2006 adaptadas).

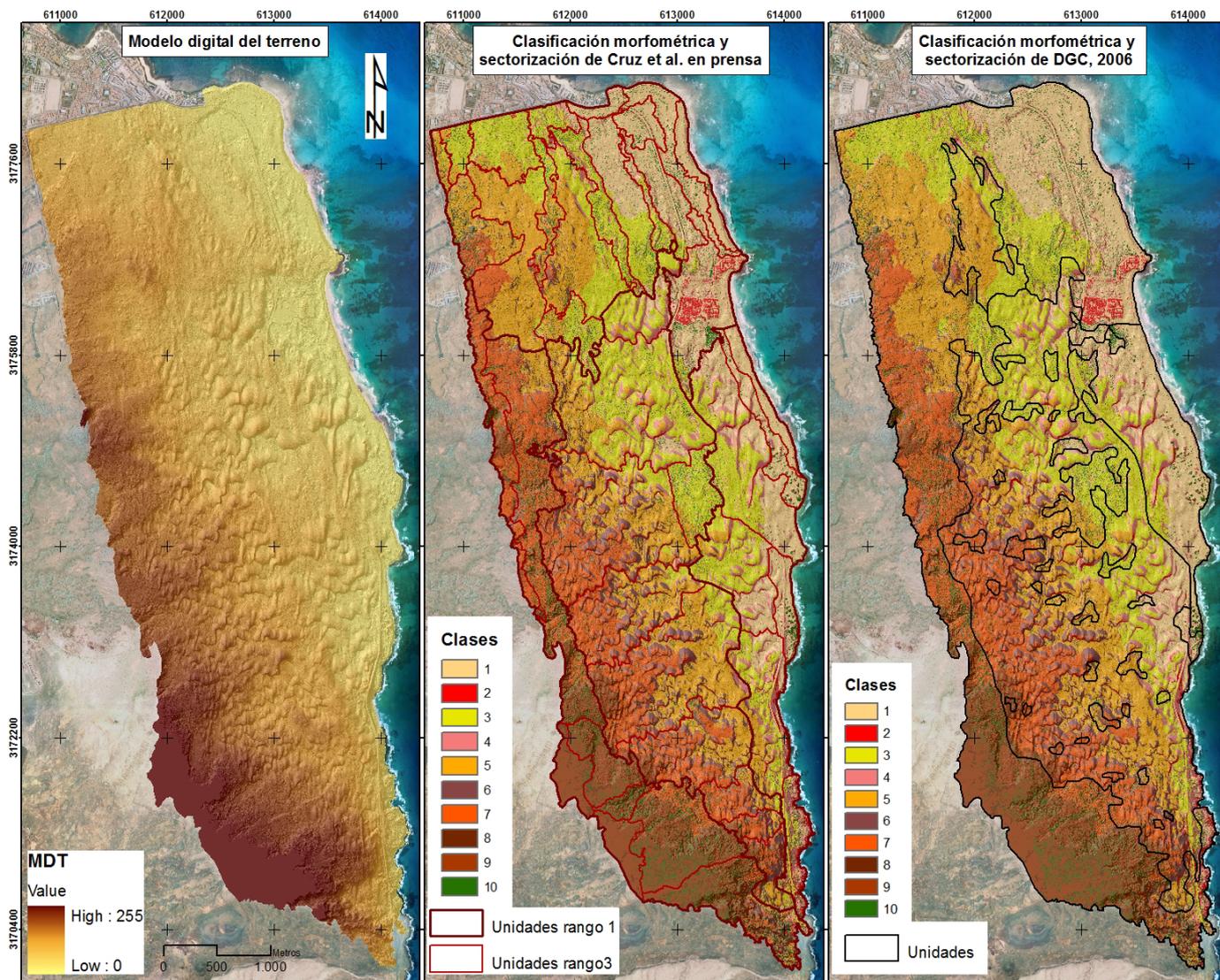


Figura 4. Imagen final resultado de la clasificación con variables morfométricas comparada con el modelo digital del terreno y la sectorización establecida en trabajos previos. (Unidades de Dirección General de Costas, 2006 adaptadas).

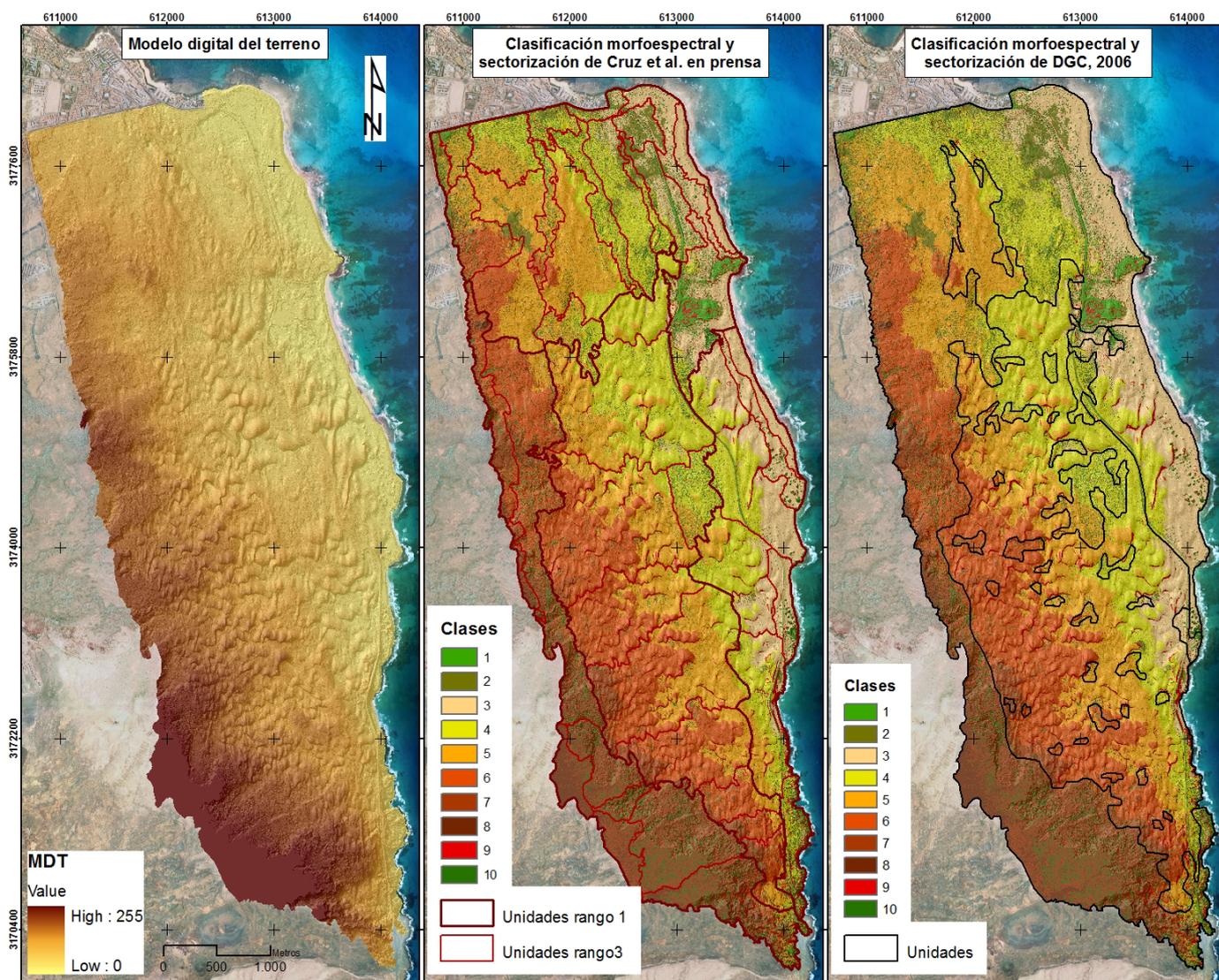


Figura 5. Imagen final resultado de la clasificación con variables morfométricas y espectrales comparada con el modelo digital del terreno y la sectorización establecida en trabajos previos. (Unidades de Dirección General de Costas, 2006 adaptadas).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Considerando los resultados anteriores, se extraen las siguientes conclusiones:

1. La zonificación o sectorización de un sistema de dunas tiene interés desde el punto de vista de la investigación científica aplicada, pues aporta información relevante para la caracterización detallada de ese entorno y posibilita efectuar análisis exhaustivos por sectores. Existen distintos procedimientos que pueden ser válidos en la medida en que consigan deducir la dinámica y el funcionamiento del ámbito de estudio. Automatizar el proceso a través de clasificaciones estadísticas puede ser especialmente relevante para contrarrestar la carga subjetiva intrínseca al método de fotointerpretación y de delimitación "manual" de unidades. El caso concreto de este estudio y su comparación con otros trabajos previos, ha puesto de manifiesto el carácter complementario de este método de clasificación, que permite reforzar y validar los resultados obtenidos con otros métodos sistémicos.
2. La calidad de las fuentes de datos es clave para que se obtengan resultados satisfactorios. En este sentido, los datos LIDAR han resultado ser muy relevantes por su elevada exactitud. Además ofrecen la posibilidad de extraer variables de interés, con las que generar un conjunto de datos de gran precisión, útil para gestores e investigadores.

3. Las variables incorporadas en el proceso de clasificación de este trabajo han sido provechosas para la consecución de los objetivos planteados. Se han obtenido resultados equiparables pero diferenciados en función del empleo de criterios morfométricos, espectrales o morfoespectrales. Cuando se ha considerado la morfometría, la altitud ha jugado un papel determinante que inclusive a primado sobre las variables espectrales cuando se han integrado, a través de la clasificación morfoespectral. Aunque con ellas es posible deducir la diferenciación de los principales ambientes, las variables espectrales han mostrado una mayor coincidencia con los sectores que muestran las distintas dinámicas eólicas y sedimentarias en el campo de dunas de Corralejo.

Teniendo en cuenta estos resultados, se considera, de cara al futuro, que para complementar y mejorar el análisis efectuado podrían acometerse distintas acciones. Así, en cuanto a las variables a incorporar, podrían incorporarse otros datos de entrada relevantes, tales como índices de vegetación (con el fin de que la cobertura vegetal aparezca clasificada en función de su vigor); índices de rugosidad (para reforzar la detección de cambios bruscos de altitud); y/o variables dinámicas, resultado de la comparación de datos de distintas fechas, para añadir la dimensión evolutiva en el análisis. En este sentido, se hace necesaria la adquisición de nuevos datos LIDAR del sistema dunar de Corralejo. En cuanto al método aplicado, tendría interés seleccionar diferentes parámetros de entrada en la definición digital de clases y/o emplearse el método supervisado en la clasificación. Por último, en cuanto a la imagen final, podrían aplicarse filtros modales para generalizar polígonos que tuvieran interés de cara a la gestión de este sistema.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del desarrollo del proyecto de I+D: "Consecuencias ambientales inducidas por el desarrollo turístico en espacios insulares: alteraciones de los procesos naturales en los sistemas de dunas litorales de Canarias y Cabo Verde (SEJ2007-64959-GEOG)" financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y por fondos FEDER. Agradecemos la colaboración de Francisco Arjonilla, Roberto Antolín y sobre todo de Daniel López, de Stereocarto, S.L. por su colaboración en el manejo y edición de los datos LIDAR brutos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackermann, F. (1999): Airbone laser scanning-present status and future expectations, *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 64-67.
- Criado, C. (1987): Evolución geomorfológica y dinámica actual del Jable de Corralejo, *Revista Geográfica de Canarias*, 2: 29-52.
- Criado, C.; Guillou, H.; Hansen C.; Lillo, P.; Torres, J. M. y Naranjo, A. (2004): Geomorphological evolution of Parque Natural de las Dunas de Corralejo (Fuerteventura, Canary Islands). En: Benito y Díez Herrero, A (eds), *Contribuciones recientes sobre geomorfología*, Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, Toledo, SGE y CSIC, pp. 201-297.
- Criado, C.; Guillou, H.; Hansen, A.; Hansen, C.; Lillo, P.; Torres, J. M.; Bethencourt, J. F. y Naranjo, A. (2007): Mapa geomorfológico de las Dunas de Corralejo (Fuerteventura). *XIII Jornadas de Estudios sobre Lanzarote y Fuerteventura*, pp. 397-427
- Cruz Avero, N.; Hernández-Cordero, A. I. y Hernández Calvento, L. (2009): Caracterización morfométrica de la zona de dunas activas del sistema dunar de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias). *II Jornadas de Investigadores en Formación*, IGME, pp. 39-52.

- Cruz Averó, N.; Fernández Cabrera, E.; Fernández Negrín, E.; Hernández Calvento, L.; Hernández Cordero, A.I.; Mangas Viñuela, J.; Máyer Suárez, P.; Pérez-Chacón Espino, E. y Romero Martín, L.E. (en prensa): Unidades ambientales del campo de dunas de Corralejo (Fuerteventura, Islas Canarias): Estudio preliminar. *XIV Jornadas de Estudios sobre Lanzarote y Fuerteventura*, 36 pp.
- Chuvienco Salinero, E. (2007): *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel, Madrid, 592 pp.
- Dirección General de Costas (2006): *Estudio del estado actual de los sistemas dunares de Corralejo y Jandía (Fuerteventura). Identificación de problemática y propuestas de actuación*. Ministerio de Medio Ambiente (Inédito).
- Fernández Galván, M.; Santos Guerra, A. y Domínguez, F. (1982): El complejo dunar de Corralejo (Fuerteventura). *Gaceta de Canarias*, 3: 73-83.
- Fernández Núñez, M.; Sánchez Carnero, N. y Ojeda Zújar, J. (2009): Aplicación de sensores aerotransportados (LIDAR/Cámara fotogramétrica digital) en la gestión de espacios protegidos: el Parque Natural de dunas de Corrubedo y Lagos de Carregal y Vixan (Galicia, NO España). En: Morales, J.A; Cantano, M.; Rodríguez-Ramirez, A. y Delgado (Eds): *Nuevas contribuciones sobre geomorfología litoral*, Universidad de Huelva, pp. 147-151.
- Hernández Calvento, L.; Alonso Bilbao, I.; Hernández Cordero, A. I.; Pérez-Chacón Espino, E.; Yanes Luque, A. y Cabrera Vega, L. (2009): Características propias de los sistemas eólicos actuales de Canarias. Notas preliminares. En Morales, J.A; Cantano, M.; Rodríguez-Ramirez, A. y Delgado (Eds): *Nuevas contribuciones sobre geomorfología litoral*, Universidad de Huelva, pp. 39-43.
- Hernández-Cordero, A.; Pérez-Chacón Espino, E. y Hernández-Calvento, L. (2006): 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*, 48: 69-76.
- Hernández-Cordero, A.I.; Pérez-Chacón Espino, E. y Hernández-Calvento, L. (2008): Aplicación de tecnologías de la información geográfica al estudio de la vegetación en sistemas de dunas litorales. Resultados preliminares en el campo de dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias). En Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 603-617.
- Mitasova, H.; Overton, M. y Harmon, R.S. (2005): Geospatial analysis of coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina. *Geomorphology*, 72: 204-221.
- Vallejo Villalta, I.; Ojeda Zújar, J. y Hernández Calvento, L. (2007): Utilidades de la Tecnología Lidar en la Caracterización Morfométrica de Sistemas Dunares: el Caso de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias). En Fornós i Asto, J. y Gómez-Pujol, Ll. (Eds.): *Investigaciones Recientes (2005-2007) en Geomorfología Litoral*. UIB, Palma de Mallorca, pp. 113-118.
- Vallejo Villalta, I. y Ojeda Zújar, J. (2008): Análisis morfométricos de las dunas móviles de Andalucía y Canarias: fotogrametría y LIDAR. *Nuevas herramientas para la difusión de la información sobre las zonas costeras: Análisis de la evolución de Playas y Dunas*. Universidad Politécnica de Valencia, pp. 69-74.

Vallejo Villalta.; Hernández Calvento, L.; Ojeda Zújar, J. y Máyer Suarez, P. (2009): Balance sedimentario en el sistema de dunas de Maspalomas (Gran Canaria) a partir de datos LIDAR, En Morales, J.A, Cantano, M., Rodríguez-Ramírez, A. y Delgado (Eds): *Nuevas contribuciones sobre geomorfología litoral*, Universidad de Huelva, pp. 95-98.