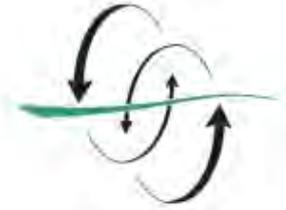


FACULTAD
DE CIENCIAS
DEL MAR



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

**PROCEDIMIENTO PARA LA
EVALUACIÓN DE LA COBERTURA
VEGETAL EN SISTEMAS
SEDIMENTARIOS COSTEROS
MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
(TIG):
LA GRACIOSA (ISLAS CANARIAS)**

Leví García Romero

Curso 2013/2014

Dña. Emma Pérez-Chacón Espino

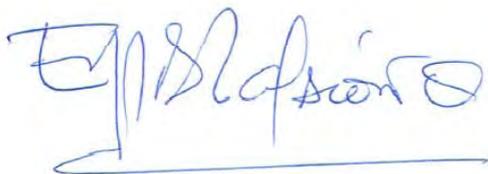
D. Luis Hernández Calvento

Trabajo Fin de Título para la obtención del título de
Máster en Gestión Costera

Este Trabajo Final de Título (TFT), titulado “*Procedimiento para la evaluación de la cobertura vegetal en sistemas sedimentarios costeros mediante tecnologías de la información geográfica (TIG): La Graciosa (islas Canarias)*”, ha sido realizado por **Leví García Romero, con DNI: 54085667V**, alumno del Máster Universitario en Gestión Costera de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Los tutores de este trabajo han sido los doctores **Emma Pérez-Chacón Espino** y **Luis Hernández Calvento**, adscritos al Grupo de investigación *Geografía Física y Medio Ambiente*, integrado en el *Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG)*.

Esta investigación ha sido posible gracias a dos convenios de colaboración con el Organismo Autónomo Parques Nacionales (centro “isla de la Graciosa”), del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España, gestionados a través de la Fundación Universitaria de Las Palmas. Sus resultados se enmarcan, así mismo, en los proyectos “SEJ2007-64959” y “CSO2010-18150”, financiados por el Plan Nacional de I+D+i del Gobierno de España, con participación de fondos FEDER.



Fdo. Emma Pérez-Chacón Espino



Fdo. Luis Hernández Calvento



Fdo. Leví García Romero

Las Palmas de Gran Canaria, Julio de 2014.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no tendría sentido sin el apoyo de aquellas personas que han estado conmigo durante este tiempo.

En primer lugar quiero agradecer la labor que han tenido mis directores Emma Pérez-Chacón Espino y Luis Hernández Calvento. Ellos son los que me han dado la oportunidad para que poco a poco, tanto este trabajo como una futura tesis, salgan adelante. También es de reconocer la paciencia y la confianza que han puesto en mí. A Emma, por esos mimos y a Luis por descubrirlo y pasar muy buenos momentos en estos últimos meses.

A Antonio Hernández Cordero, porque de alguna forma también me ha adoptado en estos últimos meses. Es quién me ha aportado algunas claves para futuras líneas de trabajo y con quien me pongo a hablar tanto de los “matos” que hay en los sistemas de dunas, como de cualquier tema que surja en el día, como las cosas que hace ese pequeñín llamado Néstor.

A Nati y Eli, mis compañeras de trabajo, por el apoyo, las opiniones, los grandes consejos y como no, los buenos momentos que compartimos en las campañas, cada vez que hay algún revuelo (entrega de informes, organización de eventos, etc...) y en el día a día en los despachos que compartimos.

A Lidia Romero, Antonio Ramón y Pablo Máyer por su amistad y los detalles que tienen conmigo en el trabajo.

A mis compañeros de máster, Guilherme, Alejandro, Javier, Vidina, Fede, Fernando, Pablo y Jackeline, porque aunque este segundo año hemos estado más separados, no quita el buen primer curso que pasamos y el aprecio que les cogí porque nunca existió rivalidad entre nosotros.

A Carolina, por aguantarme, por ayudarme, por hacerme pensar, por estar a mi lado, por quererme....., por todo los ratos que hemos pasado y pasaremos juntos. Porque gracias a ti, y hablando en lo profesional, tengo un ejemplo a seguir.

A mi hermano y mi mejor amigo, Efraín, porque aunque es más pequeño, no dejaré de aprender cosas de él y por supuesto no dejaré de organizar cosas como ese festival que está a la vuelta de la esquina, gracias a él, desconecto del trabajo, algo imprescindible para vivir.

A mis padres, porque sin ellos no hubiese sido la persona que soy. Por todo el cariño que me han dado siempre, por estar lejos y al mismo tiempo tan cerca de mis cuestiones académicas. Porque siempre me apoyaron para estudiar lo que me gustaba y no lo que “tenía salida” aunque no me gustara.

Y como no, a Abián, Antonio, Aridane, Rober, Borja, David, Olaf, Almudena, Cathy, Patricia, Yessica, Ilenia, Nayomi, Cristian, Tania, Yurena y Jose (aunque para mí siempre serás Lolo y mi primer amigo en el mundillo de la Geografía). Todos por ser mis amigos desde hace tantos años y seguir siendo un apoyo para cualquier cosa en lo personal.

Seguro que me dejaré a muchas personas, mis disculpas, pero que sepan que están también dentro de este barco.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1-. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Antecedentes	13
1.1.2 Los sistemas de dunas costeros	13
1.1.3 Los sistemas de dunas litorales de Canarias	15
1.1.4 La cobertura vegetal en los sistemas de dunas	17
1.1.5 Las TIG en los estudios de la cobertura vegetal	18
1.2 El ámbito de estudio	21
1.2.1 Los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa	23
1.2.2 Rasgos antrópicos	24
1.3-. Objetivos	30
2-. METODOLOGÍA	31
2.1 Procedimiento para medir el grado de recubrimiento de la cobertura vegetal en el sistema sedimentario eólico	34
2.1.1 Preparación de la “banda 2” (verde) de la ortofoto digital	34
2.1.2 Reclasificación	35
2.1.3 Vectorización de la cobertura vegetal	36
2.1.4 Calculo de la densidad de la cobertura vegetal	37
2.1.4.1 Densidad de la cobertura vegetal. El muestreo	38
2.2 Comprobación del muestreo óptimo: comparación con el método empírico	39
3-. RESULTADOS	41
3.1 Resultados según los muestreos realizados	43
3.2 Resultados del muestreo óptimo	45

3.3 Cobertura vegetal de los sistemas sedimentarios de La Graciosa:	
resultados obtenidos a partir de un rectángulo de 9×9 m	47
4-. DISCUSIÓN.....	53
5-. CONCLUSIONES.....	59
6-. PERSPECTIVAS.....	63
7-. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
8-. ANEXOS.....	79
9-. DESARROLLO DEL TFT.....	83

Resumen

Este trabajo forma parte de un diagnóstico sobre la dinámica sedimentaria eólica de la isla de La Graciosa (islas Canarias, España), desarrollado al amparo de un proyecto de I+D+i. Como premisa de partida se considera que la evolución reciente de la cobertura vegetal es un excelente indicador de cambios ambientales, naturales o antrópicos, producidos en los sistemas arenosos, especialmente cuando éstos son áridos. Con base en esta premisa, el objetivo es diseñar un procedimiento para clasificar la cobertura vegetal en sistemas sedimentarios eólicos áridos según su recubrimiento en este, todo ello mediante el tratamiento digital de imágenes aéreas. El desarrollo metodológico se basa en la utilización de una ortofoto multispectral de febrero de 2009, con una resolución espacial de 10 centímetros. La reclasificación estadística de los valores capturados por la banda verde permite discriminar las coberturas vegetación y arena. La vegetación es vectorizada a una geometría de puntos y se calcula su densidad para distintas áreas de vecindad. Se comparan los resultados con los obtenidos mediante un método empírico de fotointerpretación que permita obtener el procedimiento óptimo para alcanzar nuestro objetivo. El método nos ofrece la posibilidad de caracterizar y analizar espacialmente cuatro tipos de coberturas vegetales en los sistemas arenosos de la isla de La Graciosa. Se valora la eficacia del cálculo de densidad de vectores, así como el uso de bandas visibles, en la caracterización de la cobertura vegetal, siempre que se den unas condiciones ambientales específicas. Se discute la mayor rapidez y objetividad en la generación de la información, con respecto a otros métodos basados en el análisis visual. Los resultados obtenidos suponen un avance en la caracterización de la cobertura vegetal en sistemas sedimentarios eólicos áridos así como futuras líneas que comparen estos resultados con distintas variables ambientales y antrópicas.

Abstract

This research is part of a diagnosis about eolian sedimentary dynamics in the island of La Graciosa (Canary Islands, Spain), Framed in an I+D+ i. As a starting premise is considered that the recent evolution of the vegetation coverage is an excellent indicator of environmental changes, natural or anthropogenic produced in sandy systems, especially when are arid. Based on this premise, the objective is to design a method for to classify the vegetation coverage in arid eolian sedimentary systems by covering this, all with the digital processing of aerial images. The development methodology is based on the use of multispectral orthophotos February 2009, with a spatial resolution of 10 centimeters. The statistical reclassification of those captured values by the green band can discriminate vegetation and sand coverages . The vegetation is vectored to a point geometry and density for various areas in the vicinity are calculated. The results are compared with those obtained using an empirical method that use photointerpretation and allows obtain the optimal procedure to achieve our objective. The method offers the possibility of characterizing and spatially analyze four types of vegetation cover in sand systems in the island of La Graciosa. Density Calculating vectors and the use of visible bands in characterizing vegetation cover is valued whenever specific environmental conditions exist. The speed and objectivity in the generation of information, compared to other methods based on the visual analysis are discussed. We conclude that the automatic method is useful for characterizing vegetation in arid sandy systems and open future lines comparing these results with various environmental and anthropogenic variables.

1. INTRODUCCIÓN

1. Introducción

La zona costera constituye la interfaz entre la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera, la biosfera y la noosfera, lo que la hace especialmente dinámica y sensible a los impactos ambientales. Este carácter confiere a la franja litoral una gran diversidad de ambientes y recursos, y la convierte en un área especialmente atractiva para los asentamientos humanos, tanto como lugar de residencia, como por las posibilidades de instalar en ella una gran variedad de actividades productivas (Cendrero *et al.* 2005). El resultado es que alrededor del 40% de la población mundial se concentra dentro de una franja costera de 100 km (Cohen *et al.*, 1997), y la mayor parte de ella a pocos kilómetros de la línea de costa (IPCC, 2001; Nicholls y Branson, 1998). Además, se espera que alrededor del 75% de esta población ocupe las zonas costeras en el año 2025. En España, los municipios costeros suponen apenas el 7% del territorio, pero albergan al 45% de la población. En la isla de Gran Canaria, por su parte, la población localizada por debajo de la cota de 300 metros alcanza el 80% del total (Moreno y Guerra, 2004).

El nivel de presión antrópica sobre las áreas costeras hace que, muchas de ellas, estén avocadas a perder su identidad natural por los procesos de alteración antropogénica.. Estas transformaciones están relacionadas en la mayoría de las ocasiones con la intensidad en la que se han llevado a cabo los distintos usos que en ella se concentran. Esta alteración, o proceso de *litoralización* acelerada (Cerdá, 2002), induce un aumento de la vulnerabilidad del medio. También es un reto a la hora de planificar una gestión sostenible de los recursos naturales costeros, ya que para alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible, en muchos casos, habría que recuperar el funcionamiento natural del sistema (Tejada *et al.* 2009).

Ante esta problemática, y en las últimas décadas, se empieza a hablar de la *Gestión Integrada de las Áreas Litorales* (GIAL), como concepto que abarca la integración de políticas, objetivos, estrategias y planes sectoriales, teniendo en cuenta los componentes terrestres y marinos en el litoral. Se trataría de un instrumento a disposición de la política pública, que cuenta con dos pilares muy fuertes para un desarrollo sostenible, como son la cooperación y la participación. (Barragán, 2003)

En este contexto, la investigación que se propone tiene como objetivo general, proponer un procedimiento para evaluar la cobertura vegetal en sistemas arenosos áridos, utilizando para ello Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). Los problemas detectados en los últimos años en sistemas dunares de Canarias unido al importante papel que desempeña la vegetación en ellos, hacen que sea un elemento de estudio con especial importancia. Además, el uso de las TIG son fundamentales para el análisis de datos espaciales facilitando con ello multitud de estudios. La evolución de la cobertura vegetal es uno de los estudios que cobran especial interés en sistemas arenosos, necesitando para ello registros de imágenes satélites o fotografía aérea histórica, teniendo esta última un cierto interés debido a su bajo coste y sobre todo porque es un información que cuenta con mayor registro histórico. Por ello, aunque el procedimiento trabajará con una ortofoto LiDAR, se intentará adaptarlo a dichas fotografías.

El trabajo se estructura de la siguiente forma:

En un primer apartado se hablará de los antecedentes que existen en torno a los sistemas dunares y especialmente se tratará algunas características de los sistemas dunares litorales de Canarias. También se pondrá importancia con un subapartado a las metodologías que han usado tecnologías de la información geográfica para el estudio de la cobertura vegetal. El área de estudio es otro de los temas a tratar en este primer apartado, hablando sobre todo aquellos aspectos relacionados con los sistemas sedimentarios eólicos de la isla de La Graciosa.

En el segundo apartado y aprovechando la contextualización que presta el apartado anterior, se señalan los objetivos que se pretenden alcanzar con la metodología desarrollada.

La metodología es el tema a tratar en el tercer apartado, donde se aprovechará para presentar el procedimiento que se ha desarrollado para cubrir la necesidad de clasificar la cobertura vegetal en sistemas sedimentarios eólicos.

El cuarto apartado muestra tres tipos de resultados, el primero está relacionado con la propia metodología, el segundo estaría relacionado con la optimización del método y el último resultado lo obtenemos aplicando la metodología final, este último nos da la posibilidad de caracterizar y analizar espacialmente la cobertura vegetal en los sistemas sedimentarios eólicos de la isla de La Gaciosa.

Discusión, Conclusiones y Perspectivas ocupan el quinto, sexto y séptimo apartado respectivamente. Apartados con cierta importancia al tratarse de la presentación de un procedimiento.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Los sistemas de dunas costeros

Las dunas costeras son formas del relieve terrestre, formadas por partículas detríticas comprendidas entre 2 mm y 0,064 mm, producto de la interrelación entre procesos marinos, terrestres y eólicos. Estas geoformas se localizan en la interfaz entre ambientes continentales y marinos, y pueden dar lugar a campos o sistemas de dunas. Entre los elementos y factores más importantes que definen estos sistemas son el origen, tamaño y cantidad de los sedimentos detríticos, el clima o el tipo y distribución de la vegetación. El resultado de sus interrelaciones no responden a un patrón fijo, por lo que los sistemas de dunas presentan notables diferencias geomorfológicas, ecológicas y climáticas, lo que dificulta establecer una definición única para estos espacios (Hesp y Martínez, 2007).

Estos sistemas tienen una gran importancia, tanto por la función que ejercen en el territorio, al ser una barrera protectora ante la erosión marina; como por el atractivo paisajístico que supone el conjunto de los elementos que los forman. También presentan una gran diversidad de ecosistemas (Miththapala, 2008).

Con respecto a los servicios que ofrecen, los sistemas de dunas, como se indicaba anteriormente, sirven como defensa frente a determinados episodios relacionados con la invasión terrestre del agua del mar (provocados por huracanes, tsunamis, temporales marinos, etc...). De igual forma suponen una despensa sedimentaria para alimentar o regenerar playas. También, entre otros servicios, estos sistemas ofrecen la depuración de aguas contaminadas. Otros valores no menos importantes están relacionados con aspectos visuales, espirituales y recreacionales, estando éstos íntimamente relacionados con el sector turístico, que ofrece estos espacios como lugares de ocio y esparcimiento (MARM, 2007).

Las dunas costeras han sido históricamente objeto de explotación para la extracción de sus recursos, pero ha sido en las últimas décadas cuando la presión antrópica, a través

de procesos urbanizadores, ha acelerado su degradación y, en algunos casos, la destrucción de los ecosistemas propios de los campos de dunas europeos. (Paskoff, 1993; European Environmental Agency, 2006).

Existen numerosas acciones que contribuyen a la degradación del litoral. Entre ellas caben destacar la ocupación antrópica de cuencas hídricas o áreas del litoral, que abastecen de arena a los sistemas de dunas, la ocupación física de estos sistemas, la realización de vertidos en ellos, la extracción de áridos, etc. (De Andrés y Gracia, 2002). Esto da como resultado un funcionamiento inestable de los sistemas de dunas, así como una pérdida de bienestar, como consecuencia de los cambios ocasionados por los conflictos entre el desarrollo y la conservación (Nordstrom et al., 2000).

Estos cambios han sido estudiados, relacionando la degradación de estos sistemas con el tránsito de vehículos (Hernández, 2006), extracciones de áridos (Sanjaume y Pardo, 1991), la presión causada por los visitantes o la desaparición de estos sistemas debido a su artificialización (Paskoff, 1993), así como la utilización de parcelas para desarrollar otros usos cercanos a las orillas (Fernández y Neves, 1997). Todo ello ha supuesto la fragmentación paisajística y de los ecosistemas (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002), la pérdida de hábitats naturales y de diversidad biológica (Beatley, 1991). A ello se suma la pérdida del valor intrínseco, relacionado con la dinámica espacial y temporal de los sistemas de dunas (Nordstrom et al., 1990), la desaparición del valor paisajístico y recreacional con el que contaba estos sistemas anteriormente (Cruz, 1996; Demirayak y Ulas, 1996) o la pérdida del patrimonio (Nordstrom et al., 2000).

Desde esta perspectiva se puede considerar que los sistemas de dunas suelen ser espacios en los que coexisten multitud de conflictos. El desarrollo de éstos suele conllevar la desestabilización de la duna costera, geoforma que se comporta como pilar fundamental para el buen funcionamiento de todo el sistema (Bauer y Sherman, 1999). El escenario que obtenemos por tanto, con el desarrollo de las actividades humanas en torno a estos sistemas, es de un aumento de inestabilidad y vulnerabilidad ante los agentes erosivos (Fernández y Neves, 1997).

Para cambiar, disminuir o incluso eliminar este tipo de conflictos, es necesario conocer las dinámicas naturales, y trabajar con ciertas pautas o herramientas que permitan planificar estas zonas con criterios de sostenibilidad, posibilitando el funcionamiento de los procesos naturales. Para ello, cualquier iniciativa de gestión debe ser estudiada

desde un punto de vista sostenible, y teniendo en cuenta las posibles transformaciones inducidas por el actual cambio climático (MARM, 2008).

1.1.2 Los sistemas de dunas litorales de Canarias

El archipiélago Canario cuenta con una superficie muy reducida ocupada por sistemas de dunas. Esto se debe a la limitada plataforma insular que, por lo general, presentan las islas volcánicas oceánicas. Este aspecto limita posibilidad de acumular sedimentos. A su vez, la morfología dominante en la línea de costa, salpicada de salientes, generan derivas litorales cortas. Así, la mayoría de las playas están asociadas a acantilados y a desembocaduras de barrancos. En las islas orientales, con mayor antigüedad, se localizan los principales sistemas de dunas (Hernández et al., 2009), debido a que han desarrollado una mayor plataforma insular y un perfil costero más suave.

Los sistemas dunares en Canarias (figura 1) poseen unas características ecológicas y geomorfológicas bastante peculiares, que los diferencian de ámbitos arenosos costeros localizados en otras regiones climáticas. Los sistemas canarios son frágiles desde el punto de vista ambiental, por lo que la gestión en estos espacios debe ser la adecuada para reducir su vulnerabilidad ante la progresiva alteración antropogénica del litoral. .

Existen varias peculiaridades en los sistemas dunares de Canarias. Cuando las *despensas sedimentarias* son adecuadas (abundantes arenas), la movilidad es bastante alta, cuestión directamente relacionada con la escasez de precipitaciones y de especies vegetales colonizadoras de dunas. Por ello, algunas dunas pueden llegar a moverse más de 30 metros durante un año (Pérez-Chacón et al., 2007). Por lo tanto, se generan sistemas transgresivos áridos, ya que los depósitos sedimentarios pueden alcanzar sectores alejados de las fuentes emisoras de éstos. Esto también sucede en otras islas macaronésicas como, por ejemplo, entre las más antiguas de Cabo Verde, pues en Boa Vista se han detectado procesos similares (Hernández y Suárez, 2006). Esta movilidad también depende de la morfología costera, que puede facilitar o no el tránsito de sedimentos e incluso la acumulación de éstos. Por tanto, en costas más abruptas e irregulares, como sucede en buena parte del litoral de las islas canarias occidentales, tendremos derivas cortas, sin embargo; en contornos más suaves debido a una erosión más prolongada, y con un trazado rectilíneo de la costa, como sucede en las islas

orientales, se favorece la deriva litoral y, con ello, el transporte sedimentario (Alonso et al., 2011).

Otra característica ecológica y geomorfológica importante de los sistemas de dunas de Canarias, que los diferencian del resto de sistemas de dunas europeos, es que se trata de hábitats de interés específico no contemplados por la Directiva Europea. Las dunas con balancón, *Traganum moquinii*, son una geoforma representativa de los sistemas de dunas áridos del entorno de Canarias (también aparece en Cabo Verde, Marruecos y Mauritania, asociada a la presencia de esta especie vegetal). Igualmente ocurre con los mantos eólicos cubiertos por comunidades arbustivas propias de estos sistemas (Gracia et al., 2009).

En cuanto a las dunas en montículo, *Traganum moquinii* es una especie vegetal localizada generalmente en las entradas de arenas de los sistemas de dunas (en la playa alta), donde participa en la generación de dunas en montículo (o tipo “*hummock*”), definida por Hesp (1988). Por lo tanto, da lugar a la primera línea de vegetación existente en los principales sistemas de dunas de Canarias, tal y como sucede en Corralejo, El Jable de Lanzarote, los sistemas de dunas del norte y el sur de La Graciosa, El Médano y las dunas de Maspalomas (Hernández et al., 2008). Estas condiciones configuran en Canarias un tipo de duna costera (*foredune*) muy singular. .

Canarias, al igual que otras muchas regiones españolas, es una de las Comunidades que mayor dependencia tienen del sector turístico, habiéndose especializado en el turismo de masas, de sol y playa. A diferencia de otros destinos turísticos, Canarias presenta un clima estable durante la mayor parte del año, con temperaturas suaves, precipitaciones escasas y numerosas horas de sol, principalmente en las vertientes sur de las islas de mayor relieve (Marzol, 1987). Por todo ello, Canarias soporta un elevado número de turistas durante todo el año, presentando dos picos de entradas, y no uno, como ocurre en la mayor parte de los destinos turísticos europeos. Estos dos picos de entradas de turistas en Canarias se corresponden con el verano (principalmente turismo interior y del resto de España) y el invierno (principalmente turismo extranjero), aunque en otoño y primavera la llegada de turistas sigue siendo bastante regular (MARM, 2007). El fenómeno del turismo de masas ha conllevado el desarrollo de amplias urbanizaciones lo que, a su vez, se ha saldado con una ocupación excesiva de la costa, dando como resultado, al igual que sucede en otros ámbitos, a su degradación (European Environmental Agency 2006).

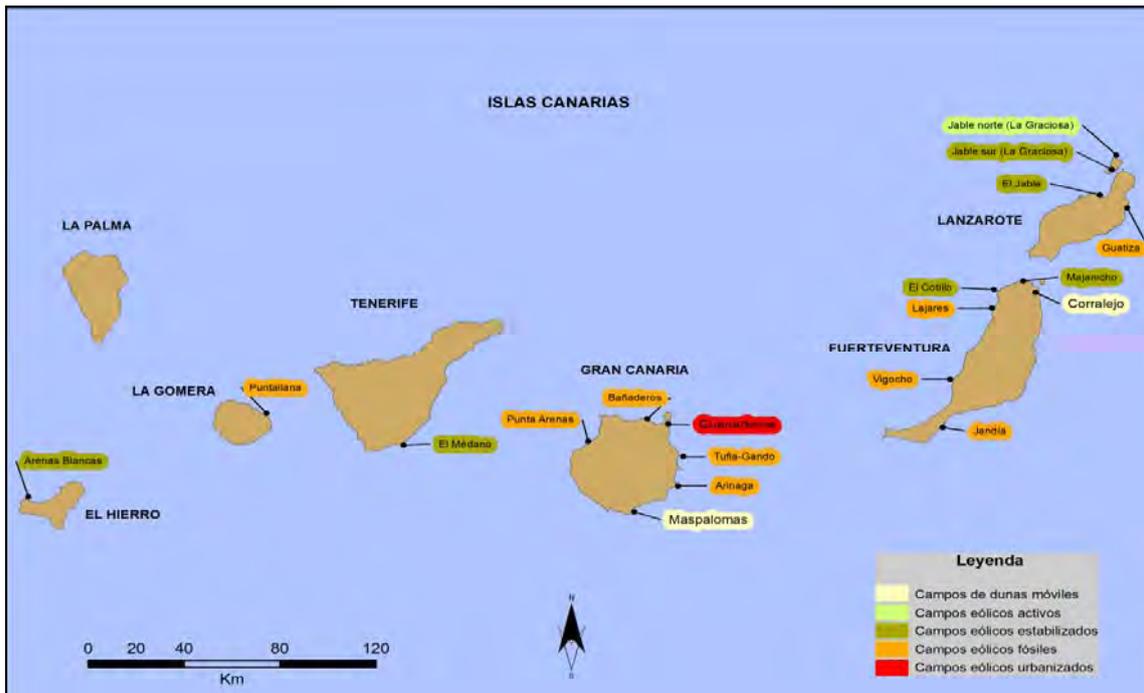


Figura 1. Mapa de localización de los principales sistemas eólicos de Canarias (actualizado de Hernández et al., 2009).

1.1.3 La cobertura vegetal en los sistemas de dunas

En estos sistemas se producen unos procesos de iniciación, evolución y dinámica que dan como resultado su geomorfología característica. Entre otros elementos, la vegetación juega un papel importante en la formación de sistemas de dunas, ya que participa de forma activa en la captación de sedimentos (Hesp, 1991).

La arena es un buen medio para el crecimiento de determinadas plantas, pues capta bien la humedad. La presencia de vegetación en los sistemas de dunas provoca una reducción en las tasas de transporte sedimentario. Ello es debido, entre otras cuestiones, a que las plantas suponen un añadido a la rugosidad de la superficie del terreno, lo que da como resultado la disminución de la velocidad del viento y, con ello, la reducción de las tensiones que soporta el transporte sedimentario eólico. De esta manera, las plantas captan los granos de arena que son transportados por saltación, favoreciendo la sedimentación. Existe, por tanto, una relación directa entre las acumulaciones de arenas,

la formación de dunas y la cubierta vegetal. Algunos aspectos de la vegetación como la densidad, altura, porte de los ejemplares vegetales, tipología y estado de conservación, condicionan los niveles de retención de sedimentos eólicos.

La duna costera o “*foredune*” se forma directamente cuando existe una colonización vegetal del campo dunar por comunidades específicas, bien adaptadas a esas condiciones ecológicas. La duna costera se puede formar por la sedimentación de arena dentro de pequeños grupos, o relativamente pequeños, de vegetación o de individuos de plantas localizados de formas paralela a la playa (Hesp, 1989). En unos casos se formarán dunas de sombra, en otros en montículos, etc. Las dunas se pueden formar en diversos lugares, que van desde la inmediata trasplaya, hasta zonas más interiores al sistema de dunas (Carter et al., 1992). La formación de cordones dunares continuos también se produce en zonas de acreción relativamente rápidas, que presentan una vegetación densa y alta (Hesp, 2002).

1.1.4 Las TIG en los estudios de la cobertura vegetal.

En el estudio de la vegetación se han generado y utilizado multitud de metodologías y herramientas, que permiten obtener resultados para interpretar el comportamiento de ésta en los distintos ecosistemas conocidos. Las tecnologías de la información geográfica (TIG), y dentro de ellas los sistemas de información geográfica (SIG), han sido utilizadas para estudiar la vegetación en distintos ecosistemas (Palmer y Van Staden, 1992; Franklin, 1995; Guisan et al, 1998; Hall et al., 1998).

En España, el uso de determinadas fuentes integradas en las TIG, como son las fotografías aéreas, ortofotos digitales e imágenes de satélites, ha sido muy frecuente en este tipo de estudios. No sucede lo mismo con el análisis de la vegetación a través de SIG, donde la utilización ha sido muy reducida (Gonzalo et al, 2001; Bermejo, 2002; Fernández et al, 2004). Asimismo, también son escasos los trabajos que analizan la vegetación de los sistemas de dunas litorales mediante SIG (Shanmugam y Barnsley, 2002; Hernández-Cordero et al., 2006).

El estudio de la masa vegetal mediante TIG abarca multitud de líneas de investigación, incluso algunas de éstas son específicas de determinados ecosistemas. En la última década, la teledetección ha jugado un papel importantísimo, estudiando la cobertura

vegetal a partir de su caracterización espectral. Aunque aún existen varias dificultades en su aplicación, debido a factores influyentes en la radiancia, en general ha sido estudiada a partir de tres aspectos (Belward, 1991; Colwell, 1974; Gausman, 1977; Guyot *et al.*, 1989; Sellers, 1989; Jacquemoud, 1990), relacionados con:

- La reflectividad de la hoja
- La geometría de la planta (área foliar, forma de las hojas, distribución de la planta, geometría del dosel, importancia del componente leñoso etc.
- Situación geográfica de la planta (orientación, pendiente, sustrato, atmósfera, asociaciones ecológicas, etc.

La teledetección estudia la vegetación a partir de su reflectividad en las distintas bandas del espectro electromagnético. Las masas vegetales aportan diferente información dependiendo de la región del espectro o, lo que es lo mismo, de la banda del sensor que estemos utilizando. En líneas generales, la región que menos información ofrece es la de la luz visible. Sin embargo, en el infrarrojo cercano (IRC) es alta, y en infrarrojo medio (SWIR) es baja, aunque con algunos picos importantes, que reflejan información sobre la humedad de la vegetación.

En la región del visible, formada normalmente por bandas de rojo, verde y azul, la reflectividad es baja debido al efecto de absorción de pigmentos en la hoja, como son el caroteno, la xantofila y las clorofilas (Gates *et al.*, 1965). Es por ello que, entre las bandas que pertenecen a esta región, la banda del verde es la que presenta una mayor reflectividad, porque es donde se origina el color que nuestros ojos perciben cuando la vegetación está vigorosa.

En el IRC, por su parte, es donde mayor reflectividad muestra la masa forestal, debido a dos motivos fundamentales: en primer lugar porque se produce una baja absorción de las clorofilas y, en segundo, porque en esta región entra en juego la estructura celular interna de la hoja, pudiéndose detectar los intercambios gaseosos que se producen en las hojas. El contraste entre las bandas del visible y del IRC aporta una mejor información del estado vital de las plantas (Gates *et al.*, 1965; Horler *et al.*, 1983).

En el SWIR se detecten unos picos que aportan información sobre el efecto absorbente del agua, observándose claras diferencias entre las hojas secas y húmedas. (Bowman, 1989; Hunt *et al.*, 1987).

En las últimas décadas se han desarrollado diversos modelos para simular la reflectividad de la hoja, introduciendo para ello variables como la reflectividad, el índice de área foliar (LAI), los ángulos de observación e iluminación o la distribución

geométrica de las hojas (Bansley y Hobson, 1997; Danson , 1998; Liang, 2004). En definitiva, las cubiertas vegetales pueden ser observadas de forma remota, apoyándose en el contraste cromático que presenta la vegetación vigorosa en las distintas bandas del espectro. La composición de las bandas que mejor representa la vegetación puede ofrecernos información del estado de la vegetación, o incluso detectar tipos de especies (Bannari et al., 1995; Curran, 1981; Myneni, 1995; Sellers, 1989). Para obtener información a partir de las nociones de teledetección anteriormente aportadas, existen las llamadas “clasificaciones” que se podrían definir como el proceso por el cual, *"la imagen multibanda se convierte en otra imagen del mismo tamaño y características que la original, con la diferencia de que el nivel digital de cada píxel no tiene relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a este píxel"* (Chuvienco, 2010, pág. 383).

Sin embargo, para realizar estudios diacrónicos de la vegetación, con amplias diferencias entre años, es necesario partir de fotografías aéreas históricas. Las experiencias de clasificación automática de imágenes pancromáticas son relativamente escasas. La bibliografía ofrece que, en la mayor parte de ellas, se reducen las expectativas a la clasificación de dos o tres cubiertas diferentes como máximo: árboles y dos clases de matorral (Carmel y Kadmon, 1998; Kadmon y Harari-Kremer, 1999), matorral y fondo (Laliberte *et al.*, 2004; Hutchinson *et al.*, 2000), árboles y fondo (Pillai *et al.*, 2005), vegetación leñosa y fondo (Robinson *et al.*, 2008), invernaderos y fondo (Agüera *et al.*, 2008). Aunque el número de categorías es reducido, también la fiabilidad de las clasificaciones resultantes es relativamente baja, desde el 60% (Carmel y Kadmon, 1998) hasta el 80% (Kadmon y Harari-Kremer, 1999). En algún caso, la fiabilidad se refiere al número de objetos (árboles, parcelas, etc..) correctamente identificados, pero no a la proporción de píxeles: cuando es medida de ese modo la fiabilidad final es mayor, y puede alcanzar el 90% (Pillai *et al.*, 2005). En algunos casos los autores consideraron necesaria una reclasificación manual posterior (Marignani *et al.*, 2008). En todo caso, siempre se cumple la regla general, válida para cualquier tipo de clasificación, de que la separabilidad o grado de solape entre las cubiertas a identificar tiene una importancia fundamental en la calidad final de los resultados, sin importar el método empleado.

En cuanto a los métodos utilizados, encontramos técnicas de segmentación con umbrales o *thresholding* (Hutchinson *et al.*, 2000; Lahav-Ginott *et al.*, 2001), de clasificación orientada a objetos (Laliberte *et al.*, 2004; Pillai *et al.*, 2005; Marignani *et*

al., 2008) y también otras más habituales, como la clasificación por máxima verosimilitud (Carmel y Kadmon, 1998; Kadmon y Harari-Kremer, 1999). En algunos casos los autores tratan de mejorar los resultados de la clasificación incorporando información relacionada con la textura de la imagen, lo que resulta una mejora de la fiabilidad (Carmel y Kadmon, 1998; Cots Folch *et al.*, 2007), pero en otras no (Agüera *et al.*, 2008). Este uso de las texturas también ha sido empleado con éxito con imágenes multiespectrales (Johansen *et al.*, 2007).

Finalmente, otros autores plantean la necesidad de realizar correcciones radiométricas previas a la clasificación, en concreto las relacionadas con la variación del brillo en sentido radial, desde el centro hacia los bordes de la fotografía (Carmel y Kadmon, 1998).

La densidad de la vegetación también ha sido estudiada a partir de clasificaciones. La mayor parte de la bibliografía clasifica la densidad de la cobertura vegetal utilizando directamente imágenes hiperespectrales, que proceden de diversos sensores aerotransportados (Woodcock *et al.*, 1994; Hall *et al.*, 1998; Underwood *et al.*, 2003; De Lange *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2012). El cálculo de las firmas espectrales, y la posterior clasificación de las imágenes, obtienen zonificaciones con densidades similares (Eom *et al.* 1984; Zribi *et al.*, 2003). También con este mismo fin son utilizadas las fotografías aéreas (Jauhiainen *et al.*, 2007), donde se emplean técnicas orientadas a objetos (Laliberte *et al.*, 2004; Platt y Schoennagel, 2009).

Debido a que la densidad de la cobertura vegetal repercute directamente en la acumulación de sedimentos y en la dinámica sedimentaria, resulta de interés abordar este tipo de análisis en los sistemas de dunas. Para generar información sobre este tema, no sólo se utilizan imágenes multiespectrales o hiperespectrales (Shupe y Marsh, 2004), sino que también se utiliza la interpretación visual sobre fotografías aéreas (Robbins, 1997; García *et al.*, 2012), las clasificaciones estadísticas sobre fotografías aéreas u ortofotos (Shoshany, 2000; Kutiel *et al.*, 2004; Laliberte *et al.* 2007;), también en ortofotos de falso color (Droesen *et al.*, 1995), y clasificaciones según aspectos texturales (Hudak y Wessman, 1998).

1.2 El ámbito de estudio

La Graciosa (figura 2) se localiza al norte de Lanzarote y forma parte del denominado “Archipiélago Chinijo”, junto con Alegranza, Montaña Clara y los roques del Este y del

Oeste. La Graciosa es la mayor de todas ellas, pues comprende una superficie de 27,05 km², y es la única isla que está habitada de forma permanente. Esta isla se sitúa sobre una plataforma marina cuaternaria, localizada a unos 100 m de profundidad.

La isla es de origen volcánico, formada durante el Pleistoceno superior y Holoceno (De la Nuez et al., 1997), pero procesos sedimentarios posteriores dieron lugar a eolianitas y paleosuelos, poco cementados (Ortiz et al., 2006; Meco et al., 2006). Como área de estudio se ha considerado una parte significativa de la superficie insular (13,96 km²), que se encuentra actualmente recubierta por arenas eólicas sueltas, de edad holocena, que forman mantos de sedimentos de potencia variable. En unas zonas los materiales son removilizados por los vientos efectivos, y dan lugar a dunas en montículos asociadas a especies vegetales. En otras, estos depósitos se han estabilizado por la vegetación.



Figura 2. Localización del área de estudio. En color claro se representa la distribución espacial de los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa.

Las condiciones climáticas se corresponden con las de un clima árido. Las precipitaciones son escasas, pues apenas alcanzan unos 116 mm anuales. Éstos se reparten en tan sólo 32 días de lluvia al año y, cuando se producen, suelen tener un carácter torrencial. Son muy irregulares, tanto estacional como interanualmente. Las comunidades vegetales que se desarrollan en la isla deben adaptarse a prolongados intervalos temporales sin recursos hídricos. Sólo la humedad, favorecida por la proximidad al mar, aporta un complemento a las plantas durante los periodos secos. La humedad relativa es alta, pues presenta un valor medio anual del 78,9%.

Los suelos sobre los mantos eólicos están escasamente desarrollados. Se trata de Arenosoles que, en algunos casos, han llegado a desarrollar una incipiente diferenciación del perfil edáfico s. En algunas hoyas endorreicas y depresiones

interdunares se han producido acumulaciones de sedimentos finos (limos y arcillas), que históricamente se aprovecharon para implantar cultivos de secano. Abandonados actualmente la mayor parte de ellos, se han convertido en zonas donde la colonización vegetal espontánea es más intensa.

La vegetación está formada por un matorral subarbusivo y arbustivo en el que se combinan especies halófilas, psamófilas, xerófilas, así como otras nitrófilas relacionadas con la explotación zooantrópica de los arenales.

La isla tiene un alto valor desde el punto de vista de la calidad para la conservación, y en la actualidad se encuentra protegida a través de diferentes figuras de protección, tanto de ámbito internacional como europeo, estatal y autonómico (Reserva de la Biosfera, Zona Especial de Conservación, Zona Especial de Protección para las Aves, Reserva Marina y Parque Natural).

1.2.1 Los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa

Los cuatro sistemas sedimentarios eólicos identificados en La Graciosa ocupan conjuntamente una superficie de unos 13,09 km², lo que representa casi el 50% de la isla, considerando que ésta tiene unos 27,05 km². Tres de ellos se localizan en la mitad norte de la isla (los señalados con las letras A, B y C), mientras que el más extenso lo hace en su mitad sur (señalado con la letra D en la figura 3) (Pérez-Chacón et al., 2010).

Atendiendo a la fuente de alimentación de sedimentos, los cuatro sistemas son aparentemente independientes entre sí. Así, el sistema A debe haber recibido sus aportes desde la fachada septentrional de la isla, accediendo éstos principalmente por la playa de Lambra. El sistema que se ha identificado con la letra B se encuentra en la fachada occidental, y recibe aportes sedimentarios desde la playa de Las Conchas. El sistema C aparece en la fachada oriental, y recibe aportes desde la playa de Pedro Barba. Por último, el sistema D se extiende ampliamente por el sur de la isla, teniendo sus fuentes principales de sedimentos en las playas del este (Pérez-Chacón et al., 2010).

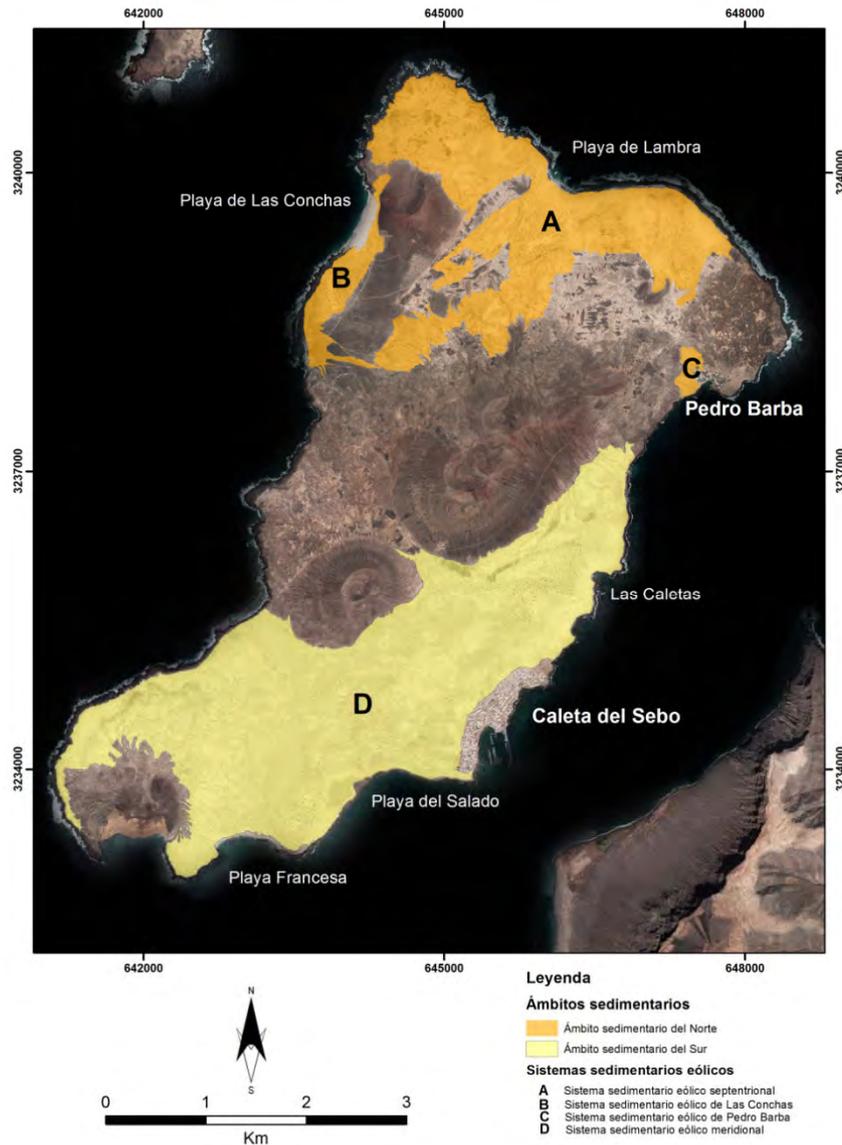


Figura 3. Localización del área de estudio. El color indica el ámbito sedimentario y las letras los sistemas sedimentarios eólicos (modificado de Pérez-Chacón et al., 2010).

1.2.2 Rasgos antrópicos

Aunque se trata de una isla poco poblada (656 habitantes en 2011, según el INE), en las últimas décadas se ha consolidado la edificación del núcleo de Caleta del Sebo, se ha mantenido el de Pedro Barba, y se ha procedido a la ampliación del muelle que conecta la isla con el exterior. A su vez, las pistas por el interior de la isla se han incrementado, así como el tránsito de vehículos y personas.

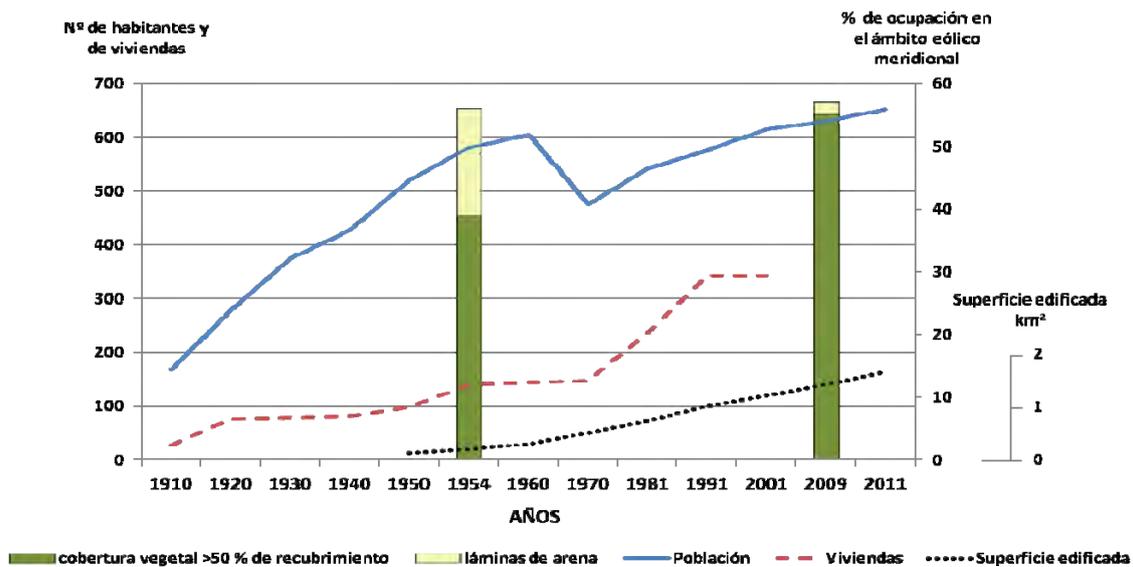


Figura 4. Evolución del número de viviendas y habitantes de Caleta del Sebo a partir de 1910 (fuente: Cabrera (1997), González et al. (1996) e INE); evolución de la superficie edificada en Caleta del Sebo (imágenes aéreas de 1954, 1977, 1987 y 2009); distribución porcentual de la cobertura vegetal densa (>50% de recubrimiento) y de las láminas de arena móvil en el sistema sedimentario eólico meridional (imágenes aéreas de 1954 y 2009 (Hernández et al., 2013).

En el caso de los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa, no se podría entender su situación actual si antes no hacemos una reconstrucción histórica que, de alguna manera, explique los distintos episodios vividos en ellos. La dinámica sedimentaria no sólo depende de procesos naturales, sino que las actividades humanas inciden de forma significativa, hasta el punto de condicionar su permanencia (Jackson y Nordstrom, 2011). Teniendo en cuenta la relación entre la actividad humana y la dinámica sedimentaria eólica, se han definido y caracterizado (Hernández et al., 2013) seis etapas históricas (tabla 1). En cada una de ellas se han identificado las actividades humanas que han podido alterar el estado de los sistemas sedimentarios eólicos de la isla, destacando entre ellas los aspectos relacionados con los tipos de aprovechamiento vegetal. La fuente para obtener dicha información se puede clasificar en cuatro grupos:

- Fuentes documentales: El Archivo Histórico Nacional, El Archivo General de la Administración, La Biblioteca Nacional, El Archivo Histórico Provincial de Las Palmas, El Archivo Municipal de Tegüise y Hemeroteca del Museo Canario.
- Fuentes orales: Realizando entrevistas a diez habitantes de la isla, en su mayoría personas mayores.

c) Fotografías aéreas históricas (desde 1954): utilizadas para reconstruir las coberturas del suelo, estimar el porcentaje de recubrimiento de la cobertura vegetal e identificar las geoformas eólicas, y como apoyo a la información obtenida a través de las fuentes orales. En contraste con la ortofoto de 2009, se han analizado los cambios en las variables estudiadas.

d) Trabajo de campo: empleado para localizar hitos históricos de interés y contrastar la información de las imágenes aéreas.

Las seis etapas históricas identificadas se resumen a continuación en:

1) **Antes de 1730**: La Graciosa era un enclave deshabitado, aprovechado por habitantes de Lanzarote para recolectar especies vegetales para uso doméstico.

2) **1730-1880**: tras el inicio de la erupción de Timanfaya (1730-1736), ante la disminución de los pastos en Lanzarote, las autoridades permitieron trasladar ganado de forma permanente a La Graciosa. Dicho impacto queda reflejando en algunas crónicas de esta etapa.

“Los mismos vientos reinantes han arrastrado y elevado nubes de estas arenas que han ocupado y arruinado, como queda dicho, muchos terrenos pingües y aún poblaciones atravesando un río de arena de Norte a Sur...” (Libro de actas, folios 225-235. Ayuntamiento de Tegüise, 26 de noviembre de 1834. Archivo Histórico de la Villa de Tegüise).

3) **1880-1943**: se establece una primera colonia poblacional, asociada a una factoría de pescado.

4) **1943-1967**: tiene lugar la visita del Capitán General García Escámez, Jefe del Mando Económico de Canarias, se inicia una etapa de inversiones en infraestructuras básicas (muelle, escuela, iglesia, cementerio, aljibes, etc), se reparten 65 lotes de tierra de labor y se construye una aguada central en el interior de la isla. Esto ocasionó un cambio sustantivo en la relación entre la población y el medio, que supuso un punto de inflexión en la dinámica sedimentaria. Se produjo un incremento poblacional considerable (figura 4) y un aumento en el número de viviendas. Por su parte, en la imagen aérea de 1954, se constata que la cobertura vegetal densa (>50% recubrimiento) ocupa menos del 40% del

ámbito sedimentario eólico meridional (el más próximo a Caleta del Sebo), y las láminas de arena móvil un 17% de la superficie de ese ámbito (figura 5).

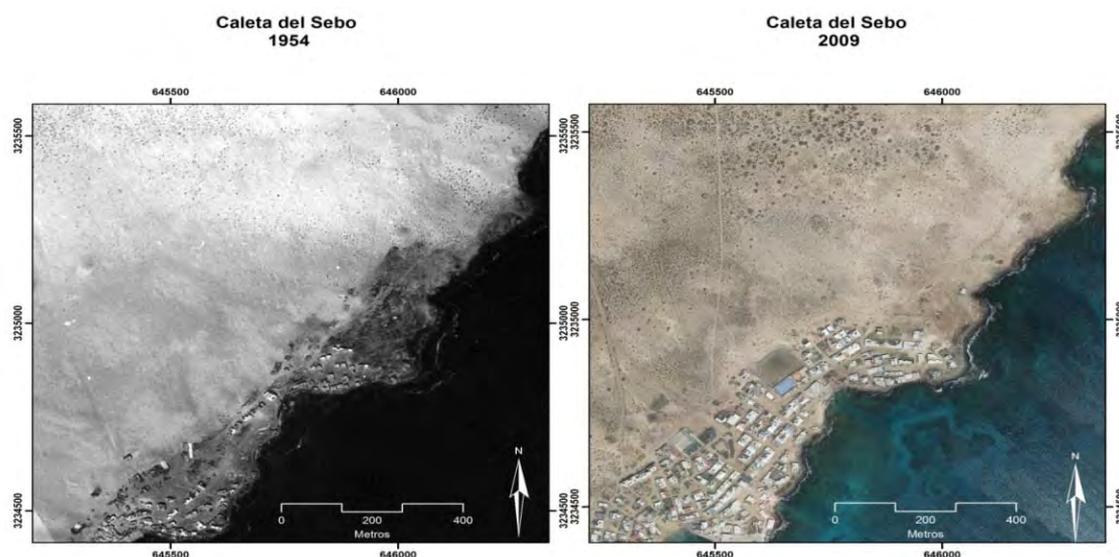


Figura 5. Cambios en el entorno de Caleta del Sebo entre 1954 y 2009.

5) **1967-1987**: la presión agraria se redujo considerablemente y, con ello, se inicia una progresiva regeneración natural de la vegetación, que contribuyó a la estabilización nuevamente de las arenas. La llegada a la isla de distintas energías, la emigración a Lanzarote y el cese de los hornos de cal producen un freno en la tala de vegetación

6) **A partir de 1987**: la isla es declarada Parque Natural a través de la Ley 12/1987, de 19 de julio, de Declaración de los Espacios Naturales de Canarias, conjuntamente con el resto de los islotes del norte de Lanzarote y el Risco de Famara. Toda la isla, salvo Caleta del Sebo que se clasifica como Suelo Rústico de Protección.

Tabla 1. Eventos y usos en las seis etapas definidas en la isla de La Graciosa, que ejercieron una presión sobre la cobertura vegetal y la dinámica sedimentaria.

Etapa	Usos y eventos en La Graciosa	Elementos afectados	Afección en la dinámica sedimentaria
<i>Antes de 1730</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Isla poco habitada - Recolección de especies vegetales para uso doméstico. 	Especies faunísticas	Reducida

	<p>cosco (<i>Mesembrianthemun nodiflorum</i>) y barrilla (<i>Mesembryanthemum crystallinum</i>).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caza, pesca y marisqueo. - Ganado (cabras, ovejas, burros y dromedarios). 	Cobertura vegetal	
1730-1880	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento del número de ganado proveniente de Lanzarote 	Cobertura vegetal	Significativa
1880-1943	<ul style="list-style-type: none"> - Primera colonia poblacional (asociada a - Se funda Caleta del Sebo y hacia 1943 existen unos 80 hogares de piedra, barro y leña. - Se funda en 1930 el caserío de Pedro Barba. - Aumento de la recolección de recursos vegetales para la construcción y combustible. 	Cobertura vegetal	Significativa
1943-1967	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento de la población debido a la construcción de infraestructuras. <i>92 viviendas(1940) y 170 viviendas en 1970)</i> - Explotación de los hornos de cal “Caleras”. <i>1 quema = 20 cargas de camello</i> - Pastoreo. <i>Unas 4 cabezas de ganado por viviendas</i> - Construcción y rehabilitación de viviendas. <i>3 hornos de cal para 2 viviendas</i> - Necesidad de zonas libres de vegetación para cultivos de secano. 	Cobertura vegetal	Muy Significativa
1967-1987	<ul style="list-style-type: none"> - Descenso del número de habitantes. 	Cobertura	Poco

	<ul style="list-style-type: none"> - Llegada del gas. - Disponibilidad de energía eléctrica. - Fin del uso de la vegetación para la quema en hornos de cal. - Reducción de los usos agrarios. 	vegetal	significativa
A partir de 1987	<ul style="list-style-type: none"> - La isla es declarada Parque Natural a través de la Ley 12/1987, de 19 de julio, de Declaración de los Espacios Naturales de Canarias, salvo Caleta del Sebo que se clasifica como Suelo Rústico de Protección. - El ganado se estabula - Los usos agrarios tradicionales desaparecen 	-----	Reducida

En la figura 6, se esquematiza la evolución de los usos, así como la presión relativa que debieron ejercer sobre la vegetación de la isla y, por ello, sobre la dinámica de los sedimentos.

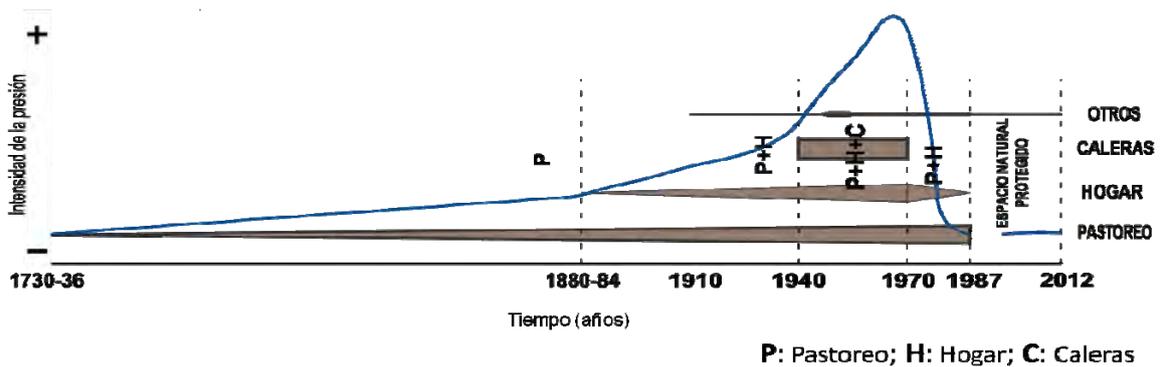


Figura 6. Evolución de los usos entre 1730 y 2012 y de la presión relativa sobre la vegetación.

(Hernández et al., 2013).

1.3 Objetivos

En las últimas décadas, algunos sistemas playa-duna del sur de la isla presentan un proceso de erosión significativo, comportamiento que se ha asociado, por parte de la población residente en la isla, al aumento de la cobertura vegetal, y la consiguiente la estabilización de amplios sectores de mantos eólicos. Es por ello que surge la necesidad de desarrollar un método que nos permita medir el grado de recubrimiento de la cobertura vegetal y su distribución en los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa. Además este método debe ser útil para realizar estudios diacrónicos con fotografías aéreas históricas, que puedan ser utilizados en otros sistemas arenosos áridos.

Por lo tanto el objetivo general de este estudio es ***establecer un método para determinar el grado de recubrimiento de la cobertura vegetal en sistemas arenosos áridos***. Para alcanzar este objetivo principal se propone los siguientes objetivos específicos:

- a) Diseñar un procedimiento metodológico, aplicando TIG, que permita realizar estudios diacrónicos de recubrimiento vegetal, mediante fotografías aéreas históricas, en sistemas sedimentarios eólicos áridos. .
- b) Experimentar el método en los sistemas sedimentarios eólicos de la isla de La Graciosa.
- c) Valorar el procedimiento metodológico seguido y analizar su viabilidad para adaptarlo a *software* libre.

2. METODOLOGÍA

2. Metodología

El objetivo general de este trabajo de fin de máster tiene un marcado carácter metodológico. Pretende aportar un procedimiento automatizado para estudiar la variación en el recubrimiento de la cobertura vegetal de un sistema sedimentario eólico árido. Para ello se utiliza como área de estudio el sistema eólico de La Graciosa.

La información empleada es la “banda 2” (Verde) de una ortofoto digital de febrero de 2009, proporcionada por el Centro Isla de La Graciosa (Organismo Autónomo Parques Nacionales). La ortofoto tiene una resolución espacial de 10 centímetros y una espectral de cuatro bandas, tres del espectro visible y una de infrarrojo cercano. El sistema de referencia de la ortofoto es WGS84 y la proyección UTM-28N. La información, referida a los píxeles que componen la imagen, se expresa en niveles digitales (ND).

La elección de la banda verde estuvo motivada por el hecho de que, dentro de las bandas que componen la región del visible, es la que aporta más información sobre la cobertura vegetal, sobre todo cuando ésta se encuentra en un estado óptimo de vigorosidad, propio de la estación (febrero de 2009) en la que fue tomada la ortofoto. Al mismo tiempo, dado que uno de los objetivos de este trabajo es adaptar el procedimiento a las fotografías aéreas históricas, esta decisión también estuvo condicionada por el hecho de que las imágenes históricas carecen de bandas en el IRC (figura 7).

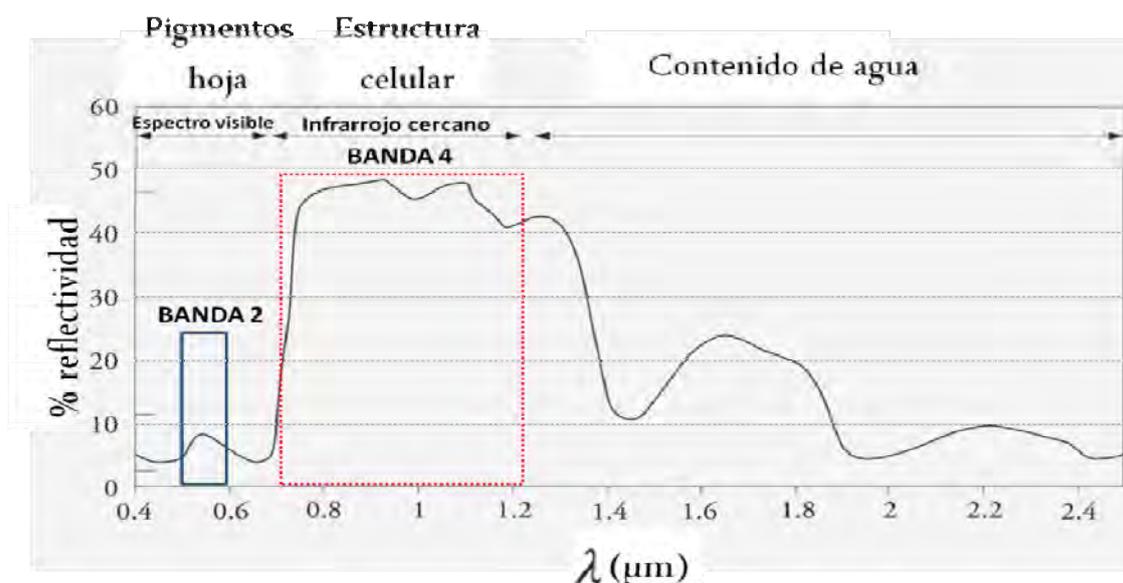


Figura 7. Factores de la reflectividad de la vegetación sana en el espectro óptico. (Modificado de Chuvieco, 2010, pág 61).

Para realizar el trabajo se ha estudiado la misma zona mediante dos procedimientos: uno empírico, basado en la fotointerpretación como se explicará más adelante, y otro automatizado, que es el diseñado en esta investigación.

La comparación de los resultados se ha realizado en una parcela de observación que presenta unas dimensiones de 200×200 metros de lados, y es representativa del sistema sedimentario estudiado. Sus dimensiones permiten mostrar los resultados a una escala detallada (1:1000), cuestión que sería más compleja si se consideraran los sistemas sedimentarios de La Graciosa en su conjunto. La parcela de observación utilizada se sitúa al sur de La Graciosa, en el sistema sedimentario eólico meridional (Figura 3, sistema D). Se seleccionó esta parcela porque en ella se distingue una gama de coberturas bien diferenciadas.

2.1 Procedimiento para medir el grado de recubrimiento de la cobertura vegetal en el sistema sedimentario eólico

2.1.1. Preparación de la “banda 2” (verde) de la ortofoto digital

Las herramientas utilizadas para el procedimiento que se presenta a continuación, están integradas en cualquier *software* SIG, tanto si es de origen comercial o libre. Se trata de herramientas básicas que hemos ido teniendo en cuenta para el uso de cualquier analista SIG, cuestión que abarca uno de nuestros objetivos.

Tal y como propone Kutiel et al. (2004) se ha comenzado por eliminar del proceso de datos todos aquellos sectores que no responden a la condición objeto de análisis. En nuestro caso, se han descartado los sectores correspondientes a los conos volcánicos, coladas o edificaciones, y sólo se ha trabajado sobre la zona considerada como sistema sedimentario eólico (Pérez-Chacón et al., 2010), tal y como se indica en el paso 1 de la figura 8.

La siguiente operación está relacionada con la resolución espacial utilizada, ya que se optó por un remuestreo de la banda 2 para cambiar el tamaño de celda de 10 centímetros a 1 metro, con el fin de generalizar un poco para agilizar los procesos posteriores (paso 2 de figura 8).

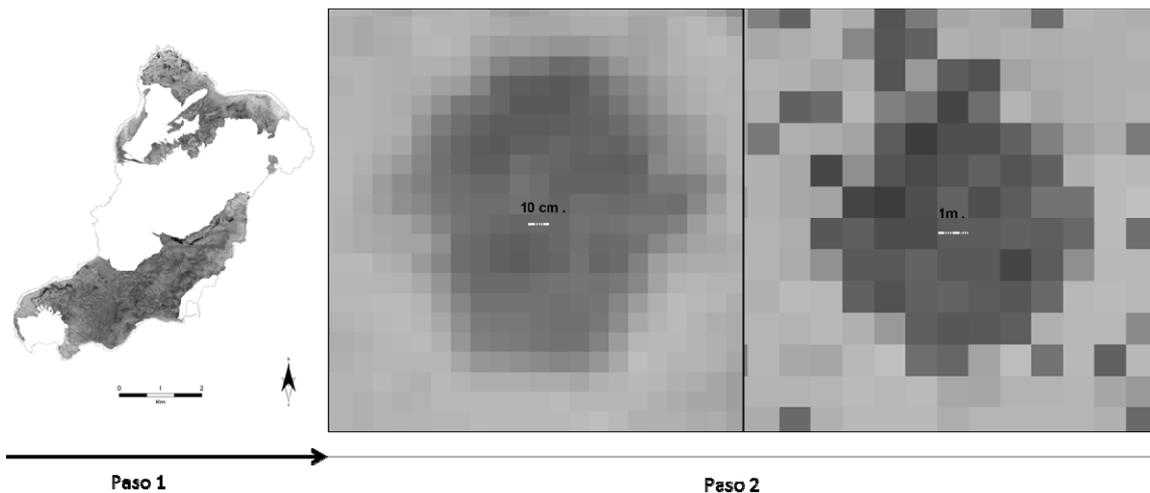


Figura 8. Determinación de las zonas de estudio y remuestreo en la banda 2 de la ortofoto de febrero de 2009.

2.1.2. Reclasificación

El método diseñado, para medir el grado de recubrimiento de la cobertura vegetal, se sustenta en un proceso de clasificación a partir de la cantidad ocupada por ésta en un espacio determinado, cuestión estrechamente relacionada con el cálculo de la densidad. Teniendo en cuenta el proceso anterior, el resultado obtenido representa las arenas en colores claros y la vegetación en colores oscuros (Kutiél et al., 2004). Con el fin de separar esta información, se lleva a cabo una reclasificación en la banda 2. Para ello se utiliza un tipo de clasificación por el método en “*Cortes naturales (Jenks)*”. Los cortes de clase se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares, y maximizan las diferencias entre clases. Las clases de cortes naturales están basadas en las agrupaciones naturales de la relación que existe entre los datos. En este caso las agrupaciones dependen del comportamiento del histograma de la banda 2.

El resultado (figura 9) es una clasificación de la banda 2, que separa aquellos valores de grises que representan la vegetación.

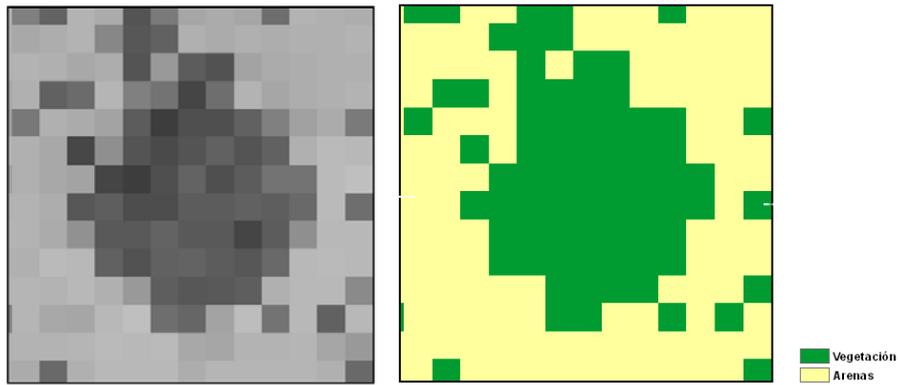


Figura 9. Resultado de la reclasificación de la banda 2 en cortes naturales “Jenks”.

2.1.3. Vectorización de la cobertura vegetal

Una vez discriminada la cobertura vegetal, se procedió a realizar un cálculo de su densidad. Para ello se aplicó el método expuesto por Mostacedo y Fredericksen (2000), basado en la obtención del promedio de la distancia del punto centro hacia cada individuo, mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$Dh = \frac{10000}{(\bar{D})^2}$$

Donde:

Dh = Densidad por hectárea,

\bar{D} = Distancia promedio

Cálculo de la densidad de árboles por hectárea. (Mostacedo y Fredericksen, 2000, pág. 14).

Por este motivo fue necesario vectorizar cada una de las celdas donde se ha identificado vegetación, generando así una malla de puntos en la que cada uno de ellos corresponde al centro de cada píxel (figura 10).

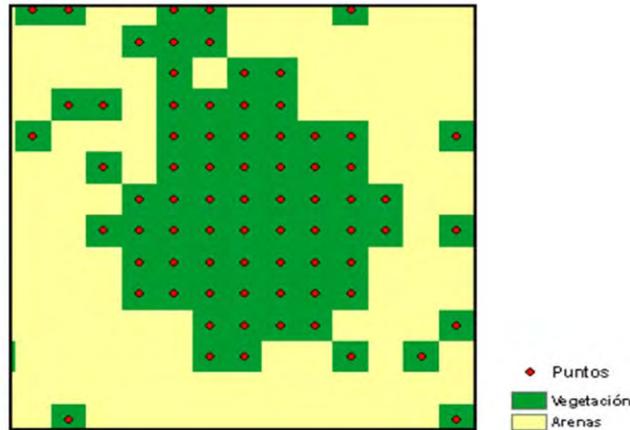


Figura 10. Vectorización en puntos centrales de las celdas con vegetación.

2.1.4. *Calculo de la densidad de la cobertura vegetal*

Tras el proceso de vectorización se puede calcular la densidad de la vegetación, entendiéndola como el grado de recubrimiento en el sistema. Para ello se tiene en cuenta que cuanto menor es la distancia entre puntos, mayor será la densidad de la cobertura vegetal y viceversa (figura 11).

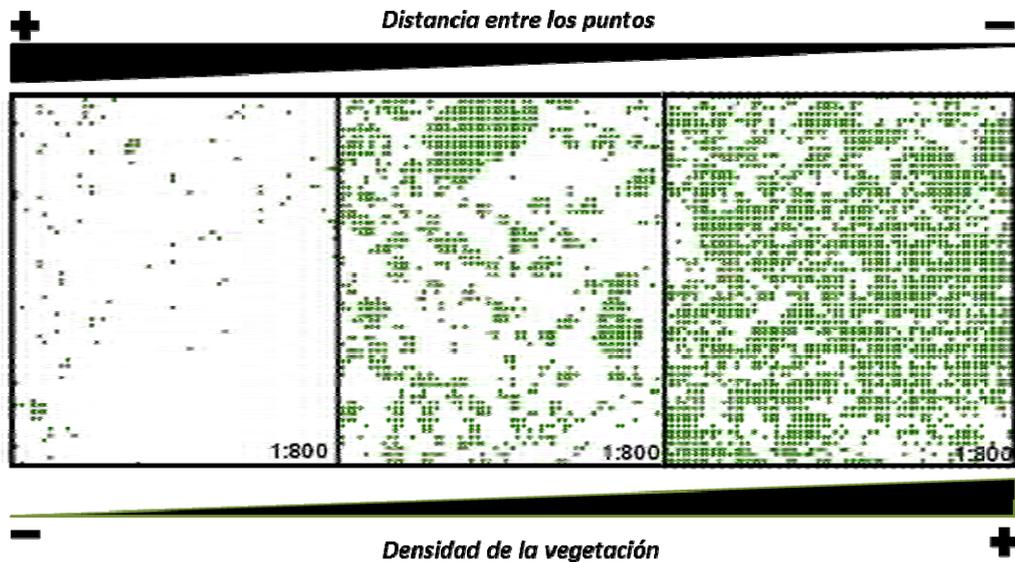


Figura 11. Ejemplo de distintas densidades de puntos representando la cobertura vegetal.

El algoritmo implementado funciona haciendo un muestreo a partir de una vecindad en cada punto, que el usuario puede escoger de acuerdo a la escala y el objeto de estudio. En él tiene importancia “la unidad de área”, pues depende de las unidades de medidas en las que se trabaja. En nuestro caso esta unidad es de un metro, al desarrollarse todo

el proceso en un sistema de coordenadas proyectas UTM. El resultado (figura 12), es un ráster con tamaño de celda de 1 metro cuadrado, equivalente a la resolución de la banda 2 remuestreada.

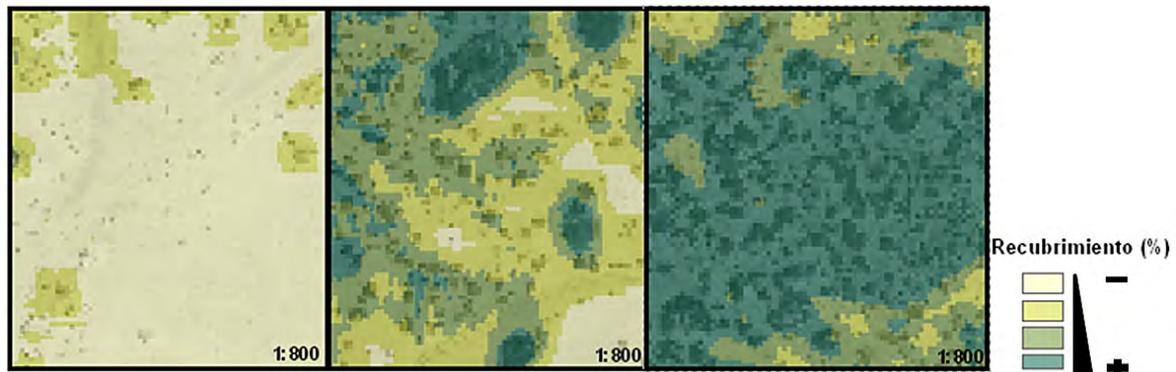


Figura 12. Clasificación de la densidad de la cobertura vegetal.

2.1.4.1 Densidad de la cobertura vegetal: el muestreo

El cálculo de la densidad, como se indicó anteriormente, se realiza a partir de un muestreo alrededor de cada punto, que depende de la escala y objeto de estudio. La forma elegida para desarrollar dicho muestreo ha sido rectangular, ya que los puntos son el resultado de una vectorización (figura 10) de origen ráster, cuyo comportamiento viene dado por celdas en forma de cuadrado con 1 metro de lado. El siguiente paso está relacionado con la cantidad de puntos que la herramienta muestrea por vecindad en cada uno de ellos. Para este fin, se utilizó un muestreo por vecindad considerando, en primer lugar, la opción de 1×1 metros y, a continuación, múltiplos de 3 (Hudak, A.T. et al., 1998), es decir, el cálculo se hace en base a 3×3, 6×6, 9×9, 12×12, 15×15, 18×18, 21×21 y hasta 24×24 metros. Los productos finales (figura 14 y tabla 2) de los resultados obtenidos se observaron en una parcela de 200 x 200 metros de lado, haciéndole una clasificación tipo “*Cortes naturales (Jenks)*” para determinar cuatro categorías consideradas (1. vegetación escasa, 2. vegetación poco densa, 3. vegetación densa y 4. vegetación muy densa).

2.2. Comprobación del muestreo óptimo: comparación con el método empírico

Según el funcionamiento de la herramienta utilizada para calcular la densidad de la cobertura vegetal, ésta utiliza un tipo de muestreo que decide el propio analista. Dado nuestro objeto de estudio, se intentó comprobar cuál o cuáles son aquellos muestreos que se acercan más a nuestras necesidades.

Para descubrir el muestreo óptimo, se decidió comparar los resultados obtenidos en la parcela de observación con el resultado ofrecido por un método empírico, basado en la interpretación manual de las distintas coberturas vegetales, según su grado de recubrimiento. Para ello se delimitaron de forma manual (Shanmugam y Barnsley, 2002), en una escala 1:1000, cuatro categorías de cobertura vegetal en la parcela observada (figura 15). Para digitalizar las áreas de coberturas con un recubrimiento similar se ha utilizado una adaptación de los gráficos para la apreciación visual de recubrimientos de Folk y Ward (1957), considerando finalmente los siguientes intervalos de recubrimiento: 0-25%; 25-50%; 50-75% y >75% (figura 13).



Figura 13. Categorías utilizadas para estimar los porcentajes de cobertura vegetal.

La comparación entre los distintos tipos de muestreos y el método empírico pretende conocer las superficies coincidentes de forma general, es decir, con respecto a los resultados totales entre cada uno de los muestreos y la parcela fotointerpretada, y entre las distintas categorías de cobertura vegetal. Para ello se realizó un análisis espacial mediante herramientas de geoprociamiento, con el fin de determinar qué muestreo, entre los obtenidos, guarda mayor relación con los resultados obtenidos a través del método empírico. El geoprociamiento ofrece una serie de herramientas que dan la posibilidad de superponer conjuntos de datos espaciales, y estudiar aquellas categorías que se asemejan más, tanto en superficie ocupada como en localización.

3. RESULTADOS

3. Resultados

En este apartado se exponen los resultados obtenidos mediante los diferentes procedimientos utilizados. Los conseguidos a partir del método empírico y los controles de campo se consideran los más próximos de la realidad, por lo que constituyen el patrón con el que se comparan los alcanzados con el método automatizado diseñado en esta investigación.

3.1. Resultados según los muestreos realizados

En el primer caso (figura 14) y tabla 2, se muestran los resultados correspondientes a los distintos muestreos explicados en el apartado 2.1.4.1 de la metodología. Como ya se explicó, la herramienta del cálculo de densidad, necesita una distancia de muestreo para poder calcularla. Para ello, se escogieron distancias de 1×1, 3×3, 6×6, 9×9, 12×12, 15×15, 18×18, 21×21 y 24×24. En la figura, se observa como los resultados varían con respecto a cada uno de ellos, ya que cada una de las cuatro categorías estudiadas comparten áreas distintas dependiendo del tipo de muestreo.

Para entender la información que nos aporta estos resultados, se calculó para cada área obtenida, producto de los muestreos realizados, un porcentaje de ocupación de la vegetación localizada en el interior de cada área resultante. Finalmente, se obtuvo un porcentaje de ocupación medio por cada categoría obtenida. En la tabla se muestra el porcentaje medio que ocupa la vegetación en cada una de las categorías que obtenemos por muestreo.

Tabla 2. Porcentaje de la ocupación media de la cobertura vegetal en las zonas estudiadas mediante diferentes muestreos.

Tipo de muestreo	Ocupación media de la cobertura vegetal por categorías (%)			
	1	2	3	4
1x1	34,48	-----	-----	88,65
3x3	25,88	34,50	82,50	99,78
6x6	19,53	19,50	60,13	90,07
9x9	10,65	22,35	49,26	84,25
12x12	17,77	22,84	49,97	86,13
15x15	8,82	19,89	43,47	72,62

18x18	2,53	26,18	44,15	78,47
21x21	4,14	43,81	55,92	75,17
24x24	4,64	24,62	45,52	64,64

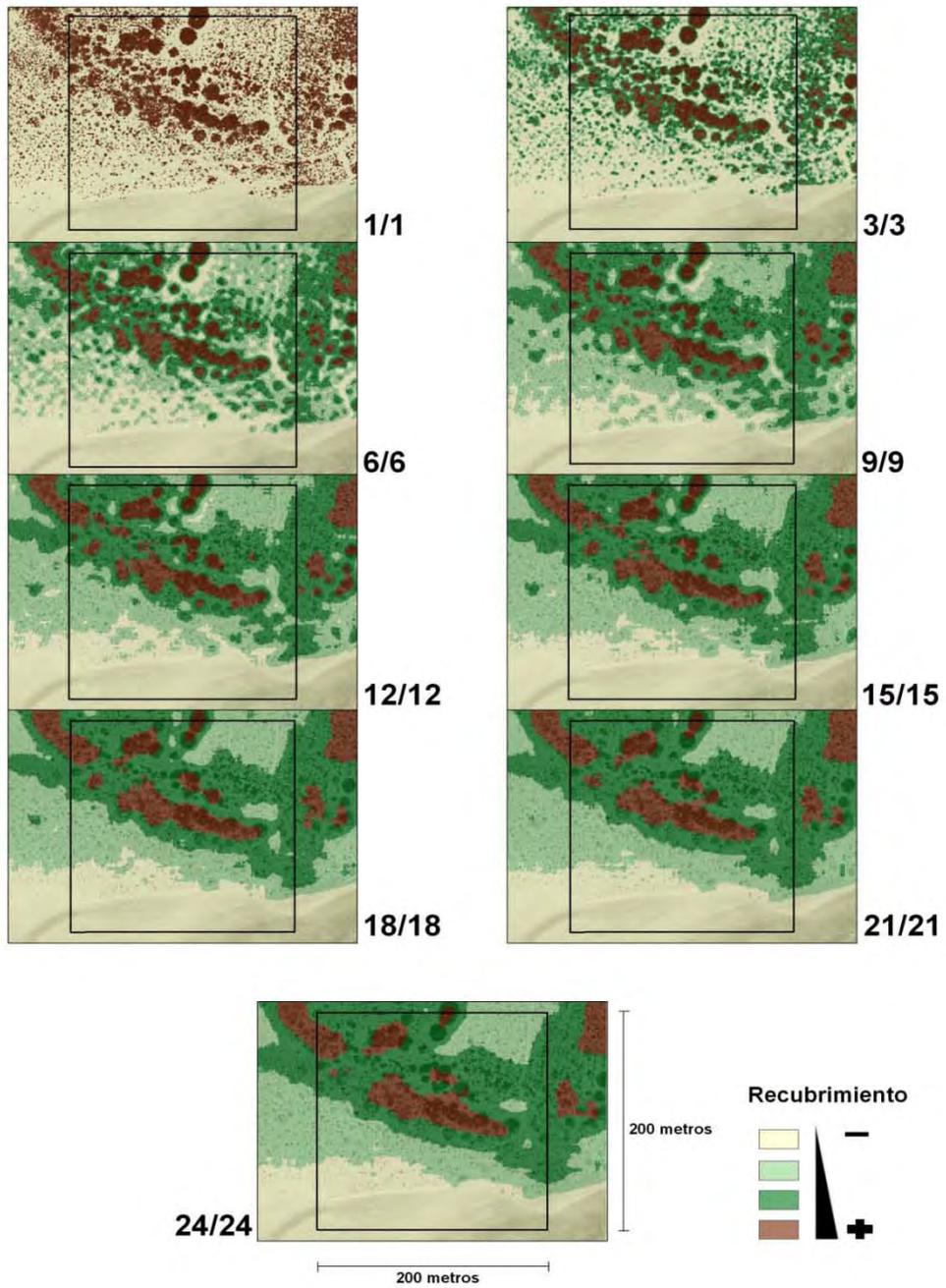


Figura 14. Resultados de los distintos muestreos realizados.

3.2. Resultados del muestreo óptimo

Para determinar qué superficie de observación es la que aporta unos resultados más satisfactorios, se compararon resultados de cobertura vegetal obtenidos a partir de los muestreos automatizados, hechos en rectángulos de diferentes distancias, con las coberturas observadas mediante un método empírico de fotointerpretación (figura 15). Esta comparación se lleva a cabo mediante la utilización de herramientas de geoprocесamientos integradas en los sistemas de información geográfica (SIG), obteniendo de esta forma las superficies coincidentes en cada muestreo y por categorías.

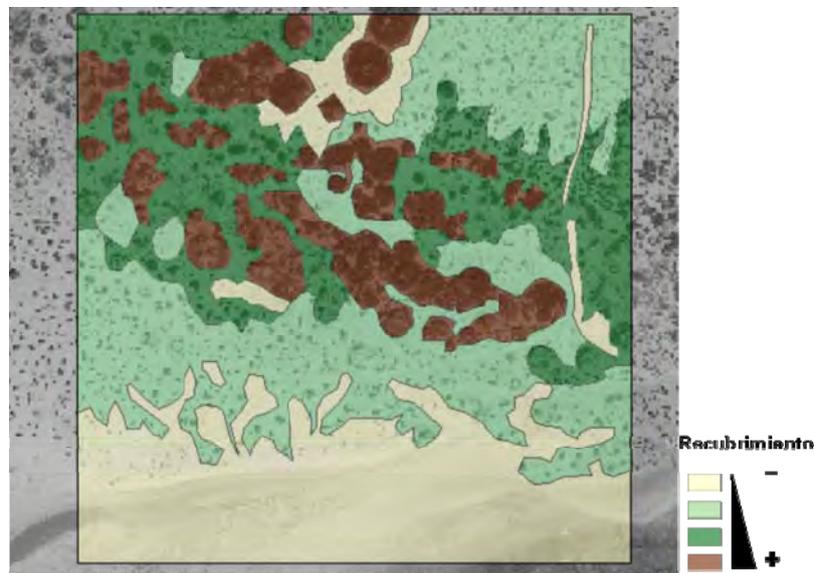


Figura 15. Categorías de cobertura vegetal obtenidas a partir del procedimiento empírico, considerando el grado de recubrimiento de la vegetación. Resultado a partir de fotointerpretación a escala 1:1000.
Categorías 1. < 25%, 2. 25%-50%, 3. 50%-75% y 4. >75%

Los cambios de tendencia de los gráficos de la figura 16 permiten identificar cuáles son los muestreos óptimos.

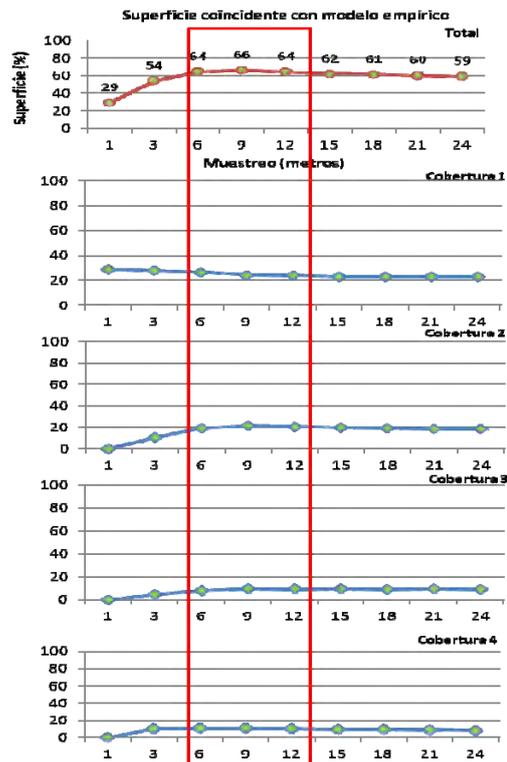


Figura 16. Porcentajes de superficie coincidente al comparar los resultados obtenidos por el método empírico con los extraídos mediante procedimientos automatizados. En el eje de abscisas se indican las dimensiones (m x m) de los distintos rectángulos de muestreo utilizados.

En el primer gráfico se muestran los resultados globales. El rectángulo de 9x9 m es el que presenta un mayor grado de coincidencia con el procedimiento empírico, aunque también resultan significativas las similitudes cuando se utilizan rectángulos comprendidos entre 6x6m y 12x12m.

Cuando se realiza el análisis diferenciando las categorías de la cobertura vegetal, se observa que en el comportamiento de la cobertura 1 (escasa vegetación), también hay un cambio de tendencia entre las muestras de 6x6 hasta el 12x12, esta vez comparte menor superficie coincidente. Sin embargo, esto se explica debido a que el resultado del muestreo 1x1 que se observa en la figura 14 y en la gráfica, posee mayor equidad en superficie, separando sólo 2 categorías posibles, siendo estas, las coberturas de escasa vegetación (1) y vegetación muy densa (4). Estos dos tipos de coberturas son fácilmente identificables de forma visual por el analista, por lo que existe menos diferencia entre el procedimiento empírico y el automatizado. Sin embargo el objeto de estudio identifica otras dos categorías no apreciables en el muestreo 1x1 aunque sí a partir del muestreo 3x3, que dan como resultado un descenso, ya que analizar estas

categorías conllevan mayor dificultad de precisión y por tanto menor coincidencia con el método automatizado

Finalmente, el resto de las coberturas (2 (poco densa),3 (densa) y 4 (muy densa)) tienen entre los muestreos 6×6 y 12×12 los mayores porcentajes de similitud, siendo el de 9×9 m el que muestra una mayor coincidencia con los resultados empíricos.

3.3. Cobertura vegetal de los sistemas sedimentarios de La Graciosa: resultados obtenidos a partir de un rectángulo de 9×9 m

Las categorías señaladas (1. vegetación escasa, 2. vegetación poco densa, 3. vegetación densa y 4. vegetación muy densa), representan el nivel de recubrimiento de la vegetación en el sistema, siendo útil a modo de orientación los resultados de ocupación media de la vegetación expuestos en la tabla 2 de los resultados, concretamente la información del muestreo 9×9, de esta forma se puede entender el porcentaje de recubrimiento que nos está indicando las distintas categorías.

Una vez determinado que el rectángulo de 9 x 9 m es el que presenta un mayor grado de coincidencia con el patrón obtenido a partir del método empírico, se procede a determinar la cobertura vegetal en el conjunto de los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa (tabla 3). Considerados en conjunto (figura 3), las coberturas vegetales correspondientes a las categorías de densa (3) y muy densa (4) ocupan algo más del 36%. Las coberturas poco densas (2), por su parte, suponen más del 41%. Coincide esta categoría con zonas que están comenzando a ser colonizadas por la vegetación. En contrapartida, y a diferencia de lo que a priori podría esperarse que suceda bajo unas condiciones ambientales desérticas, la categoría de cobertura vegetal escasa (1) representa un poco más del 22%. En definitiva, se puede afirmar que las áreas con sedimentos eólicos de La Graciosa presentan, en febrero de 2009, un recubrimiento vegetal significativo. No obstante, es necesario matizar estas cifras, pues el análisis se ha realizado sobre una ortofoto de invierno, por lo que la cobertura vegetal está próxima a su máximo estacional.

Tabla 3. Resultados del porcentaje de superficie ocupada por las distintas categorías estudiadas en los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa

Sistemas Sedimentarios	Categorías de cobertura vegetal	Superficie (%)
La Graciosa	1	22,17
	2	41,79
	3	27,37
	4	8,67
Septentrional (A)	1	32,01
	2	47,91
	3	16,09
	4	3,98
Las Conchas (B)	1	28,21
	2	64,82
	3	6,85
	4	0,12
Pedro Barba (C)	1	40,94
	2	48,92
	3	9,42
	4	0,72
Meridional (D)	1	17,23
	2	47,02
	3	29,07
	4	6,68

Desde el punto de vista espacial (mapa 1), las coberturas muy densas (categoría 4) son más abundantes en los ambientes sedimentarios del sur de la isla. Mientras que las de vegetación escasa (categoría 1) se localizan sobre todo en los sectores más próximos al litoral. Estas tendencias generales presentan algunas matizaciones en cada uno de los sistemas estudiados, que se comentan a continuación.

- **Sistema sedimentario eólico septentrional (A)**

Por su extensión, representa el 32,16% de los sistemas eólicos de La Graciosa. Más del 47% de la superficie de este sistema presenta coberturas de vegetación correspondiente a la categoría de poca vegetación (2), también las categorías 3 y 4 (vegetación densa y muy densa) (figura 17), cuentan con una amplia representación siendo esta mayor del 20%, según (Pérez-Chacón *et al.*, 2010) este sector corresponde con una de las entradas de sedimentos a la isla, por ello se explica la presencia significativa de la categoría 1 (vegetación escasa) con más del 32 %.

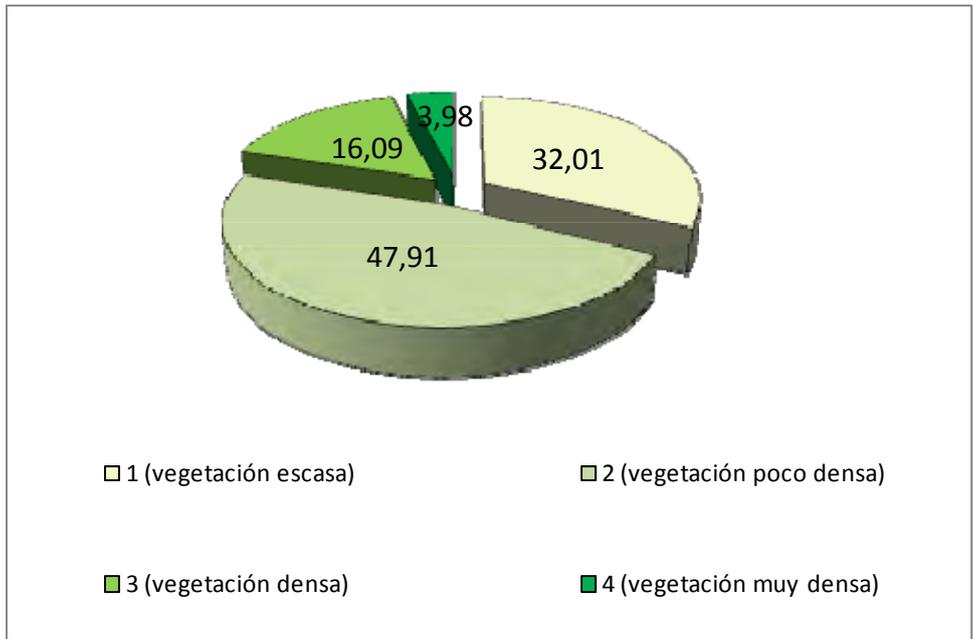


Figura 17. Porcentajes de ocupación por categorías de cobertura vegetal en el sistema eólico septentrional en 2009.

- **Sistema sedimentario eólico de Las Conchas (B)**

Este sistema sólo supone el 2,37% del total de los sistemas eólicos de la isla. Presenta contrastes notables con respecto a la cobertura (figura 18), siendo especialmente significativa la amplia representación (64,82%) que posee la categoría de poco densas (2), aunque las coberturas densas y muy densas (3 y 4) están relativamente representadas. .

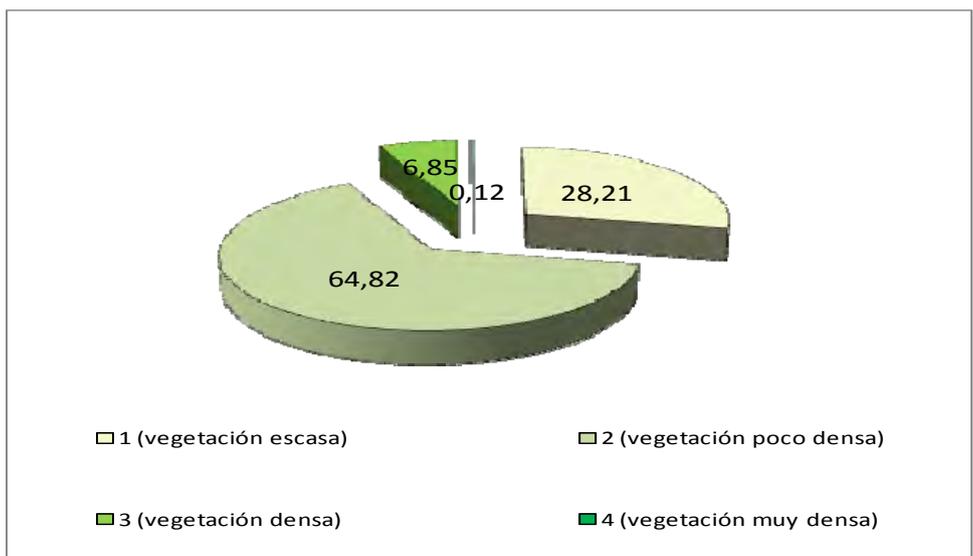


Figura 18. Porcentajes de ocupación por categorías de cobertura vegetal en el sistema eólico de Las Conchas en 2009.

- **Sistema sedimentario eólico de Pedro Barba (C)**

Es el más pequeño de los sistemas eólicos delimitados, y en él predominan las coberturas más densas (categorías 2, 3 y 4) (figura 19), aunque existe una presencia significativa de coberturas escasas (1).

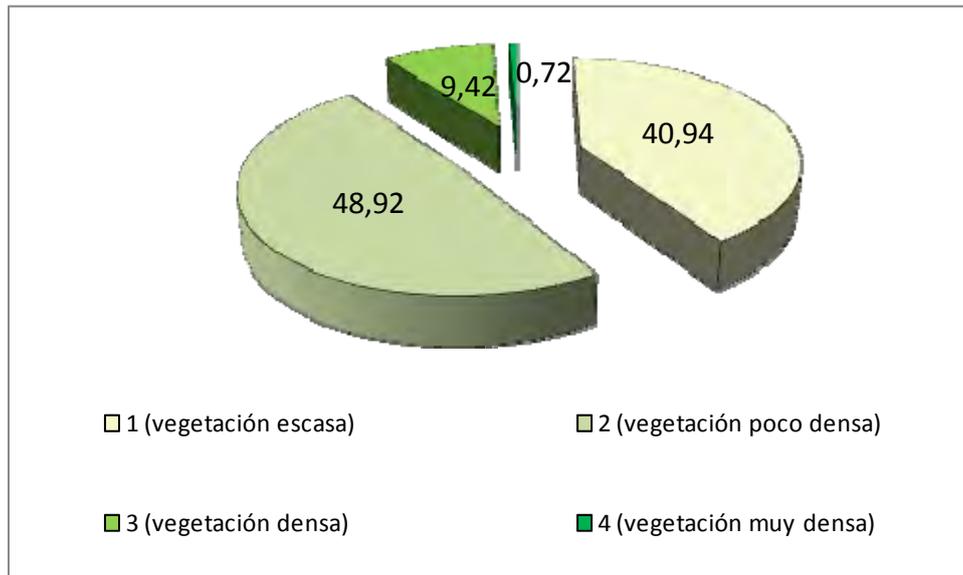


Figura 19. Porcentajes de ocupación por categorías de cobertura vegetal en el sistema eólico de Pedro Barba en 2009.

- **Sistema sedimentario eólico meridional (D)**

Es el más extenso de los sistemas delimitados, pues equivale al 65% del área con sedimentos eólicos de la isla. Las coberturas comprendidas entre poco densas (categoría 2), densas (categoría 3) y muy densas (categoría 4) (figura 20) se localizan fundamentalmente en los sectores interiores de este sistema eólico, o en la parte trasera del núcleo poblacional de Caleta del Sebo (mapa 1), mientras que hacia la periferia lo hacen las coberturas escasas (categoría 1). También se puede afirmar que se trata del sistema eólico con mayor impacto antrópico, debido a su cercanía a Caleta de Sebo, el mayor núcleo poblacional de la isla (Hernández et al., 2013).

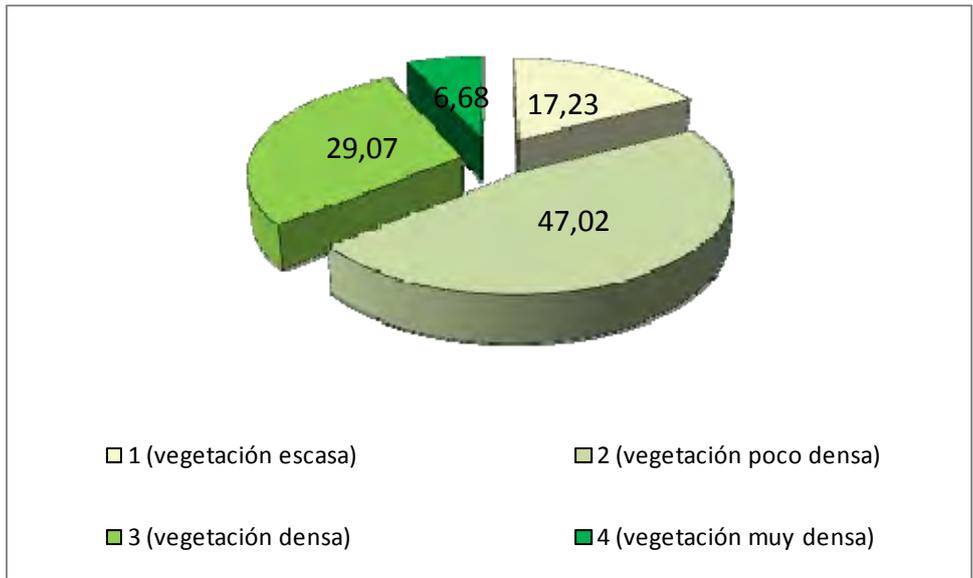


Figura 20. Porcentajes de ocupación por categorías de cobertura vegetal en el sistema sedimentario eólico meridional en 2009.

4. DISCUSIÓN

4. Discusión

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se plantean en este apartado algunas ventajas o posibilidades del diseño metodológico esbozado, con respecto a otros métodos existentes, así como algunas de las limitaciones que se han detectado. En primer lugar, como cualquier método automático, pretende obtener unos resultados que no conlleven en sí una carga de subjetividad, de la que sí dependen en este contexto los análisis visuales (Morgan *et al.*, 2010).

Cuando se utiliza la fotointerpretación para analizar determinados elementos en la superficie terrestre, el analista debe tomar decisiones al delimitar cada cobertura. La probabilidad de que otro analista interprete la realidad de forma distinta es bastante alta. Otro factor importante, que no se debe ignorar, es la formación y la experiencia del analista, lo que hace que la precisión a la hora de realizar el trabajo varíe constantemente (Morgan *et al.*, 2010).

En el método desarrollado en este trabajo se utilizan cálculos de densidad a partir de algoritmos implantados en un programa SIG, lo que permite obtener resultados de una manera más sistemática. También el tiempo de ejecución es mayor cuando se realiza mediante análisis visual, lo que supone un mayor coste de recursos humanos y económico. . En cambio, en el método desarrollado la obtención de información es de forma automática, y se evitan esos sobrecostes.

Por otro lado, comparando el método con otros utilizados en teledetección, se valora el uso del cálculo de densidad de vectores en vez de la reflectividad, ya que para estos últimos se necesitarían imágenes procedentes de determinados sensores, en su mayoría aerotransportados, que cuentan con bandas en la región del infrarrojo cercano. Estos sensores suponen un mayor coste que el de las ortofotos digitales o fotografías aéreas. Además, el registro histórico de las fotografías aéreas es más extenso que el de las imágenes de satélite (Morgan *et al.*, 2010). En este sentido, este método se adapta a la disponibilidad de esas imágenes históricas para realizar estudios diacrónicos de la vegetación. Hasta ahora este tipo de clasificación de coberturas en fotografías aéreas se realizaban a partir de fotointerpretación (Shanmugam y Barnsley, 2002; García *et al.*, 2012), o clasificaciones automáticas, que relacionaban el valor de los niveles digitales con la densidad, sin antes haber medido ésta (Kutiel *et al.*, 2004).

Por último, consideramos que el método propuesto presenta ventajas con respecto a otro de los métodos más utilizados en teledetección, el que se sustenta en el cálculo de los índices de vegetación. En primer lugar, el índice de vegetación no calcula la cobertura vegetal, sino el vigor de la vegetación. Relacionado con este aspecto, hay que indicar que en las zonas áridas, como el litoral de las islas Canarias, la vegetación presenta una marcada estacionalidad. De esta forma, las plantas durante la estación seca, debido a la pérdida de las hojas, por ejemplo, presentan un aspecto de escaso vigor, por lo que el cálculo de los índices de vegetación en estas circunstancias no permite detectar la totalidad de la vegetación existente, sólo aquella que dispone de clorofila. Sin embargo, muchas especies de medios áridos atenúan su actividad durante la estación seca, por lo que podrían estar dando una respuesta negativa en el índice de vegetación que, en la práctica, no se corresponde con la cobertura que tiene, aunque sea de materia seca. Los resultados obtenidos, a partir del método desarrollado permitirán afrontar un análisis futuro donde se compare la cobertura vegetal con las geoformas de los sistemas sedimentarios eólicos. Este aspecto reviste un notable interés, pues la interacción entre vegetación y dinámica eólica es un factor explicativo fundamental para entender los sistemas de dunas.

Desde el punto de vista ecológico, es posible que las categorías obtenidas tengan alguna relación con la distribución de determinadas comunidades vegetales de La Graciosa, cuyos mecanismos de supervivencia sigan un patrón directamente relacionado con la densidad. En este sentido podrían existir comunidades que son más sensibles a densidades altas y que, por el contrario, necesiten densidades medias o bajas para sobrevivir en un medio desértico, donde los recursos son escasos.

En cuanto a las limitaciones del método, se han detectado fundamentalmente tres: dos relacionadas con la utilización de la banda verde de la ortofoto utilizada, y otra vinculada al uso de la herramienta para el cálculo de densidades.

Por un lado, este método sólo es aplicable por el momento en sistemas sedimentarios eólicos áridos, debido al comportamiento que tienen los niveles digitales (ND) en estas zonas. En decir, partimos de la premisa de que los niveles digitales de colores más oscuros corresponden a la vegetación, mientras que los niveles digitales de tonos más claros son los de las arenas. Esta correspondencia, tras haber utilizado la banda verde, sólo se puede establecer en sistemas arenosos áridos porque, a priori, no existen más

elementos en el terreno. Por el contrario, en zonas donde predominan tanto la vegetación como material rocoso, es bastante difícil separar ambos elementos, pues ambos presentan baja reflectividad en la banda trabajada. Justamente de este hecho se deriva también la tercera limitación del diseño metodológico establecido. Aunque pensáramos que en los sistemas arenosos áridos sólo cabría esperar arenas y vegetación, cierto es que con frecuencia aflora material rocoso, tanto volcánico, como sedimentario, cuando el sistema de dunas se localiza, por ejemplo, en la desembocadura de un barranco, como sucede en Maspalomas (Gran Canaria). Este material se comporta en la banda verde de forma similar a la vegetación (baja reflectividad) y, por consiguiente, da valores en la gama de los colores oscuros. Por ello sería necesario detectar un procedimiento que permita discriminar entre ambos tipos de cobertura para no confundirlas. En esta línea, lo que sí hemos considerado interesante, para incorporar en futuros trabajos, es utilizar los índices de vegetación anteriormente mencionados y compararlos con los resultados de vegetación obtenidos en la banda verde trabajada, ya que de esta forma y, apoyados en controles de campo, se podrían diferenciar elementos que no se correspondan con la vegetación y eliminarlos del proceso y análisis de datos.

La última limitación que hemos detectado está relacionada con la herramienta que calcula la densidad de puntos pues, a medida que se incrementa el tamaño de la unidad de muestreo, la herramienta generaliza los resultados de la densidad. Ello supone que será necesario establecer previamente en cada caso cuál es el tamaño óptimo de la unidad de muestro.

5. CONCLUSIONES

5. Conclusiones

El desarrollo de esta investigación aporta las siguientes conclusiones, que se presentan considerando varias líneas temáticas:

Aspectos relacionados con la utilidad del método

- Se ha desarrollado un método que permite clasificar de forma automática la cobertura vegetal en sistemas arenosos áridos, utilizando para ello ortofotos digitales.
- Aparentemente, y a falta de concretar algunas cuestiones mencionadas en la discusión, el método se adapta adecuadamente al estudio de fotografías aéreas históricas, lo que permite realizar estudios diacrónicos sobre la evolución de la cobertura vegetal. .
- Este método ofrece una alternativa a los procedimientos utilizados hasta ahora, que necesitan información más costosa y de menor registro histórico (imágenes satélites) o métodos de fotointerpretación que conllevan mayor carga de trabajo y dependen mucho del rigor del analista.
- El método puede ser perfectamente desarrollado con cualquier *software* SIG, sea comercial o libre.

Aspectos relacionados con la utilidad de los resultados obtenidos

- Los resultados obtenidos han permitido caracterizar y analizar espacialmente la distribución de la cobertura vegetal en los sistemas sedimentarios eólicos de la isla de La Graciosa.
- Las categorías estudiadas aportan información sobre la dinámica sedimentaria, ya que ambas están íntimamente relacionadas. Se trata de una cuestión clave porque permite conocer que zonas tienen más o menos movilidad de sedimentos.

Aspectos relacionados con los resultados obtenidos

- El tamaño óptimo de la unidad de muestro, en el procedimiento automatizado, se corresponde con un rectángulo de 9×9 m. Por ello es el tipo de unidad que se ha

utilizado para caracterizar la cobertura vegetal de los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa.

- Se puede afirmar que las áreas con sedimentos eólicos de La Graciosa presentan, en febrero de 2009, un recubrimiento vegetal significativo.
- Las coberturas escasas en vegetación se localizan en las zonas litorales más próximas al mar y, en algunos casos, cercanas a las áreas de entrada de sedimentos.
- Las coberturas más densas se encuentran principalmente en zonas interiores de la isla.
- El uso de SIG ayudaría a comprender las pautas de distribución espacial de estas coberturas, así como a relacionar esta variable con la dinámica sedimentaria. En definitiva, se trata de una investigación que abre muchas puertas para continuar con el trabajo iniciado.

6. PERSPECTIVAS

6. Perspectivas

En cuanto a las perspectivas, el primer problema que nos planteamos es conocer qué muestreo por vecindad separa mejor las distintas categorías de cobertura vegetal. Con este fin, hasta ahora solamente se ha validado el método propuesto mediante un análisis que compara un procedimiento de interpretación visual con el método expuesto sobre una parcela de observación. Por lo tanto, faltaría completarlo mediante un análisis estadístico más detallado. De esta forma, tendríamos dos análisis que nos permitirían aproximarnos al muestreo por vecindad que mejor refleja la realidad observada.

También mediante análisis estadístico es necesario obtener unos intervalos finales que representen el porcentaje de ocupación vegetal, para relacionarlo con cada una de las cuatro categorías obtenidas en el procedimiento.

Una vez cerrado el método, el análisis de fotografía aéreas históricas es un objetivo prioritario, ya que un estudio diacrónico permite obtener mapas de cambios donde se muestran las variaciones espacio-temporales experimentadas por la vegetación.

La cuantificación de estas variaciones aporta claves muy importantes para comprender tanto las modificaciones que han sufrido las morfologías eólicas, como el sistema eólico en general.

Es también amplio el campo de posibilidades que se abre para relacionar estos resultados con otras variables ambientales, tales como las unidades geomorfológicas, comunidades vegetales, contenidos en carbonato de los sedimentos, unidades

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía

AGÜERA, F., AGUILAR, F. J. y AGUILAR, M. A. (2008): "Using texture analysis to improve per-pixel classification of very high resolution images for mapping plastic greenhouses", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 6: 635-646.

ALONSO, I., HERNÁNDEZ, L., ALCÁNTARA, J., CABRERA, L.L. y YANES, A. (2011): Los grandes campos de dunas actuales de Canarias. En Sanjaume, E. y Gracia, F.J (Eds.), *Las dunas en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Madrid, pp. 467-495.

ANDRÉS, J.R. (De) y GRACIA, F.S. (2002): La franja litoral: riesgos y protección. En, AYALACARCEDO, F.J. y OLCINA, J. (Eds.): *Riesgos Naturales*. Ariel, Barcelona, pp. 1023-1055.

BANNARI A., HUETE A., MORIN D. y BONN F. (1995): A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13: 95- 112.

BARNESLEY, M. y HOBSON, P. (1997): Teaching the principles of optical remote sensing using graphical tools developed in Tcl/Tk. *Remote Sensing Society Annual Conference*.

BARRAGÁN, J.M. (2003): Medio ambiente y desarrollo en áreas litorales. Introducción a la planificación y gestión integradas. Cádiz. Servicio de publicaciones de la Universidad de Cádiz.

BAUER, B.D. y SHERMAN, D.J. (1999): Coastal dune dynamics: problems and prospects. En, GOUDIE, A.S., LIVINGSTONE, I. y STOKES, S. (Eds.): *Aeolian Environments, sediments and landforms*. John Willey and sons, London, pp. 71-104

BERLANGA-ROBLES, C.A. y RUIZ-LUNA A. (2002): Land use mapping and change detection in the coastal zone of northwest of Mexico using remote sensing techniques. *Journal of Coastal Research*, 18: 514-522.

BEATLEY, T. (1991): Protecting biodiversity in coastal environments: introduction and overview. *Coastal Management*, 19: 1-19.

BELWARD, A.S., (1991): Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. In *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries*, edited by A. S. Belward and C. R. Valenzuela (Netherlands: ECSC, EEC, EAEC), pp. 31-53.

BERMEJO, J. A. (2002): *Utilización de los Sistemas de Información Geográfica en el análisis de la vegetación y el medio físico. Municipio de Villa de Mazo (La Palma)*. (Tesis de Licenciatura, inédita). Departamento de Biología Vegetal (Botánica). Facultad de Biología. Universidad de La Laguna, 270 pp.

BOWMAN, W.D. (1989): The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sensing of Environment*, 30: 249 -255.

CABRERA, G. (1997): Los hombres y las mujeres de la mar (La Graciosa). Ed. Centro de la Cultura Popular Canaria, S/C de Tenerife.

CARMEL, Y. y KADMON, R. (1998): "Computerized classification of Mediterranean vegetation using panchromatic aerial photographs", *Journal of Vegetation Science*, 9: 445-454.

CARTER, R.W.G., BAUER, B.O., SHERMAN, D.J., DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D., GARES, P.A., NORDSTROM, K.F. y ORFORD, J.D., (1992): Dune development in the aftermath of stream outlet closure: examples from Ireland and California. In: Carter, R.W.G., Curtis, T.G.F., Sheehy-Skeffington, M.J. (Eds.), *Coastal Dunes: Geomorphology, Ecology and Management for Conservation*. Balkema, Rotterdam, pp. 57-69.

CENDRERO, A., SÁNCHEZ-ARCILLA, A. y ZAZO, C. (2005): Impactos sobre las zonas costeras. En: Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Proyecto ECCE-Informe Final. Ministerio de Medio Ambiente. 469-524.

CERDÁ, V. (2002): La Gestión integrada de la costa ¿La última oportunidad? Revista de obras públicas Ingeniería y Territorio, 61:8-15.

CHEN, Q., VAGLIO LAURIN, G., BATTLES, J.J. y SAAH, D. (2012): Integration of airborne LiDAR and vegetation types derived from aerial photography for mapping aboveground live biomass. *Remote Sensing of Environment*, 121, 108-117.

CHUVIECO, E. (2010): Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio, Ariel, Barcelona.

COLWELL, J.E. (1974): Vegetation canopy reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 3: 175-183.

COHEN, J.E., SMALL, C., MELLINGER, A., GALLUP, J. y SACHS, J. (1997): Estimates of coastal populations. *Science*, 278:1211-1211.

COTS FOLCH, R., ATKINHEAD, M. J. y MARTÍNEZ CASANOVAS, J. A. (2007): "Mapping land cover from detailed aerial photography data using textural and neural network analysis", *International Journal of Remote Sensing*, 28, 7: 1625-1642.

CRUZ, H. (1996): Tourism and Environment in the Mediterranean. En, Salman, A.H.P.M., Langeveld, M.J. y Bonazountas, M. (Eds.): *Coastal Management and Habitat Conservation*. European Union for Coastal Conservation, Leiden, Vol II, pp. 113-116.

- CURRAN, P. J. (1981): Multispectral remote sensing of vegetation amount. *Progress in Physical Geography*, 5: 315- 341.
- DANSON, F.M. (1998): Factors controlling vegetation canopy reflectance: a teaching model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 64: 809-812.
- DE LA NUEZ, J., QUESADA, M.L. y ALONSO J.J. (1997): *Los volcanes de los islotes al norte de Lanzarote*. Fundación César Manrique, Arrecife. Lanzarote.
- DE LANGE, R., VAN TIL, M., y DURY, S. (2004): The use of hyperspectral data in coastal zone vegetation monitoring. *European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL) eProceedings*, 3: 143 – 153.
- DEMIRAYAK, F. y ULAS, E. (1996): Mass tourism in Turkey and its impact on the Mediterranean coast. En, Salman, A.H.P.M., Langeveld M.J. y Bonazountas M. (Eds.): *Coastal Management and Habitat Conservation*. European Union for Coastal Conservation, Leiden, Vol II, 117-123.
- DROESEN W. J., VAN TIL, M. y ASSENDORP, D. (1995): Spatio-temporal modelling of the vegetation structure in the Amsterdam water works dunes using digital false colour orthophotos. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 4 (1): 106-114.
- EOM, H. J., y FUNG, A. K. (1984): A scatter model for vegetation up to Ku- Band. *Remote Sensing of Environment*, 15: 185–200.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2006): The Changing faces of Europe´s coastal areas. EEA Report nº6.
- FERNANDES, J.J. y NEVES, M.R. (1997): The Impact of Tourism on the Sand Dune System of the Ria Formosa Natural Park. The Case of Ancão Península. En, Garcia Novo, F., Crawford, R.M.M. y Barradas, M.C.D. (Eds): *The Ecology and Conservation of European Sand Dunes*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, pp. 321-333.
- FERNÁNDEZ, E., SALAS, M., QUINTANA, G., MARTÍN, M., MÁYER, P. y PÉREZ-CHACÓN, E. (2004): Las comunidades de vegetación como bioindicadoras para la delimitación espacial de zonas biogeográficas: una aproximación mediante SIG. *Actas del III Congreso Español de Biogeografía*, Urdaibai, País Vasco, pp 180-187.
- FOLK, R.L y WARD, W.C. (1957): Brazos river bar. A study in significance of grain size parameters. *Journ. Sed. Petrol.*, 27, 3-26.
- FRANKLIN, J. (1995): Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 19 (4): 474-499.
- GATES, D., KEEGAN, H., SCHELETER, J. y WEIDNER, V. (1965): Spectral properties of plants. *Applied optics*, 4: 11- 20.

GARCIA, L., PEREZ-CHACON, E., HERNANDEZ, A. y FERNANDEZ, E. (2012): Distribución espacial de la cobertura vegetal en el sistema sedimentario eólico de la isla de La Graciosa (islas Canarias, España). En: Cunill, Raquel; Albert, Pelachs; Pérez-Obiol, Ramón; Soriano, J. Manuel. (Eds.), *Las zonas de montaña: Gestión y Biodiversidad*. Fundació Catalunya Caixa, Barcelona. Pp. 139-144. ISBN: 978-84-616-0354-1. En: VII Congreso Español de Biogeografía. Pirineos 2012.

GAUSMAN, H. W. (1977): Reflectance of leaf componentes, *Remote Sensing of Environment*, 6: 1-9.

GONZÁLEZ, F.J., MORÍN, P. y ACOSTA, J.E. (1996): *La Graciosa. Estudio histórico y geográfico*. Centro de la Cultura Popular Canaria, Santa Cruz de Tenerife.

GONZALO, J.; ALLUÉ, C. y CUASANTE, D. (2001): Metodología de análisis de la cubierta vegetal mediante ortografía digital. Su aplicación a la Combe de Huidobro (Burgos). *III Congreso Forestal Español*, Granada.

GRACIA, F., SANJAUME, E. HERNÁNDEZ, L., HERNÁNDEZ, A., FLOR, G., y GÓMEZ-SERRANO, M. (2009): Dunas marítimas y continentales. En: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino: *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Madrid, 105 pp.

GRANADOS, M., MARTIN, A. y GARCIA-NOVO, F. (1988): "Long-term vegetation changes on the stabilized dunes of Doñana National Park (SW Spain)". *Vegetatio*, 75, 73-80.

GUISAN, A.; THEURILLAT, J-P. y KIENAST, F. (1998): Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment. *Journal of Vegetation Science*, 9: 65-74.

GUYOT, G., GUYON, D. y RIOM P. (1989): Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. *Geocarto International*, 4: 3-18.

HALL D. K., FOSTER J. L., VERBYLA D. L., KLEIN A. G. y BENSON C. S., (1998): Assessment of Snow-Cover Mapping Accuracy in a Variety of Vegetation-Cover Densities in Central Alaska, *Remote sensing of Environment*. 66:129–137.

HERNÁNDEZ, A., PÉREZ-CHACÓN, E. y HERNÁNDEZ, L. (2006): Vegetation colonisation processes related to a reduction in sediment supply to the coastal dune field of Maspalomas (Gran Canaria, Canary Islands, Spain). *Journal of Coastal Research*, SI 48: 69-76.

HERNÁNDEZ, A., PÉREZ-CHACÓN, E. y HERNÁNDEZ, L. (2008): Evolución de las poblaciones de *Traganum moquinii* en la playa del Inglés (dunas de Maspalomas, Gran Canaria, islas Canarias): una aproximación mediante sistemas de información geográfica. En, REDONDO, M.M., PALACIOS, M.T., LÓPEZ, F.J., SANTAMARÍA, T. y SÁNCHEZ, D. (Eds.): *Avances en Biogeografía*. Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid, pp. 399-406.

HERNÁNDEZ, L. (2006): *Diagnóstico sobre la evolución del sistema de dunas de Maspalomas (1960-2000)*. Cabildo de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 361 pp.

HERNÁNDEZ, L. y SUÁREZ, C. (2006): Characterization of the contemporary aeolian sediment dynamics of Boa Vista (Cape Verde). *Journal of Coastal Research*, 48: 64-68.

HERNÁNDEZ, L., ALONSO, I., HERNÁNDEZ, E., PÉREZ-CHACÓN, E., YANES, A. y CABRERA, L. (2009): Características propias de los sistemas eólicos actuales de Canarias. Notas preliminares. En, MORALES, J., CANTANO, M., RODRÍGUEZ, A. y DELGADO, I. (Eds.): *Nuevas contribuciones sobre Geomorfología Litoral*. Universidad de Huelva, Sociedad Geológica de España y Sociedad Española de Geomorfología, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 39-43.

HERNÁNDEZ, L., MONTEIRO QUINTANA, M., PÉREZ-CHACÓN E., GARCIA ROMERO L. y SANTANA, A. (2013): Cambios inducidos por actividades antrópicas en los procesos geomorfológicos eólicos de La Graciosa (islas Canarias). Una perspectiva histórica. *GeoTemas*, 14: 115-118.

HESP, P.A. (1988): Morphology, dynamics and internal stratification of some established foredunes in southeast Australia. *Sedimentary Geology*, 55: 17-41

HESP, P.A. (1989): A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes. In: Gimingham, C.H., Ritchie, W., Willetts, B.B., Willis, A.J. (Eds.), *Coastal Sand Dunes*. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, vol. 96B. Roy. Soc. Edinb., Edinburgh, pp. 181-202.

HESP, P.A. (1991): Ecological processes and plant adaptations on coastal dunes. *Journal of Arid Environments* 21: 165- 191.

HESP, P.A. (2002): Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48: 245-268.

HESP, P.A. y MARTÍNEZ, M.L. (2007): Disturbance processes and dynamics in coastal dunes. En, Johnson, E.A. y Miyanishi, K. (Eds.): *Plant Disturbance Ecology: The process and the Response*. Academic Press, San Diego, CA, pp. 215-247.

HORLER, D.N.H., DOCKRAY, M. y BARBER, J. (1983): The red-edge of plant leaf reflectance, *International Journal of Remote Sensing*, 4: 273-288.

HUDAK, A. T., y WESSMAN, C. A. (1998): Textural analysis of historical aerial photography to characterize woody plant encroachment in South African savanna. *Remote Sensing of Environment* ,66: 317-330.

HUNT, E.R., ROCK, B.N. y NOBEL, P.S. (1987): Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22: 429- 435.

HUTCHINSON, C. F., UNRUH, J. D. y BAHRE, C. J. (2000): "Land use vs. climate as causes of vegetation change: a study in SE Arizona", *Global Environmental Change*, 10: 47-55.

IPCC (2001): Climate change 2001. Working groups II: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 6. Coastal Zones and Marine Ecosystems, IPCC.

JACKSON, M.L. y NORDSTROM, K.L. (2011): Aeolian sediment transport and landforms in managed coastal systems: a review. *Aeolian Research*, 3 (2): 181-196.

JACQUEMOUD, S. (1990): A model to clear optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34: 74- 91.

JAUHAINEN, S., HOLOPAINEN, M. y RASINMÄKI, A. (2007): Monitoring peatland vegetation by means of digitized aerial photographs. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22: 168- 177.

JOHANSEN, K., COOPS, N. C., GERGEL, S. E. y STANGE, Y. (2007): "Application of high spatial resolution satellite imagery for riparian and forest ecosystem classification", *Remote Sensing of Environment*, 110, pp. 29-44.

KADMON, R. y HARARI-KREMER, R. (1999): "Studying long-term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs", *Remote Sensing of Environment*, 68: 164-176.

KUTIEL, P., COHEN, O., SHOSHANY, M. y SHUB, M. (2004): Vegetation establishment on the southern Israeli coastal sand dunes between the years 1965 and 1999. *Landscape and Urban Planning*, 67: 141–156.

LAHAV-GINOTT, S., KADMON, R. y GERSANI, M. (2001): Evaluating the viability of *Acacia* populations in the Negev Desert: a remote sensing approach, *Biological Conservation*, 98, 2, pp. 127-137.

LALIBERTE, A. S., RANGO, A., HAVSTAD, K. M., PARIS, J. F., BECK, R. F., MCNEELY, R. y GONZÁLEZ, A. L. (2004): Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico, *Remote Sensing of Environment*, 93, 2: 198-210.

LALIBERTE, A.S., RANGO, A., HERRICK, J.E., FREDRICKSON, ED L. y BURKETT, L. (2007): An object-based image analysis approach for determining fractional cover of senescent and green vegetation with digital plot photography, *Journal of Arid Environments* 69 : 1–14.

LIANG, S. (2004): Quantitative remote sensing for land surface characterization, Hoboken. Nueva Jersey, Wiley.

MARIGNANI, M., ROCCHINI, D., TORRI, D., CHIARUCCI, A. y MACCHERINI, S. (2008): "Planning restoration in a cultural landscape in Italy using an object-based approach and historical analysis", *Landscape and Urban Planning*, 84, 1: 28-37.

MARM (2007): *Manual de restauración de dunas costeras*. Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, Madrid, 240pp.

MARM (2008): Plan nacional de adaptación al cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, Madrid, 22 pp.

MARZOL, M. (1987): *Las precipitaciones en las Islas Canarias*. Secretariado de publicaciones de la Universidad de la Laguna, La Laguna, 220 pp.

MECO, J., BALLESTER, J., BETANCOUT, J.F., CILLEROS, A., SCAILLET, S., GUILLOU, H., CARRACERDO, J.C., LOMOSCHITZ, A., PETIT-MAIRE, N., RAMOS, A.J.C., PERERA, N., y MECO, J.M. (2006): *Paleoclimatología del Neógeno en las islas Canarias*. Ministerio de Medio Ambiente y ULPGC.

MITHTHAPALA, S. (2008): Seagrasses and Sand Dunes. *Coastal Ecosystem Series*. Technical Report (Vol. 3) pp 1-36. Colombo, Sri Lanka: Ecosystems and Livelihoods Group Asia, IUCN.

MORENO, E. J. y GUERRA, J. L. (2004): La gestión del agua en Gran Canaria. Una política hidráulica en condiciones extremas. II Simposium sobre sostenibilidad: recursos hídricos. Zaragoza.

MORGAN, J. L., S. E. GERGEL, y N. C. COOPS. (2010): Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. *BioScience* 60, 47–59.

MOSTACEDO, B. y FREDERICKSEN, T.S. (2000): *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en Ecología vegetal*. Santa Cruz, Bolivia. Pág.14.

MYNENI, R., HALL, F., SELLERS, P. y MARSHAK, A. (1995): The interpretation of spectral vegetation indexes. *Transactions on Geoscience Remote Sensing*. 33: 481–486.

NICHOLLS, R. J. y BRANSON, J. (1998): Coastal Resilience and Planning for an Uncertain Future: An Introduction. *The Geographical Journal* 164, part 3: 255-258.

NORDSTROM, K.F., LAMPE, R., y VANDEMARK, L.M. (2000): Re-establishing naturally functioning dunes on developed coast. *Environmental Management*, 25: 37-51.

NORDSTROM, K., PSUTY, N. y CARTER, B. (1990): *Coastal dunes: Form and processes*. John Wiley and Sons, Chichester, 392 pp.

ORTIZ, J.E., TORRES, T., YANES, Y., CASTILLO, C., DE LA NUEZ, J., IBÁÑEZ, M. y ALONSO, M.R. (2006): Climatic cycles inferred from the aminostratigraphy and aminochronology of Quaternary dunes and palaeosols from the eastern islands of the Canary Archipelago. *Journal of Quaternary Science*, 21: 287-306.

PALMER, A.R. y VAN STADEN, J.M. (1992): Predicting the distribution of plant communities using annual rainfall and elevation: an example from southern Africa. *Journal of Vegetation Science*, 3 (2): 261-266.

PASFOFF, R. (1993): *Côtes en danger*. Practiques de la Géographie, Masson, París, 247 pp.

PÉREZ-CHACÓN, E., HERNÁNDEZ, L., HERNÁNDEZ, A., MÁYER, P., ROMERO, L., ALONSO, I., MANGAS, J., MENÉNDEZ, I., SÁNCHEZ, I., OJEDA, J., RUIZ, P. y ALCÁNTARA, J. (2007): *Maspalomas: claves científicas para el análisis de su problemática ambiental*. Las Palmas de Gran Canaria, 38 pp.

PÉREZ-CHACÓN, E.; HERNÁNDEZ-CALVENTO, L.; FERNÁNDEZ NEGRÍN, E.; ROMERO, L.; MAYER, P.; HERNÁNDEZ CORDERO, A.; CRUZ, N; FERNÁNDEZ CABRERA, E.; PEÑA, C.; CORBALÁN, Y.; MANGAS, J.; ALONSO, I; RODRÍGUEZ, S.; SÁNCHEZ, I. y CABRERA, L. (2010): *Caracterización del sistema sedimentario eólico de La Graciosa (archipiélago Canario)*. Informe final. Centro “Isla de La Graciosa” (OAPN-Ministerio de MAMRM). ULPGC. Inédito. 155 p.

PILLAI, R. B., WEISBERG, P. J. y LINGUA, E. (2005): "Object-oriented classification of repeat aerial photography for quantifying woodland expansion in central Nevada", *20th Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography, and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment, Weslaco, Texas*.

PLATT, R.V., y SCHOENNAGEL, T. (2009): An object-oriented approach to assessing changes in tree cover in the Colorado Front Range 1938–1999. *For. Ecol. Manag.* 258 (7): 1342–1349.

ROBBINS, B. D. (1997): Quantifying temporal change in seagrass areal coverage: The use of GIS and low- resolution aerial photography. *Aquatic Botany* 58:259-267.

SANJAUME, E. y PARDO, J.E. (1991): Dune regeneration on a Previously Destroyed dune field. Devesa del Saler, Valencia. España. *Zeitschrift für Geomorphologie*, SI 81: 125-134.

SHANMUGAM, S y BARNESLEY, M. (2002). Quantifying landscape-ecological succession in a coastal dune system using sequential aerial photography and GIS. *Journal of Coastal Conservation*, 8, 61-68.

SHUPE, S.M. y MARSH, S.E. (2004): Cover- and density-based vegetation classifications of the Sonoran Desert using LANDSAT TM and ERS-1 SAR imagery. *Remote Sensing of Environment* 93: 131–149.

SELLERS, P. (1989): Vegetation – Canopy Spectral reflectance and Biophysical Processes, en *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (Editado por G. Asrar). Nueva York, Wiley: 297-335.

SHOSHANY, M. (2000): Detection and analysis of soil erodibility patterns using air photographs of the Avisur Highlands, Israel. *IAHS* 261: 127–139.

TEJADA, M., NAVAS, F., MALVÁREZ, G. C. y KRUSE, E. (2009): Indicadores espaciales para el estudio de la artificialización y la resiliencia en la costa de Buenos Aires (Argentina). En: Mas-Pla, J., Zuppi, G. M. (Eds.): Gestión ambiental de áreas costeras. Rubes Editorial. Barcelona. 265-278.

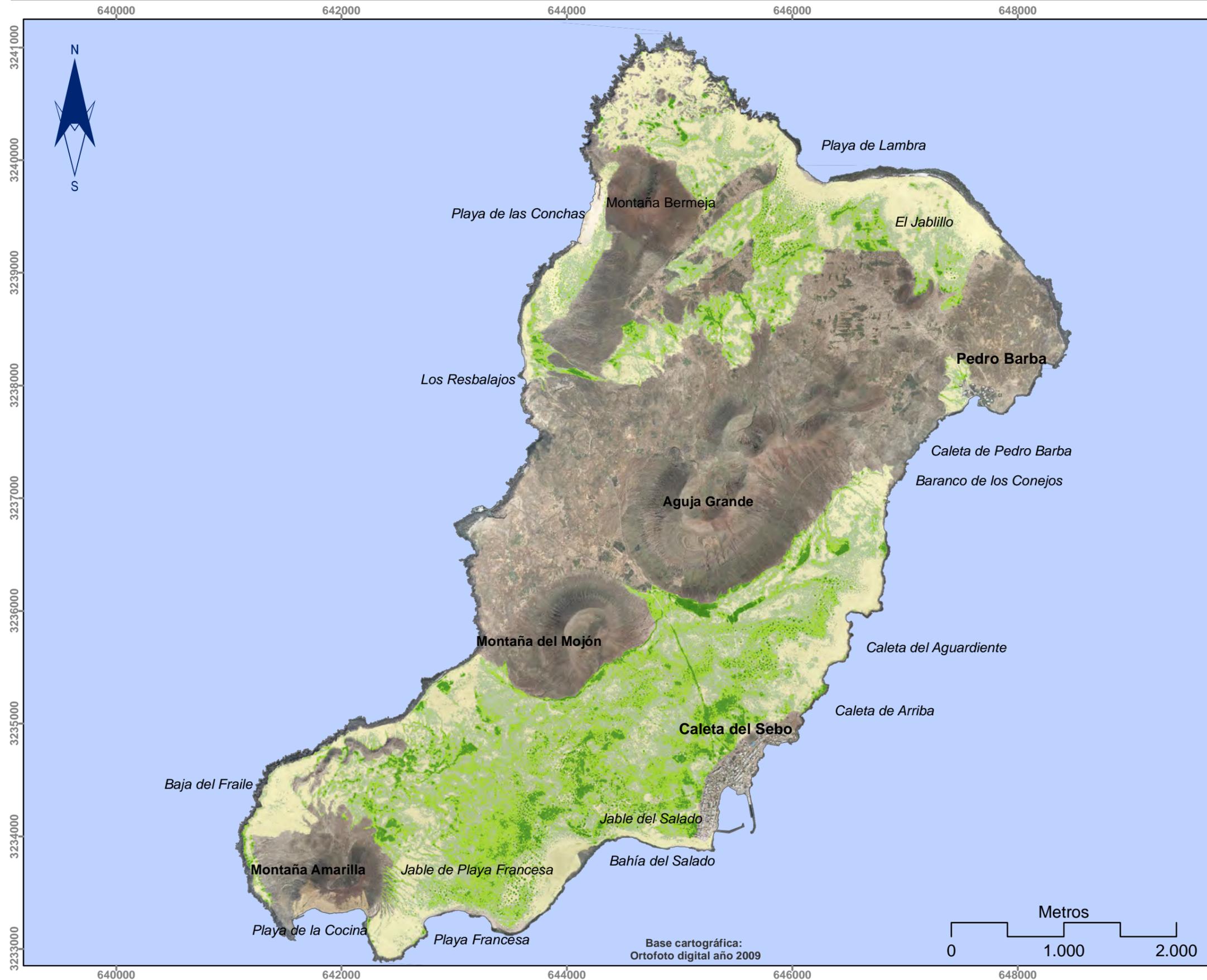
UNDERWOOD, E., USTIN, S., y DIPIETRO, D. (2003): Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of the Environment* 86: 150–61.

WOODCOCK, C. E., COLLINS, J. B., GOPAL, S., JAKABHAZY, V. D., LI, X., MACOMBER, S., RYHERD, S., HARWARD, V. J., LEVITAN, J., WU, Y. y WARBINGTON, R. (1994): Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model, *Remote Sensing of Environment*. 50:240- 254,

ZRIBI, M., HÉGARAT-MASCLE, S., TACONET, O., CIARLETTI, V. y VIDAL-MADJAR, D. (2003): Derivation of wild vegetation cover density in semi-arid regions: ERS2/SAR evaluation. *International Journal of Remote sensing*, 6: 1335–1352.

8. ANEXOS

CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL (LA GRACIOSA)



Leyenda

Tipos de coberturas

- 1 (vegetación escasa)
- 2 (vegetación poco densa)
- 3 (vegetación densa)
- 4 (vegetación muy densa)

ALUMNO

LEVÍ GARCIA ROMERO



FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

MGC



MÁSTER OFICIAL EN GESTIÓN COSTERA
UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Directores
Dña. Emma Pérez-Chacón Espino
D. Luis Hernández Calvento

Mapa
Clasificación de la cobertura vegetal a partir del recubrimiento sobre los sistemas sedimentarios eólicos en la isla de La Graciosa

Mapa 1

1:35.000

Fecha: febrero de 2009

DESARROLLO DEL TFT

Desarrollo del TFT

El trabajo realizado se inserta en una de las líneas de investigación del Grupo de investigación de Geografía Física y Medio Ambiente, relacionada con los sistemas de dunas litorales. Esta línea tiene un doble objetivo: por un lado la caracterización de los procesos naturales que tienen lugar en los sistemas de dunas litorales; por otro, el análisis de las consecuencias que el desarrollo antrópico ha tenido y tiene en la evolución espacio-temporal de estos sistemas. Ambos objetivos han experimentado un importante impulso en los últimos años, a través de diversos proyectos y contratos de investigación, así como a través de la elaboración de trabajos de investigación académica. La difusión de los resultados que se han ido obteniendo se ha realizado tanto en forma de publicaciones científicas, como a través de informes para las administraciones gestoras de estos sistemas, con las que se colabora aportando bases científicas para su correcta gestión, por lo que cabría añadir que la vocación de tales investigaciones es aplicada.

Entre los proyectos de I+D+i competitivos en los que se ha participado, cabe destacar los titulados “Modelización de los procesos naturales y análisis de las consecuencias ambientales inducidas por el turismo en la Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias), (REN2003-05947)”, “Consecuencias ambientales inducidas por el desarrollo turístico en espacios insulares; alteraciones de los procesos naturales en sistemas de dunas litorales de Canarias y Cabo Verde (SEJ2007-64959)” y “ Diagnóstico ambiental de los sistemas de dunas de Canarias para la elaboración de modelos sostenibles de gestión territorial (SCO2010-18150)”, todos ellos financiados por el Plan Nacional de I+D+i. De igual forma se han llevado a cabo otros estudios, desarrollados por medio de contratos de investigación de I+D, financiados por distintas administraciones públicas. Entre ellos cabe reseñar el titulado “Estudio Integral de la playa y dunas de Maspalomas (Gran Canaria)”, desarrollados por las Universidades de Cantabria y Las Palmas de Gran Canaria por encargo de la Dirección General de Costas (del anterior Ministerio de Medio Ambiente) en 2007 (MMA, 2007a); o el titulado “Caracterización del sistema eólico de *La Graciosa* (Archipiélago Canario)”, llevado a cabo por investigadores de la Universidad de las

Palmas de Gran Canaria por encargo del Organismo Autónomo Parques Nacionales (Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino) en 2010 (MARM, 2010).

En el desarrollo de todos estos trabajos de investigación es habitual la implementación de tecnologías de la información geográfica (TIG), especialmente de técnicas de teledetección y de sistemas de la información geográfica (SIG), tanto durante la fase de inventario, como durante la fase de elaboración de distintos modelos o diagnósticos parciales, especialmente los relacionados con la dinámica espacio-temporal. Es en este contexto de investigación en el que se enmarca estas prácticas de empresa, que viene a ampliar los conocimientos que en la actualidad se tienen sobre la naturaleza y la problemática de los sistemas de dunas de las islas Canarias. Para ello se propone la adaptación en los sistemas sedimentarios eólico de La Graciosa, como área piloto, de un procedimiento que nos permita evaluar la cobertura vegetal en sistemas arenosos áridos.

Descripción detallada de las actividades desarrolladas durante la realización del TFT

Durante la realización de este Trabajo Final de Título (TFT), mi lugar de trabajo fue el laboratorio de SIG que pertenece al Departamento de Geografía de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Las actividades realizadas fueron las siguientes:

- Recopilación bibliográfica de los métodos de estudio existentes para el análisis de la cobertura vegetal (Biomasa, volumen, densidad, etc.) utilizando Tecnologías de la Información Geográfica (TIG).
- Procesado y reclasificaciones de ortofotos digitales, producto de un vuelo LiDAR de Febrero de 2009 en la isla de La Graciosa.
- Desarrollo de un método para clasificar la cobertura vegetal según su recubrimiento en los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa
- Aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) para el análisis espacial de la cobertura vegetal en los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa.
- Cartografía de la cobertura vegetal en los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa.

Formación recibida (cursos, programas informáticos, etc.)

En cuanto a la formación, aunque no realicé ningún curso durante mi estancia en el seno del Grupo de Geografía Física y Medio Ambiente, se aprovechó para escribir y presentar dos comunicaciones a congresos nacionales, en concreto al XVI Congreso nacional de Tecnologías de la Información Geográfica y al VIII Congreso Español de Biogeografía. El primero de ellos se realizará en Alicante del 25 al 27 de Junio del presente año, en este caso se presentó la comunicación titulada “PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN, MEDIANTE TIG, DE LA COBERTURA VEGETAL EN SISTEMAS ARENOSOS ÁRIDOS” en la línea del congreso “Teledetección y SIG en los estudios de paisaje y medio ambiente”. El segundo se realizará en Sevilla del 23 al 26 de Septiembre y casualmente en esta edición va dedicada a “Sistemas vegetales y fauna en medios litorales: Avances en su caracterización, dinámica y criterios para la conservación.”, en este caso se presentó la comunicación titulada "CARTOGRAFÍA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA COBERTURA VEGETAL EN SISTEMAS ARENOSOS ÁRIDOS: ANÁLISIS COMPARADO DE MÉTODOS Y EJEMPLO EN LA GRACIOSA (ISLAS CANARIAS, ESPAÑA)". Las presentaciones de ambas comunicaciones han sido aceptadas para su posterior publicación, tanto en las actas de los respectivos congresos, como en alguna revista que hasta la fecha en la que se redactó la presenta memoria no se conocían.

Por lo que a la integración del grupo se refiere, mi visión es bastante buena, ya que desde un primer momento me acogieron como uno más, teniendo la oportunidad de aprender de cada uno de ellos en sus distintas líneas de investigación. También desde la parte del grupo, me ayudaron y se mostraron, en todo momento, abiertos a cualquier duda o problema que yo planteara, y desde mi persona, también me mostré dispuesto a cualquier ayuda hacia ellos. Es por ello que en todo momento trabajamos de forma bastante integrada sin entorpecernos.

Nivel de integración e implicación dentro del departamento y relaciones con el personal.

En estos momentos, el grupo de investigación tiene su sede en el Departamento de Geografía Universidad de Las Palmas de G.C., cuya dirección es C/ Pérez del Toro, nº 1 Las Palmas de Gran Canaria, como correo y teléfono de contacto se ofrece el que pertenece a su director Luis Hernández Calvento. lhernandez@dgeo.ulpgc.es y+34 928 451728.

El equipo humano que forma el grupo de investigación está compuesto por 14 personas. Su director Luis Hernández Calvento, aunque también pertenece Emma Pérez-Chacón, Catedrática en Geografía Física de la ULPGC, y los profesores también de la ULPGC, Pablo Máyer Suárez, Lidia Romero, Emilio Fernández y Francisco Macías. En estos momentos también pertenece el Dr. Antonio Hernández Cordero como contratado Postdoctoral. Por otra parte, Natalia Cruz, Elisabeth Fernández, Carolina Peña y Laura Cabrera forman parte del grupo como investigadoras en proyecto y como investigador asociado, Manuel Viera. Por último, Aarón Santana Cordero es beneficiario de una beca predoctoral y Leví Garcia es técnico de laboratorio y SIG.

Aunque el equipo es bastante variado, como también son las líneas de investigación de cada uno de sus miembros, existe un aspecto en común, en este sentido en mayor o menor medida utilizan sistemas de información geográfica (SIG). En algunos casos se utiliza como herramienta de apoyo y en otros, se trata de la pieza fundamental para modelizar los procesos naturales o antrópicos objeto de estudio. Por todo ello, el grupo dispone de dos laboratorios que pertenecen al Departamento de Geografía, el laboratorio de geografía está equipado para analizar muestras de diversa índole y el laboratorio de SIG, que contiene 12 ordenadores con software específico SIG. Por último, también disponen de diversa cartografía, fotografías aéreas, ortofotos digitales e imágenes hiperespectrales captadas por sensores aerotransportados.

Dado el equipo humano con el que cuenta este grupo de investigación y su correspondiente Currículum, desde un primer momento mis expectativas eran la de aprender mucho de ellos y al mismo tiempo poder aportar algo de mis conocimientos en sistemas de información geográfica. Mi interés por conocer algo sobre los procesos que estudian algunos de sus miembros en los sistemas de dunas litorales era muy alto.

Además, también me interesaba conocer sobre los distintos métodos para analizar e interpretar esos procesos y que para ello utilizan como herramienta los sistemas de información geográfica.

Aspectos positivos y negativos más significativos relacionados con el desarrollo del TFT

En cuanto al trabajo realizado, se ha logrado desarrollar un procedimiento para clasificar la cobertura vegetal según su grado de recubrimiento en sistemas arenosos áridos. Para ello, se ha trabajado con ortofotos digitales y fotografía aéreas históricas, y con el apoyo de los sistemas de información geográfica (SIG), se han podido realizar análisis espaciales de la vegetación en los sistemas sedimentarios eólicos de La Graciosa.

En el procedimiento desarrollado en las prácticas para clasificar la cobertura vegetal en sistemas arenosos árido, se valora el uso del cálculo de densidad de vectores, en vez de la reflectividad medida en niveles digitales (Woodcock et al., 1994; Hall et al., 1998; Underwood et al., 2003; De Lange et al., 2004; Chen et al., 2012). Este recurso sólo está disponible en imágenes procedentes de determinados sensores, que cuentan con bandas en al menos la región del infrarrojo cercano. Estos sensores suponen un coste más elevado que el de las ortofotos digitales o fotografías aéreas. Además, el registro histórico de las fotografías aéreas es más extenso que el de las imágenes de satélite (Morgan *et al.*, 2010), lo que permitiría realizar estudios diacrónicos de la vegetación a partir de un procedimiento automático y, por tanto, de forma más objetiva en periodos temporales de los que no se tienen registros satelitales. Hasta ahora este tipo de clasificación en fotografías aéreas se realizaban a partir de fotointerpretación (Shanmugam y Barnsley, 2002), o clasificaciones automáticas que relacionaban el valor de gris con la densidad sin haber medido esta (Kutiel et al., 2004). Por tanto, también ofrece una alternativa a los procedimientos utilizados hasta ahora, que necesitan información más costosa y de menor registro histórico o métodos de fotointerpretación que conllevan mayor carga de subjetividad (analista, escala, rapidez, etc.).

Valoración personal del aprendizaje conseguido a lo largo del TFT

Se podría decir que la realización del Trabajo Final de Título (TFT), han servido para aumentar mis conocimientos en cuanto a los procesos que se desarrollan en los sistemas dunares, ya que tanto las explicaciones de los miembros del grupo de investigación como la bibliografía que me proporcionaron, sirvieron sobre todo, para entender el papel que aporta la cobertura vegetal a estos sistemas, ya que la vegetación participa de forma activa en la captación de sedimentos (Hesp, 1991) formando sistemas dunares. A partir de ahí, se consiguió que mis prácticas estuvieran relacionando en todo momento los sistemas dunares y la cobertura vegetal, utilizando para ello las tecnologías de la información geográfica (TIG).