

# Tesis doctoral



**MODELIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA DE  
LA DUNA DE VALDEVAQUEROS (T.M. TARIFA) MEDIANTE  
LA APLICACIÓN DE FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES  
A CORTO, MEDIO Y LARGO PLAZO**



**Marina Navarro Pons**

**Cádiz, 2011**



UNIVERSIDAD DE CÁDIZ  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y AMBIENTALES

## **TESIS DOCTORAL**

**MODELIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA  
DE LA DUNA DE VALDEVAQUEROS (T.M. TARIFA)  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE FUNCIONES EMPÍRICAS  
ORTOGONALES A CORTO, MEDIO Y LARGO PLAZO**

**Marina Navarro Pons**

**Cádiz, 2011**





**MODELIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA  
DE LA DUNA DE VALDEVAQUEROS (T.M. TARIFA)  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE FUNCIONES EMPÍRICAS  
ORTOGONALES A CORTO, MEDIO Y LARGO PLAZO**

Memoria presentada por Dña. Marina Navarro Pons para optar al Grado de Doctora por  
la Universidad de Cádiz.

Fdo. Dña. Marina Navarro Pons

El Director de la tesis:

Fdo. Dr. D. Juan José Muñoz Pérez

Profesor del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Cádiz







D. JUAN JOSÉ MUÑOZ PÉREZ, Profesor del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Cádiz,

HACE CONSTAR:

Que esta memoria, titulada **“Modelización de la evolución morfodinámica de la duna de Valdevaqueros (T.M. Tarifa) mediante la aplicación de Funciones Empíricas Ortogonales a corto, medio y largo plazo”** y presentada por Dña. Marina Navarro Pons, resume su trabajo de Tesis Doctoral, habiendo sido dirigida por mi persona. Considerando que reúne todos los requisitos legales, autorizo su presentación y defensa para optar al grado de Doctor en Ciencias del Mar por la Universidad de Cádiz.

Cádiz, Abril de 2011

Fdo. Dr. D. Juan José Muñoz Pérez



## AGRADECIMIENTOS

Aunque es cierto que la elaboración de una tesis es un trabajo a menudo muy solitario, no podría desarrollarse sin la contribución de muchas personas como profesores, familiares, amigos o compañeros.

En primer lugar, quisiera agradecer al Director de esta tesis, el profesor Juan José Muñoz Pérez, el haber sabido dirigir este trabajo favoreciendo mi desarrollo como investigadora de forma continua a lo largo de estos años de esfuerzo. Agradecerle también, su paciencia y confianza desde que me ofreció la oportunidad de empezar a investigar la duna de Valdevaqueros en 2004, faceta que demuestra diariamente a todos sus compañeros, en el entorno universitario y como Jefe de la Demarcación de Costas, sacrificando muchos de sus escasos ratos libres para dedicarlos a que este trabajo pudiera llegar a buen puerto.

Gracias a mis padres y a mi hermano por seguir mis pasos día a día a pesar de la distancia, preocupándose de que alcanzara lo que me proponía. Ahora sí, puedo responder a la tan frecuente pregunta: *“¿¿¿Pero cuándo acabas la tesis???”*

Por supuesto a Jorge, por ser mi compañero y aliado incondicional durante todos estos años de continuo sacrificio, en esta prueba de superación tanto personal como profesional. Sabes que sin tu apoyo físico y moral no hubiera sido posible... Gracias por tu ayuda y fortaleza.

A mi cuñado, César y a Gabriel, por haberme ayudado cuando lo he necesitado en la toma de datos de campo, bajo el insaciable azote del arenoso levante (y también doloroso)...

A mis compañeras de despacho, Isa y Jeanette por compartir momentos melancólicos y ratos divertidos, por ofrecerme su confianza y ser mis aliadas contra el abatimiento. A Irene, uno de los mejores fichajes del departamento en este 2011, por sus buenos y sabios consejos, de los cuales siempre estaré agradecida. A Virtudes, por su complicidad en esos cafelitos de desconexión a media mañana, por su capacidad administrativa y su ayuda profesional en la redacción de artículos en inglés. Gracias por tu amistad.

A mis amigas, Sonia, María, Tania, Silvia, Elena, Núria, Carme y Estrella, que aunque estemos dispersas, me habéis servido de referencia para no quedarme atrás.

A mis compañeros del departamento, por echarme una mano cuando lo he necesitado, por esas charlitas en el pasillo y esos chistes matutinos que te alegran el día.

A los profesores Javier Gracia y Giorgio Anfuso, por haberme acercado al mundillo del litoral y por todos los años y experiencias que compartimos cuando formé parte de su equipo como colaboradora.

A nuestros compañeros de la Demarcación de Costas, a todos y cada uno de ellos, por haberme hecho sentir una más y por tantos momentos buenos que hemos compartido desde que empecé las prácticas allí hace ya 8 años. A Gregorio por su experiencia y aportación de ideas interesantes para la elaboración esta memoria y por darme la oportunidad de impartir clase en su Curso de Introducción a la Ingeniería de Costas y Puertos. Gracias especialmente a D. Lorenzo por ilustrarme con su compromiso y dilatada experiencia en la gestión y restauración de las dunas de Valdevaqueros y Bolonia.

Al profesor Juan Manuel Barragán, Jose Luis Reyes y en particular a Juan Manuel Abarca por compartir sus ideas y ofrecerme siempre una visión integrada de las áreas litorales. A la profesora Ana Macías por su inestimable ayuda en el arduo y difícil proceso administrativo para acceder al tercer ciclo y poder realizar esta tesis.

A la profesora Inma Rodríguez y a M<sup>a</sup> José e Isa por motivarme en el manejo del GPS diferencial y darme la oportunidad de colaborar en sus proyectos de investigación de las dunas del Fangar en el delta del Ebro.

Al profesor Haim Tsoar, de la Universidad de Ben-Gurion (Israel) por su inestimable aportación en el cálculo de índices de actividad dunar y su disponibilidad frente a cualquier duda que me surgiera.

A Carlos Ley por compartir sus conocimientos sobre vegetación dunar y sus experiencias en sistemas de restauración ecológica en la duna de Valdevaqueros.

Al profesor Carlos Velasco de la UNED por alentarme con su visión y experiencia a la consecución de esta tesis.

A Jesús Tovar de la biblioteca del campus, por proporcionarme siempre el mejor apoyo técnico en mis búsquedas bibliográficas.

Finalmente, quisiera dedicar unas palabras en memoria de Alejo de la Torre, gran amigo, que aunque ya no se encuentra entre nosotros, siempre lo recordaremos, no sólo por su ayuda en la obtención de gran parte de los datos utilizados para la elaboración de esta tesis, sino también por haber facilitado los primeros momentos de trabajo de campo con su carisma, haciéndolos más llevaderos y agradables.

Mi más sincero agradecimiento a todos ellos, y a tantos otros, que aunque no haya mencionado directamente en estas líneas, han formado parte de mis vivencias y experiencias, condicionando de algún modo el que yo haya llegado hasta aquí. Gracias.



*A mis padres*





# ÍNDICE DE CONTENIDOS

ABSTRACT .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABLAS .....	XV
ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL.....	XVII
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1. Visión interdisciplinar de las dunas costeras, importancia y conservación.....	3
1.2. Hipótesis planteadas .....	9
1.3. Objetivos de la tesis.....	10
<b>CAPÍTULO 2. TÉCNICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE SISTEMAS DUNARES. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>13</b>
2.1. Estudio de la actividad dunar a nivel mundial.....	15
2.1.1. Estudio de sistemas dunares estabilizados.....	15
2.1.2. Estudio de sistemas dunares móviles .....	17
2.2. Principales sistemas dunares costeros .....	18
2.2.1. Dunas crecientes o transversales .....	20
2.3. Tecnologías existentes aplicadas al estudio del comportamiento dunar .....	23
<b>CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ALTERNATIVAS PLANTEADAS.....</b>	<b>27</b>
3.1. Descripción de la zona de estudio .....	29
3.1.1. Localización.....	29
3.1.2. Clima atmosférico y marítimo.....	30
3.1.3. Unidades geomorfológicas .....	32
3.2. La duna activa de Valdevaqueros.....	43
3.2.1. Antecedentes históricos .....	48
3.2.2. Diagnóstico y alternativas planteadas.....	71

<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA APLICADA AL SISTEMA DUNAR DE VALDEVAQUEROS .....</b>	<b>77</b>
4.1. Metodología de la toma de datos de campo .....	77
4.1.1. Levantamientos topográficos mediante GPS Diferencial.....	77
4.1.1.1. Estimación de la precisión en la utilización de GPSD. ....	81
4.1.2. Determinación de las características granulométricas del sedimento .....	81
4.1.3. Determinación del transporte sedimentario in situ .....	83
4.1.4. Recopilación de datos meteorológicos .....	83
4.2. Las Funciones Empíricas Ortogonales. Aplicaciones en el ámbito costero .....	85
4.3. Aplicación de las Funciones Empíricas Ortogonales en el ámbito dunar .....	90
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MORFODINÁMICO DEL SISTEMA DUNAR DE VALDEVAQUEROS A DISTINTOS PLAZOS.....</b>	<b>93</b>
5.1. Escalas temporales comprendidas en el estudio .....	93
5.2. Largo plazo (años) .....	93
5.2.1. Introducción.....	93
5.2.2. Obtención del perfil sin tratamiento estadístico .....	94
5.2.3. Obtención de las componentes espaciales y temporales del perfil a largo plazo mediante la aplicación de las EOFs .....	96
5.2.4. Obtención del perfil reconstruido .....	97
5.2.4.1. Reconstrucción del perfil medio.....	98
5.2.4.2. Reconstrucción de la 2ª componente .....	100
5.2.4.3. Reconstrucción de la 3ª componente .....	100
5.2.4.4. Reconstrucción de la 4ª componente .....	101
5.2.4.5. Obtención de características morfodinámicas del perfil.....	105
5.2.4.6. Obtención de variaciones y tasas volumétricas del perfil.....	107
5.3. Medio plazo (meses).....	110
5.3.1. Introducción.....	110
5.3.2. Obtención del perfil sin tratamiento estadístico .....	111
5.3.3. Obtención de las componentes espaciales y temporales del perfil a medio plazo mediante la aplicación de las EOFs .....	113
5.3.3.1. Reconstrucción del perfil medio mensual (May-Dic 2006) .....	113
5.3.3.2. Reconstrucción de la 2ª componente (May- Dic 2006).....	113

5.3.3.3. Reconstrucción del perfil medio bimensual (Sep 2008-Ago 2009) .....	114
5.3.3.4. Reconstrucción de la 2ª componente (Sep 2008-Ago 2009) .....	117
5.4. Corto plazo (días) .....	117
5.4.1. Introducción .....	117
5.4.2. Obtención del perfil sin tratamiento estadístico .....	118
5.4.3. Obtención de las componentes espaciales y temporales del perfil a corto plazo mediante la aplicación de las EOFs .....	119
5.4.3.1. Reconstrucción del perfil medio .....	119
5.4.3.2. Reconstrucción de la 2ª componente .....	122
5.5. Muy corto plazo (horas) .....	123
5.5.1. Introducción .....	123
5.5.2. Evolución del perfil a muy corto plazo .....	124
5.5.2.1. Análisis de la evolución general del perfil .....	124
5.5.2.2. Análisis específico del desplazamiento del perfil .....	126
5.6. Análisis comparativo de los resultados a distintos plazos .....	130
5.6.1. Comparación de las pendientes del perfil a diferentes plazos .....	130
5.6.2. Comparación de las tasas de transporte del perfil a diferentes plazos .....	134

**CAPÍTULO 6. ANÁLISIS METEOROLÓGICO, CÁLCULO DE ÍNDICES DE ACTIVIDAD DUNAR Y TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS ..... 139**

6.1. Análisis meteorológico .....	139
6.1.1. Viento .....	139
6.1.1. Humedad .....	146
6.1.2. Precipitación .....	148
6.1.3. Temperatura .....	150
6.2. Índices de actividad dunar .....	152
6.2.1. Transporte teórico de sedimentos .....	152
6.2.1.1. Concepto de velocidad umbral y tasa de transporte de sedimentos .....	152
6.2.1.2. Cálculo del transporte teórico mediante los modelos clásicos .....	157
6.2.1.3. Transporte eólico potencial: El método de Fryberger .....	162
6.2.2. Transporte real de sedimentos .....	169
6.2.2.1. Cálculo del transporte real a partir de cambios volumétricos del perfil .....	169
6.2.2.2. Medición in situ del transporte real mediante trampa de arena .....	172

<b>CAPÍTULO 7. RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>181</b>
7.1. Resumen de resultados .....	181
7.1.1. Evolución a largo plazo .....	182
7.1.2. Evolución a medio plazo .....	183
7.1.3. Evolución a corto plazo .....	184
7.1.4. Evolución a muy corto plazo .....	184
7.2. Conclusiones.....	185
7.3. Nuevas líneas de investigación.....	188
<b>ANEXOS.....</b>	<b>191</b>
ANEXO I. DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MÉTODO DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES .....	193
ANEXO II. APLICACIÓN DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES AL ANÁLISIS DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS DE PERFILES DUNARES. RECONSTRUCCIÓN DE LAS EOF.....	199
ANEXO III. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SISTEMA PLAYA-DUNA DE VALDEVAQUEROS .....	205
ANEXO IV. DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO DEL TRANSPORTE EÓLICO POTENCIAL DE SEDIMENTOS: EL MÉTODO DE FRYBERGER ...	213
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>217</b>

## ABSTRACT

Extreme wind conditions generated near the Strait of Gibraltar (SW Spain) have given rise to the transgressive Valdevaqueros dunefield. The dune advance has resulted in gradual invasion of the adjacent road and ecosystem. Despite restoration and control activities performed within the last decades, strong east winds have favoured dune destabilisation. The current work focuses on analyzing the dune profile evolution in the long term (years), medium term (months), short term (days) and very short term (hours). Topographic data, which were collected with a total station and a differential GPS from 1995 to 2009, were interpreted from reconstructed Empirical Orthogonal Functions (EOF). This method provides an objective way to identify the mean dune profile and therefore, to recognize morphodynamic dune changes and tendencies.

Wind, humidity, rain and temperature effects on the dune behaviour were analysed from the Tarifa meteorological station. Furthermore, a sand trap was placed on three different dune profile areas during 30 min, obtaining that the sand transport at the crest was twice the amount of the sand collected at the windward and near six times greater than the sand measured at the dune foot.

Sand transport rates of  $140 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ,  $25.5\text{--}36.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ month}^{-1}$ ,  $22.52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ day}^{-1}$  and  $0.93 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ h}^{-1}$  were measured for the long-term, medium-term, short-term and very short-term periods, respectively. During an eleven-year period, the average migration rate was found to be of  $17.5 \text{ m year}^{-1}$ , although the very short term monitoring under a severe easterly sandstorm demonstrated that the dune brink was able to experience an advance of 1.75 m in only 24 h. These values were compared with the theoretical sand transport rate for Valdevaqueros dune, based on the classic Bagnold's equation as well as other more recent formulae, to obtain a ratio between the real and the theoretical rates for each study period. These results together with the sand drift potential following the Fryberger's method (up to 10,000 vector units) demonstrate that Valdevaqueros is a dunefield with one of the highest sand transport capacities in Europe.

*Keywords:* Dune mobility; DGPS levellings; transport rates; EOF method; profile evolution; sand drift potential; meteorological conditions.



## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Esquema de la naturaleza interdisciplinar del estudio de las dunas (Fuente: Pye y Tsoar, 1990). .....	3
Fig. 2.1. Tipos de dunas costeras: a) barjanes, b) dunas transversas, c) dunas parabólicas, d) dunas longitudinales o en seif.....	19
Fig. 2.2. Relación entre las formas dunares, la efectividad de la cobertura vegetal, el aporte de arena disponible por el viento y la fuerza del viento (Fuente: Hack, Geographical Review, 1941).....	19
Fig. 2.3. Desarrollo y migración de una duna barjana (Fuente: Consejería de Medio Ambiente; <a href="http://www.juntadeandalucia.es">www.juntadeandalucia.es</a> ).....	21
Fig. 2.4. Esquema de duna parabólica (Fuente: Consejería de Medio Ambiente; <a href="http://www.juntadeandalucia.es">www.juntadeandalucia.es</a> ) .....	22
Fig. 2.5. a) Duna de Pilat (Francia); b) Duna de Rubjerg Knude (norte de Dinamarca)	22
Fig. 3.1. Localización del área de estudio .....	30
Fig. 3.2. Rosa de vientos desde 1956 hasta 2006 para Tarifa (Fuente: MARM, 2008) .	31
Fig. 3.3. Rosa de oleaje para 2009 en el punto WANA 1057044, situado en el Estrecho de Gibraltar (Fuente: Puertos del Estado; <a href="http://www.puertos.es">www.puertos.es</a> ) .....	31
Fig. 3.4. Mapa físico de la zona de estudio .....	33
Fig. 3.5. Esquema del escalonamiento del litoral de Cádiz producido por series de fallas transversales (Fuente: Román Sierra et al., 2004).....	33
Fig. 3.6. Esquema litológico del litoral gaditano (Fuente: Del Río y Gracia, 2007).....	35
Fig. 3.7. Esquema de las unidades ambientales e infraestructuras existentes en la Ensenada de Valdevaqueros (Fuente: Plan de Gestión y Conservación de los hábitats dunares del litoral de Cádiz; Gallego Fernández et al., 2006).....	36
Fig. 3.8. Playa de Valdevaqueros; a) Comunicación de la laguna costera con el mar; b) Usos habituales de la playa a parte del baño: paseos a caballo y kitesurfing....	37
Fig. 3.9. Frente dunar activo de la zona central (a) y suroeste (b) .....	38
Fig. 3.10. Perspectiva de la duna transgresiva activa desde la playa. ....	39
Fig. 3.11. Duna secundaria con retama monosperma.....	39
Fig. 3.12. Áreas de deflación y afloramiento del sustrato margoso .....	40
Fig. 3.13. a) Enebral en la zona suroccidental de la ensenada; b) Retamar y pinar tras la duna activa.....	41



Fig. 3.14. Fotografías oblicuas de la desembocadura del Río Valle y flecha litoral en la playa de Valdevaqueros, tras un periodo de lluvias (Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, MARM; <a href="http://www.marm.es">www.marm.es</a> ) .....	42
Fig. 3.15. Sección transversal de una duna creciente (Fuente: Ley et al. 2007) .....	43
Fig. 3.16. Diferentes perspectivas del sistema dunar de Bolonia, en 2003. ....	44
Fig. 3.17. Diferentes perspectivas del sistema dunar de Valdevaqueros, en 2003.....	45
Fig. 3.18. Fotografía aérea de la Duna de Valdevaqueros, donde se aprecia la invasión de la duna sobre la carretera en la actualidad (Fuente: Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico, 2010). ....	46
Fig. 3.19. Red de Espacios Naturales Protegidos del litoral de Tarifa y Algeciras. En color verde se muestra el área perteneciente al ámbito de aplicación del Plan de Ordenación de Recursos Naturales (PORN), la zona anaranjada corresponde al Paraje Natural de la Playa de los Lances, la zona amarilla es el Monumento Natural de la Duna de Bolonia y el área mallada en azul marino abarca el Parque Natural de los Alcornocales (Fuente: Consejería de Medio Ambiente; <a href="http://www.juntadeandalucia.es">www.juntadeandalucia.es</a> ) .....	46
Fig. 3.20. Esquema del avance de la duna de Valdevaqueros desde 1989 a 2006 (Fuente: Plan de Gestión y Conservación de los hábitats dunares del litoral de Cádiz, Dep. Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla, 2006). ....	47
Fig. 3.21. Unidades geomorfológicas de la zona de estudio (fotografía: vuelo americano 1956). (Fuente: Navarro et al., 2011) .....	48
Fig. 3.22. Estructuras de hormigón colocadas a mediados del s. XX (Fuente: Román-Sierra et al., 2004) .....	49
Fig. 3.23. Fotografía oblicua del ecosistema dunar y su entorno en 1992 (Fuente: Dirección General de Costas).....	51
Fig. 3.24. Fotografía aérea reciente de la duna con los sistemas de captación.....	51
Fig. 3.25. Instalación de sistemas de protección .....	53
Fig. 3.26. Detalle del tallo y rizoma de una plántula de barrón ( <i>Ammophila arenaria</i> )	54
Fig. 3.27. Instalación de captadores de mimbre seco. ....	55
Fig. 3.28. Colocación de tablestacas de madera .....	55
Fig. 3.29. Distintos tipos de captadores en la Duna de Valdevaqueros (año 2006) .....	56
Fig. 3.30. Plantaciones de barrón en la duna de Valdevaqueros. Apertura de hoyos y colocación de la planta .....	58
Fig. 3.31. Estado de las plantaciones de barrón a los 2 años.....	59

Fig. 3.32. Estado de las plantaciones de barrón a los 3 años.....	59
Fig. 3.33. Esquema de la ubicación de plantaciones en la zona baja de la duna, en 2006 (Fuente: Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente).....	62
Fig. 3.34. Estado actual de los sistemas de captación en el pie de duna en Abril 2010 (Fuente: Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico) .....	62
Fig. 3.35. Trabajos de restauración y estabilización realizados en la duna de Valdevaqueros durante los últimos años: a) Estado de la duna antes de las intervenciones; b) Retirada de arenas; c) Remodelación fisiográfica; d) Colocación de tablestacado; e) Plantación de barrón; f) Sistemas de protección y vallado .....	66
Fig. 3.36. Cara de avalancha de la duna sobre el pinar adyacente .....	67
Fig. 3.37. Evolución de la duna de Valdevaqueros desde 1956 a la actualidad (Fuente: Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico, MARM).....	70
Fig. 3.38. Alternativa I: Elevación de la carretera existente.....	72
Fig. 3.39. Alternativa II: Creación de un falso túnel .....	73
Fig. 3.40. Alternativa III: Utilización de una nueva carretera.....	73
Fig. 4.1. Perfiles topografiados en la duna de Valdevaqueros .....	78
Fig. 4.2. Estacionamiento de dos tipos de GPSD en un punto determinado del aparcamiento de la playa de Valdevaqueros, durante diferentes campañas; a) Thales; b) Leica 1.200 .....	79
Fig. 4.3. Varias imágenes de diferentes campañas de tomas de datos: a) Topografía en dunas primarias; b) Topografía en la cresta dunar; c y e) Topografía en las caras de sotavento; d) Instalación de la trampa de arena; f) Recogida de muestra de sedimento en la cara de avalancha .....	80
Fig. 4.4. Esquema de un perfil transversal de la duna .....	82
Fig. 4.5. a) Vista general de la ubicación de las estaciones meteorológicas en Tarifa; b) Antigua estación situada en el Castillo de Santa Catalina (anterior a diciembre de 1999); c) Estación de Vigilancia del Estrecho (posterior a febrero de 2000)	84
Fig. 4.6. Esquema con $N+1$ perfiles transversales de playa ( $P_0, P_1, P_2...P_N$ ), con un espaciado $\delta$ entre perfiles. Las áreas entre diferentes batimetrías vienen definidas por $S_0, S_1, S_2...S_N$ . $LLWL$ hace referencia a la bajamar viva equinoccial, $z$ la altura de la berma y $h^*$ la profundidad de cierre. ....	87
Fig. 5.1. Representación del perfil 1 durante un periodo de 11 años sin tratamiento estadístico. ....	95

Fig. 5.2. Representación de las 4 primeras componentes transversales para el perfil 1.	96
Fig. 5.3. Representación de las 4 primeras componentes temporales para el perfil 1....	96
Fig. 5.4. Representación de la 1ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 96,17%.....	99
Fig. 5.5. Representación de la 2ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 3.25%.....	102
Fig. 5.6. Representación de la suma de la 1ª y la 2ª componentes reconstruidas para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 99.42%.....	102
Fig. 5.7. Representación de la 3ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 0,36%.....	103
Fig. 5.8. Representación de la suma de la 1ª, 2ª y 3ª componentes reconstruidas para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 99,78%.....	103
Fig. 5.9. Representación de la 4ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 0,15%.....	104
Fig. 5.10. Representación de la suma de la 1ª, 2ª, 3ª y 4ª componentes reconstruidas para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 99,93%.....	104
Fig. 5.11. Tasas de avance del perfil dunar durante el periodo 1956-2006 (Fuente: Navarro et al., 2007).....	105
Fig. 5.12. Representación de la evolución del perfil dunar sin tratamiento estadístico durante el seguimiento mensual de Mayo a Diciembre de 2006.....	112
Fig. 5.13. Representación de la evolución del perfil dunar sin tratamiento estadístico durante el seguimiento bimensual de Septiembre de 2008 a Agosto 2009.....	112
Fig. 5.14. Representación de la reconstrucción del perfil dunar durante el seguimiento mensual (Mayo-Diciembre 2006). La 1ª y 2ª componente se muestran con una línea continua y discontinua, respectivamente. Las letras A, B y C identifican las distintas caras de sotavento del perfil. ....	115
Fig. 5.15. Representación de la reconstrucción del perfil dunar durante el seguimiento bimensual (Septiembre 2008-Agosto 2009). La 1ª y 2ª componente se muestran con una línea continua y discontinua, respectivamente.....	116
Fig. 5.16. Representación de la evolución del perfil dunar a corto plazo (5-22 Julio de 2006) sin tratamiento estadístico. La campaña fue realizada durante una quincena bajo fuertes vientos de levante.....	119
Fig. 5.17. Representación de la reconstrucción del perfil dunar durante el seguimiento a corto plazo La 1ª y 2ª componente se muestran con una línea continua y	

discontinua, respectivamente. Las letras A, B y C identifican las distintas caras de sotavento del perfil .....	121
Fig. 5.18. Vista aérea de la situación de la duna en 2006, donde se aprecia que la arena ya traspasó la línea de la carretera. La instalación de tablestacas se realizó entre 2005 y 2006 .....	122
Fig. 5.19. Representación de la evolución del perfil dunar a muy corto plazo (14-15 Agosto 2009) sin tratamiento estadístico. La campaña fue realizada durante 24 h bajo fuertes vientos de levante. ....	125
Fig. 5.20. Fotografía de la cara de avalancha con mayor pendiente del perfil durante la toma de datos de muy corto plazo (14-15 Agosto de 2009).....	125
Fig. 5.21. Desplazamiento horizontal en las principales zonas del perfil dunar durante el seguimiento de 24h (véase Fig. 4.4 para la identificación de las zonas).....	127
Fig. 5.22. Avance del borde de la cresta dunar tras la colocación de la estaca de madera: a) Transcurridas unas 2 horas; b) Transcurridas 10 horas.....	128
Fig. 5.23. Desplazamiento vertical en las principales zonas del perfil dunar durante el seguimiento de 24h (véase Fig. 4.4 para la identificación de las zonas).....	129
Fig. 5.24. Esquema de la localización de caras de sotavento presentes en el perfil.....	130
Fig. 5.25. Varias imágenes de la evolución de la cara de avalancha del perfil a largo plazo: .....	131
Fig. 5.26. Varias imágenes de la evolución de la cara de avalancha del perfil a medio plazo: a) Julio 2006; b) Septiembre 2006; c) Octubre 2006; d) Noviembre 2006; e) Diciembre 2006; f) Mayo 2007 .....	132
Fig. 6.1. Rosa de frecuencias de la dirección de vientos para la Estación Meteorológica de Tarifa, en primavera, invierno, otoño y verano de 1988 (Fuente: Palomares Losada, 2002). ....	141
Fig. 6.2. Rosa de vientos para todo el periodo estudiado, comprendido entre 1995 y 2009.....	142
Fig. 6.3. Rosas de viento obtenidas para los periodos estudiados: a) Medio plazo mensual (May-Dic06; b) Medio plazo bimensual (Sep08-Ago09); c) Corto plazo (5-22 Jul06); d) Muy corto plazo (14-15 Ago09).....	145
Fig. 6.4. Histograma de humedad relativa media por años desde 1995 a 1999. ....	147
Fig. 6.5. Histograma de valores normales de humedad relativa media por meses, desde 1972 a 1999 (Fuente: AEMET; www.aemet.es). ....	147
Fig. 6.6. Histograma de precipitación total para la Estación de Tarifa (1995-2005) ...	149

Fig. 6.7. Histograma de precipitación mensual media para la Estación de Tarifa de 1995 a 2005. ....	149
Fig. 6.8. Representación de la temperatura media, máxima y mínima para la estación meteorológica de Tarifa de 1995 a 2010. Los espacios en blanco corresponden a la falta de datos registrados. ....	151
Fig. 6.9. Representación de la temperatura media, máxima y mínima para la estación meteorológica de Tarifa durante un ciclo anual (Septiembre 2008-Agosto 2009). Los espacios en blanco corresponden a la falta de datos registrados... ..	151
Fig. 6.10. Perfil vertical de velocidad del viento alrededor de la capa límite. ....	152
Fig. 6.11. Relación entre la velocidad de fricción y la velocidad del viento a una altura de 2 metros, basada en datos de diferentes partes del mundo (Fuente: Pye y Tsoar, 1990). ....	153
Fig. 6.12. Curvas de velocidad de fricción umbral ( $u_{*t}$ ) en función del tamaño de granos de cuarzo (d) según diferentes autores. A diferencia de la de Bagnold (1941), la fórmula de Chepil (1951) contempla un diámetro equivalente de un sólido que contiene una mezcla de diferentes fracciones de tamaño, mientras que la curva de Irvensen y White (1982) tiene en cuenta las variaciones en el número de Reynolds y las fuerzas cohesivas (Fuente: Pye y Tsoar, 1990). ....	156
Fig. 6.13. Histograma de velocidades de viento medias registradas durante los días de la campaña de corto plazo (5-22 Julio 2006). ....	161
Fig. 6.14. Histograma de velocidades de viento medias horarias registradas durante la campaña de muy corto plazo (14-15 Agosto 2009). ....	161
Fig. 6.15. La curva de histéresis relaciona los cambios en la fuerza del viento y la cobertura vegetal. De forma natural, la cobertura vegetal disminuye cuanto mayor es la fuerza del viento. Con fuerzas de viento intermedias, las dunas pueden tener distintos porcentajes de cobertura vegetal en función de la gestión que se establezca en el ecosistema: la estabilización mediante plantación hará aumentar la cobertura vegetal y su eliminación implicará lo contrario, favoreciendo la activación dunar. (Fuente: Tsoar, 2005). ....	164
Fig. 6.16. Rosa de transporte eólico potencial para la duna de Valdevaqueros (1963-1992) en unidades vector. La flecha roja muestra la tendencia neta del vector de potencial de deriva ( $RDP$ ) en la dirección de deriva resultante ( $RDD$ ), que es prácticamente de este a oeste. (Fuente: Navarro et al. 2011). ....	166

Fig. 6.17. Imágenes de varios sistemas dunares costeros del mundo (véase Tabla 6.6): a) Ashdod (Israel); b) Ijmuiden (Holanda); c) Parque Nacional de Slowinski (Polonia); d) Alexandria (Sudáfrica); e y f) Ceará, Acarau (Brasil); g) Chachalacas, Veracruz (México); h) Florence, Oregón (EEUU).....	168
Fig. 6.18. Relación entre la tasa de transporte sedimentario teórica y la real para cada periodo de estudio de la duna: a) Distribución con escala lineal en el eje X; b) Distribución con escala semi-logarítmica en el eje X.....	171
Fig. 6.19. Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en el pie de duna durante 30 minutos. ....	174
Fig. 6.20. Tamaño medio ( $D_{50}$ ) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en el pie de duna.....	174
Fig. 6.21. Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en la cara de barlovento durante 30 minutos.....	175
Fig. 6.22. Tamaño medio ( $D_{50}$ ) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en la cara de barlovento.....	175
Fig. 6.23. Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en la cresta dunar durante 30 minutos. ....	176
Fig. 6.24. Tamaño medio ( $D_{50}$ ) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en la cara de barlovento.....	176
Fig. A-II. 1. Cabecera del fichero input para la aplicación del programa 3PCA .....	199
Fig. A-II.2. Ejecución del programa 3PCA.....	200
Fig. A-II.3. Cabecera del fichero de salida o output del programa 3PCA. ....	200
Fig. A-II.4. Matriz principal del fichero output, con la contribución de cada componente a la varianza total y la <i>bartussek scaled</i> . ....	201
Fig. A-II.5. Extracción de las matrices de covarianza para la reconstrucción de los perfiles.....	202
Fig. A-II.6. Extracción de la 1ª componente aislada reconstruida mediante el programa RECONST.....	202
Fig. A-II.7. Extracción de la 2ª componente aislada reconstruida mediante el programa RECONST.....	203
Fig. A-II.8. Extracción de la 3ª componente aislada reconstruida mediante el programa RECONST.....	203
Fig. A-III.1. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Playa Media o Intermareal .....	206

Fig. A-III.2 .Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Playa Alta o Supramareal.....	207
Fig. A-III.3. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Pie de Duna .	208
Fig. A-III.4. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Barlovento...	209
Fig. A-III.5. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de la Cresta .....	210
Fig. A-III.6. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Sotavento ....	211
Fig. A-III.7. Resultados del análisis granulométrico para la Muestra Compuesta del perfil .....	212
Fig. A-IV.1. Rosa de los vientos .....	213

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Precios finales por unidad de obra en un proyecto de restauración .....	63
Tabla 3.2. Volúmenes extraídos de arena de la duna de Valdevaqueros para el periodo 1991-2009. Los cuadros coloreados corresponden a los periodos de toma de datos topográficos. ....	65
Tabla 4.1. Diferentes campañas llevadas a cabo en la duna de Valdevaqueros.....	81
Tabla 5.1. Fechas de los levantamientos durante el seguimiento a largo plazo .....	94
Tabla 5.2. Parámetros relativos a las pendientes dunares y cambios en la altura basados en la campaña de largo plazo. Las zonas en cuestión se detallan en el esquema de la Figura 4.10. ....	106
Tabla 5.3. Volúmenes de erosión y acreción ( $m^3 m^{-1}$ ) obtenidos entre cada levantamiento tras el análisis de las 4 componentes aisladas reconstruidas. ...	109
Tabla 5.4. Tasas volumétricas ( $m^3 m^{-1} año^{-1}$ ) derivadas del análisis de las 4 componentes aisladas reconstruidas.....	109
Tabla 5.5. Fechas de los levantamientos realizados en la campaña de medio plazo....	110
Tabla 5.6. Fechas de los levantamientos realizados en la campaña de corto plazo y velocidades medias del viento de levante para cada día .....	118
Tabla 5.7. Fecha y hora de los levantamientos realizados en la campaña de muy corto plazo y velocidades medias del viento de levante para cada hora .....	123
Tabla 5.8. Pendientes medias de barlovento y sotavento para los periodos de estudio	133
Tabla 5.9. Tasas de transporte obtenidas del análisis topográfico de los perfiles a distintos plazos. ....	135
Tabla 6.1. Valores de dirección e intensidad de viento, humedad relativa media y precipitación para los meses anteriores a los levantamientos de largo plazo..	144
Tabla 6.2. Velocidades de fricción umbral del viento ( $u_{*t}$ ) y velocidades medias umbral a 1,5 metros sobre la superficie ( $u_{t1,5}$ ) para las diferentes zonas del perfil susceptibles de actividad eólica: Playa Media (PM), Playa Alta (PA), Pie Duna (PD), Barlovento Duna (BD), Cresta Duna (CR), Sotavento Duna (SD) y Muestra Compuesta (MC), siendo $d$ el diámetro medio de grano. ....	158
Tabla 6.3. Tasas de transporte de sedimento a largo plazo según las ecuaciones de Bagnold ( $q_B$ ) y de Zingg ( $q_Z$ ), para las diferentes zonas del perfil susceptibles de actividad eólica: Playa Media (PM), Playa Alta (PA), Pie Duna (PD),	



Barlovento Duna (BD), Cresta Duna (CR), Sotavento Duna (SD) y Muestra Compuesta (MC), siendo $d$ el diámetro medio de grano.....	159
Tabla 6.4. Tasas teóricas de transporte de sedimentos para los diferentes periodos de las campañas realizadas. ....	160
Tabla 6.5. Índices de transporte potencial del viento. $DP$ : Potencial de deriva del sedimento; $RDP$ : Potencial de deriva resultante; $RDD$ : Dirección de deriva resultante; $t$ : Porcentaje de tiempo en el que el viento sopla por encima de la velocidad umbral ( $uv$ =unidades vector). Fuente: Navarro et al. (2011). ....	165
Tabla 6.6. Índices de fuerza eólica para distintos ambientes dunares. $DP$ : Potencial de deriva del sedimento; $RDP$ : Potencial de deriva resultante; $RDD$ : Dirección de deriva resultante; $T$ : Porcentaje de tiempo en el que el viento sopla por encima de la velocidad umbral ( $uv$ =unidades vector). (Fuente: Navarro et al., 2011)	167
Tabla 6.7. Comparación entre las tasas de transporte sedimentario real y teórico para las diferentes campañas estudiadas. *Los valores superiores e inferiores de medio plazo corresponden al seguimiento bimensual (Sep08-Ago09) y al seguimiento mensual (May06-Dic06), respectivamente. ....	169
Tabla 6.8. Cantidades de arena retenidas en peso y transporte sedimentario obtenido para cada nivel de la trampa de arena en el Pie, Barlovento y Cresta de duna durante 30 minutos de exposición. $D_{50}$ =diámetro medio de grano; $u_{max}$ =velocidad máxima registrada con anemómetro; $u$ =velocidad media registrada con anemómetro. ....	173
Tabla 6.9. Comparación de las tasas de transporte eólico real obtenido a partir del sedimento retenido en la trampa de arena en las 3 zonas del perfil y las tasas de transporte teórico calculadas a partir de datos de viento.....	178
Tabla A-IV.1. Clasificación de las principales direcciones de viento.....	214
Tabla A-IV.2. Porcentajes de aparición de cada intervalo de velocidad para 6 direcciones de viento. ....	215
Tabla A-IV.3. Ejemplo de extracción de las velocidades medias y del factor de peso para el viento de dirección N.....	215
Tabla A-IV.4. Ejemplo de extracción del factor de peso, el porcentaje de recurrencia y las unidades vector para el viento procedente del N. ....	216

# ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

En la presente sección se describe el contenido de cada uno de los capítulos recogidos en esta tesis, con el propósito de dar una visión general a este trabajo.

El **capítulo 1** tiene un carácter introductorio en el que se pretende transmitir las funciones que llevan a cabo las dunas costeras en el ámbito litoral haciendo hincapié en su importancia y la necesidad de su conservación. Tras esto, llegamos al planteamiento de los objetivos generales y específicos de esta tesis.

En el **capítulo 2** se recopila la información acerca del estado del arte en el estudio del comportamiento dunar, centrándose en las líneas de investigación más recientes así como en las metodologías más frecuentemente utilizadas para tales investigaciones.

Ya en el **capítulo 3** se realiza una extensiva descripción del ámbito de estudio, definiendo su situación geográfica, clima marítimo y unidades geomorfológicas que condicionan la existencia del sistema dunar de Valdevaqueros. Asimismo, se detallan los antecedentes históricos de la duna, con el fin de ofrecer una visión de las causas que han influido en la evolución y estado actual de la misma. Una vez en este punto, dicho análisis nos permite el establecimiento de un diagnóstico del sistema, contemplando posibles alternativas planteadas por las autoridades competentes.

El **capítulo 4** se centra en la metodología llevada a cabo para la obtención de datos de campo. Por un lado, se detallará el proceso de la toma de datos topográficos, que más tarde serán analizados mediante la aplicación de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF), así como el muestreo y determinación de las características granulométricas de la arena y recopilación de datos meteorológicos. En las secciones posteriores se define el método de las EOFs, exponiendo el concepto teórico de dicha técnica y su aplicación en el ámbito costero y más particularmente en el dunar.

El **capítulo 5** está destinado en su totalidad al análisis del comportamiento dunar a distintos plazos, mediante la aplicación de las EOFs, empezando por el estudio y seguimiento a largo plazo (años), dos seguimientos a medio plazo (meses), uno a corto plazo (días) y finalmente otro a muy corto plazo (horas). En dicho análisis se extraen resultados morfológicos (alturas, pendientes, distancias, etc.) y volumétricos teniendo en cuenta las perturbaciones antrópicas que intervienen en el sistema.

Como estudio complementario de importancia, el **capítulo 6** está dedicado a la evaluación de la actividad dinámica que presenta la duna de Valdevaqueros, tras el análisis de resultados meteorológicos, tales como viento, humedad, precipitación y temperatura. Tras ello, se definen y determinan las diferentes tasas de transporte potencial y real de la duna en función de los periodos de tiempo estudiados en el capítulo anterior.

Por último, el **capítulo 7** pretende ofrecer un resumen de la presente tesis, con un resumen de los resultados y las conclusiones obtenidas tras la misma, así como posibles nuevas líneas de investigación.

Además, debido a la elevada densidad de los contenidos tratados en los capítulos, se ha estimado conveniente mostrar el fundamento de las principales técnicas de análisis empleadas a lo largo del desarrollo de la presente Tesis Doctoral en **4 anexos**. Finalmente, se presenta la lista de **referencias bibliográficas** utilizadas.

## **CAPÍTULO PRIMERO**



## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. Visión interdisciplinaria de las dunas costeras, importancia y conservación.

Desde que a mediados de los años 30, el ingeniero y soldado británico Ralph Alger Bagnold realizara sus primeras exploraciones sobre la dinámica sedimentaria dunar en el desierto de Libia, las dunas de arena han sido estudiadas desde diferentes ángulos de investigación. De hecho, resulta difícil entender el comportamiento dunar sin la contribución de las ciencias físicas, ciencias de la tierra, ciencias biológicas así como estudios de usos y desarrollo basados en la agricultura (Fig. 1.1).

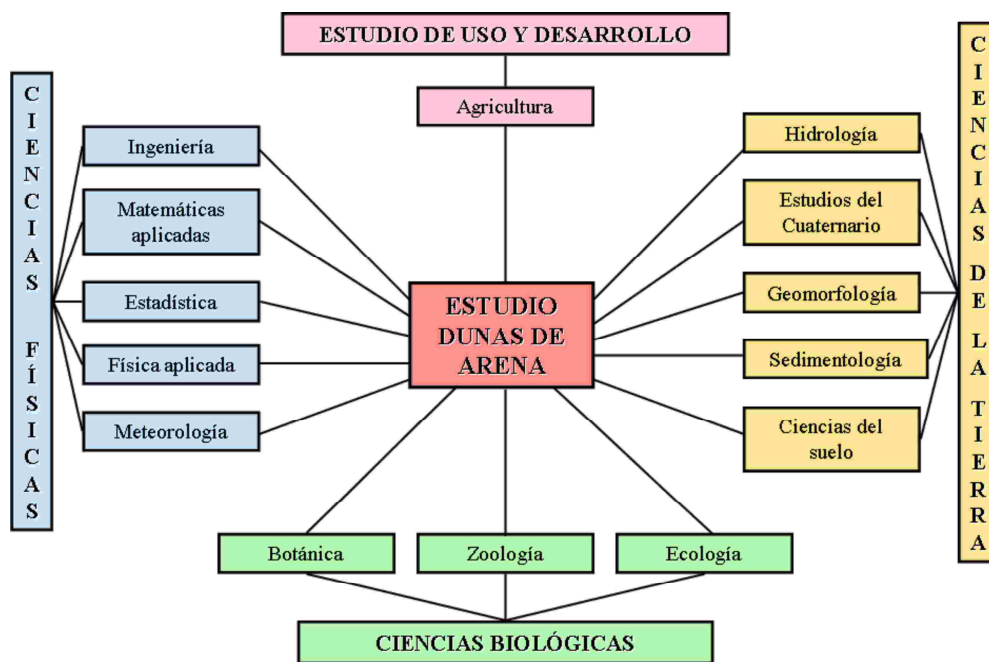


Fig. 1.1. Esquema de la naturaleza interdisciplinaria del estudio de las dunas (Fuente: Pye y Tsoar, 1990).

Aunque existen solapamientos considerables entre ambas disciplinas, los ingenieros han tendido a concentrarse en la mecánica del transporte eólico y en medidas destinadas a estabilizar las dunas, mientras que los geólogos y geomorfólogos se han centrado

principalmente en la clasificación y análisis morfométrico de las dunas, medición de los procesos eólicos e interpretación de las características sedimentológicas y de estructura interna (Pye y Tsoar, 1990).

Situándonos entre el ambiente continental y el marino, el estudio de las dunas costeras ha cobrado especial importancia a lo largo de las últimas décadas, debido no sólo a su singularidad, ya que son depósitos arenosos que cumplen múltiples funciones, sino a su vulnerabilidad al estar localizadas en el ámbito litoral. Estos ecosistemas dunares representan, desde el punto de vista funcional, las reservas de arena de las playas, cuya conservación es tan importante para el desarrollo natural y turístico de un territorio. Durante los episodios extremos, como los grandes temporales, los tsunamis o las mareas excepcionales, el mar toma la arena y los materiales que necesita para que el perfil transversal de la playa se acomode a las condiciones más duras de la energía incidente del oleaje (Gómez Pina et al., 2007; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008). De este modo, las dunas intervienen en el equilibrio sedimentario de las playas y, en definitiva, representan una manera natural y efectiva de proteger la línea de costa y las playas de la erosión. Este papel de las dunas y cordones litorales adquiere una mayor importancia ante los desafíos que pueden plantear los efectos del cambio climático: por un lado nos enfrenta a una subida del nivel medio del mar, y, por otro, a que las mareas máximas (pleamares vivas equinociales) que coincidan con fuertes temporales marítimos ocasionen elevaciones extremas del nivel del mar (Flather y Williams, 2000; Lowe y Gregory, 2005), haciendo que estos temporales generen mayores alturas de olas y resulten mucho más dañinos (Zhang et al. 2000; Wolf y Woolf, 2006).

Sin embargo, las dunas costeras no sólo tienen esta función estructural, sino que también poseen una función ecológica única, permitiendo la colonización de especies psamófilas, adaptadas a estos suelos arenosos, creando un ambiente propicio para el desarrollo de otras comunidades de flora y de fauna, de manera que se favorece un aumento de la riqueza ecológica del lugar. De este modo, estos sistemas destacan por la peculiaridad de su fauna y flora, adaptadas a unas condiciones edáficas extremas como pueden ser la escasa capacidad para retener agua, la escasez de nutrientes, las elevadas temperaturas en superficie, la movilidad del sustrato y la concentración de sales.

El desarrollo dunar depende fundamentalmente del tipo de sedimento, la naturaleza de la reserva sedimentaria, la presencia de vientos suficientemente fuertes como para removilizar esos sedimentos (preferiblemente con una componente predominante del

mar hacia la costa) y de la existencia de una vegetación capaz de iniciar la estabilización (Goldsmith, 1978). Otros factores que controlan el desarrollo, son la topografía del terreno, el clima marítimo, el rango mareal, la presencia de restos arrojados por el mar y, a largo plazo, la tendencia del nivel del mar.

El hecho de necesitar una superficie de dimensiones adecuadas hace que las dunas se desarrollen con preferencia en playas de amplio rango mareal donde el viento actúa sobre una mayor extensión (Carter, 1988). Por otro lado, la conjunción de la marea y el tipo de oleaje puede clasificar el tipo de playa. Según Masselink y Short (1993), los factores más importantes que van a controlar la formación del sistema dunar van a ser el rango mareal relativo y la velocidad de caída adimensional, que depende a su vez de la altura de la rotura de ola, de la velocidad de caída del sedimento y del periodo de ola. Así, las playas de tipo disipativo, muy tendidas y de baja pendiente, serán muy favorables para el desarrollo de dunas, ya que habrá una mayor extensión de playa expuesta durante la bajamar, frente a las zonas de escaso rango mareal, donde la única zona de actuación será entre el nivel del mar y la zona donde se alcanzan los mayores temporales (Short y Hesp, 1982). Por otro lado, suelen presentar un tamaño de grano mucho más fino, lo cual favorece enormemente el transporte.

Además, existen otros factores externos que condicionan el desarrollo de sistemas dunares, como son la humedad y los procesos de precipitación química, que producen adhesión de los granos en superficie y por tanto generan aumentos en la velocidad umbral de removilización eólica. Además de estos factores, el tamaño, la composición y la morfología de los granos influyen de manera notable en la creación y evolución de las dunas, de manera que las partículas más finas y menos densas serán más fácilmente transportables mientras que los granos angulosos serán más difíciles de removilizar (aunque una vez removilizados serán más fácilmente transportados) (Stapor et al., 1983).

En cuanto a la vegetación, ésta ejerce un papel muy importante en la estabilización y control dunar, si bien no es un factor esencial para la formación de dunas costeras. La cobertura vegetal participa en la fijación de las arenas y modifica las características de la superficie en relación al flujo del viento (Packham y Willis, 1997). En un ámbito cercano, García Mora et al. (1999 y 2000) agruparon las especies vegetales dunares de la provincia de Cádiz en tres grupos funcionales de plantas, en función de la dinámica sedimentaria dunar y de su estabilidad. En general, en zonas áridas donde la precipitación media anual es menor de 50 mm no se desarrolla vegetación sobre dunas,



siendo en este caso, el principal factor natural limitante los regímenes de viento de gran intensidad, que provocan intensos procesos de erosión y acumulación de arenas (Tsoar, 2001). Respecto al nivel freático, éste condiciona la fijación del sedimento arenoso y participa en el desarrollo de varios tipos de dunas. Además, la tabla freática impide que progrese la erosión por debajo, evitando la formación de depresiones erosivas (“blowouts”) de tipo subcircular y alargado.

De este modo, los factores que determinan el tipo, alineación, tamaño y espaciado de las dunas son los siguientes (Flor, 2004):

- Naturaleza de las arenas, especialmente su tamaño y clasificación.
- Características del régimen de vientos y de la orientación de la playa respecto a los mismos.
- Aportación de arena al sistema playa-duna.
- Cobertura vegetal
- Topografía de la zona terrestre adyacente a la playa.
- Posición del nivel freático.
- Grado de humedad propio de la zona costera.

Aunque todas estas características determinan el transporte eólico de sedimentos, el desarrollo de estas formas eólicas depende principalmente del tipo de sedimento, la naturaleza del aporte sedimentario, la presencia de vientos que superen el umbral de arrastre de las partículas y la existencia de vegetación capaz de producir una estabilización inicial (Carter, 1990). Estas tres últimas principales características definen el tipo y naturaleza de las dunas que se forman.

Durante las últimas décadas, debido a su especial situación y vulnerabilidad, las dunas costeras han sido objeto de una continua degradación llegando incluso a su destrucción. Cuando se produce el encuentro entre el hombre y un territorio, v.g. las dunas costeras, los sistemas naturales son alterados, variando el grado de perturbación desde casi imperceptible a catastrófico (Carter, 1990). A lo largo de la historia, estos ecosistemas han sido utilizados por el ser humano con diferentes propósitos relacionados con la instalación de asentamientos y explotación de los recursos y oportunidades que ofrecen. La destrucción y fragmentación de los sistemas dunares han conducido a la pérdida de un buen número de hábitats costeros (playas, dunas,

humedales) y a la disminución de la abundancia de especies de flora y fauna (Kutiel et al. 2000; Dukes y Mooney, 2004).

Estas alteraciones suelen ser debidas a la ocupación parcial o total del cordón dunar, a cambios en la dinámica litoral con la consiguiente modificación del aporte sedimentario, a la disminución de la superficie dunar y a cambios en la movilidad o estabilización. En muchos casos, se trata de dunas costeras degradadas debido al uso turístico poco adecuado para estas áreas litorales. En España, concretamente, las causas de degradación son múltiples. Algunos ejemplos recopilados por Gómez-Pina et al. (2002) son el desarrollo turístico masivo, la extracción de áridos, la interrupción de la deriva litoral, la presión recreativa dunar, el pisoteo humano, la circulación de vehículos, aparcamientos y viales, actividades agrícolas y deforestación, vertederos, obras civiles y militares, etc. Sin embargo, en otros casos, dicha degradación se debe en parte a causas naturales que afectan a su equilibrio dinámico.

El litoral de la provincia de Cádiz es un ejemplo más del desarrollo que han tenido estas últimas décadas sectores como el turístico, urbanístico e industrial, pero también es un ejemplo de ecosistemas de singular valor, muy destacables por la presencia de numerosos sistemas dunares que acogen multitud de endemismos y especies raras, vulnerables o incluso en peligro de extinción. La combinación de estos factores, antrópicos y naturales, unido a la fragilidad de los ecosistemas frente a la alteración, hace necesario un esfuerzo por parte de la Administración Pública y de todos los ciudadanos en general, para conservar y mantener en buen estado los recursos existentes sin comprometer su disfrute tanto en el presente como en el futuro.

Este hecho ha sido reconocido por las directrices de la política de conservación en España y toda la Comunidad Europea. De este modo, los ecosistemas dunares son considerados Hábitats de Interés Comunitario tal y como aparece en la Directiva 92/43/CEE del Consejo de 21 de Mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y la flora silvestres, asumida por la directiva estatal y autonómica. Dichas directivas incluyen como hábitats a proteger, varios tipos de dunas marítimas de las costas atlántica y mediterránea, como por ejemplo, las dunas embrionarias, las dunas móviles con *Ammophila arenaria*, las dunas costeras fijas con vegetación herbácea (“dunas grises”), las dunas litorales con *Juniperus spp.* (enebros marítimos y sabinas costeras) y las dunas con bosque de *Pinus pinea* (pino piñonero) y/o *Pinus pinaster* (pino marítimo), entre otras. Estas directivas también incluyen las depresiones interdunares húmedas como hábitat protegido.

En caso de presentar algún grado de degradación, es posible la recuperación del sistema dunar mediante una gestión adecuada adaptada a las necesidades de cada uno de estos ecosistemas. Para poner fin a la degradación de los sistemas playa-duna se suelen aplicar medidas destinadas a limitar las causas de dicha degradación y establecer sistemas de ayuda a los procesos naturales para lograr su recuperación. Generalmente, los ecosistemas dunares degradados pueden recuperarse mediante la restauración ecológica, lo que permite alcanzar cierta estabilidad a largo plazo. El principal objetivo de la restauración es lograr que el sistema recupere su equilibrio dinámico, mediante el desarrollo de métodos y tecnologías blandas poco agresivas desde el punto de vista ambiental (Román-Sierra et al., 2004), como son los sistemas de protección (vallados, pasarelas, carteles informativos, etc.) y sistemas de regeneración (captadores de arena, plantaciones de vegetación y eliminación de especies invasoras). En el caso de dunas originalmente estabilizadas con vegetación que se han visto degradadas por la erosión, el restablecimiento de la vegetación psamófila autóctona cobra especial importancia dentro de las labores de restauración del sistema (Ley et al. 2007).

Por otro lado, las dunas destinadas a proporcionar protección contra la inundación y la erosión deben estar estabilizadas artificialmente para prevenir su deflación y/o migración hacia tierra, y controlar así el movimiento de las arenas hacia el interior de áreas desarrolladas (Coastal Engineering Manual, 2002).

De este modo, el principal objetivo de la estabilización es lograr un desarrollo estable y sostenible del ecosistema dunar, teniendo en cuenta tanto el ámbito natural como socio-económico. Cuanto mayor sea la forma y la cantidad de arena de la duna activa, más largo será el periodo necesario para estabilizarla (Martinho et al. 2010). Las labores de estabilización implican la fijación o reducción de la arena movilizad hacia tierra mediante establecimiento de captadores de arena y plantaciones. De este modo se proporciona una fuente natural de arena para periodos de cambio estacional en el perfil de playa, evitando así la erosión del litoral durante los temporales. Además, se fomenta la extensión de cobertura vegetal al introducir comunidades vegetales autóctonas que ayudan a fijar las dunas.

A pesar de estas gestiones, algunos tipos de sistemas dunares, caracterizados por un comportamiento invasivo, hacen que el seguimiento sea mucho más difícil debido a que se trata de sistemas no estabilizados.

Estas superficies arenosas, que poseen grandes extensiones con pendientes de barlovento bastante constantes, suelen invadir otros ecosistemas adyacentes, como diferentes especies arbustivas, pinares, retamares, marismas, etc. (Cooper y McLaughlin, 1998), modificando las condiciones ecológicas del lugar invadido y alterando la naturaleza de la vegetación que ahí alberga. Además, en las últimas décadas se han dado varios casos de sistemas dunares que amenazan con invadir asentamientos humanos (Avis, 1989; Bate y Ferguson, 1996; Hertling y Lubke, 1999) como es el caso de la duna de Valdevaqueros, cuyo comportamiento se estudiará en la presente tesis.

En estos casos, se hace necesario el estudio detallado del comportamiento del sistema playa-duna para determinar el estado morfodinámico de la zona y poder así extraer un diagnóstico que permita dirigirnos hacia la búsqueda de posibles alternativas, dentro del ámbito de la sostenibilidad.

La gestión de los ecosistemas dunares requiere del establecimiento de una metodología práctica, basada en el seguimiento topográfico y posterior análisis del comportamiento tanto espacial como temporal de las dunas. De este modo se pueden satisfacer las necesidades antrópicas, sin menoscabo de garantizar el mantenimiento del entorno natural en la medida de lo posible. Sin embargo, en el caso de dunas transgresivas, normalmente no fijadas por vegetación, donde domina el transporte sobre otros procesos, esta metodología parece no ser adecuada o suficiente.

## **1.2. Hipótesis planteadas**

Las hipótesis de partida que se plantean en el estudio de la duna de Valdevaqueros son las siguientes:

- La zona cercana al estrecho está altamente afectada por los vientos de poniente y levante, pero es sólo este último el responsable de los procesos eólicos que producen el fenómeno de migración de la duna.
- El comportamiento de la duna de Valdevaqueros depende de fenómenos meteorológicos, como el viento, la lluvia, la humedad y la temperatura. Sin embargo, el viento es el factor limitante en el proceso de transporte eólico de la arena.

- Es posible descomponer los distintos cambios que se generan en la duna en pocas funciones ortogonales, de modo que cada una de ellas proporcione una interpretación de los fenómenos físicos que intervienen en su evolución espacio-temporal.
- La tasa de transporte eólico de sedimentos y la altura a la que viajan esos granos puede obtenerse mediante la ubicación de trampas de arena y anemómetros en distintos puntos del perfil de duna.
- El estudio de perfiles dunares permite el cálculo del volumen de arena acumulado por unidad de área, de modo que nos proporciona una estimación de la cantidad de arena transportada así como la frecuencia de intervención necesaria para la extracción de las arenas a sotavento.
- Los resultados obtenidos del estudio pueden aportar criterios sólidos y objetivos para la elección de alternativas más rentables y sostenibles que eviten la invasión de las arenas por encima de la carretera.
- El fenómeno estudiado es de interés general y, por tanto, es posible su extrapolación a otras dunas transgresivas de similares características.

### 1.3. Objetivos de la tesis

Las condiciones de viento extremas que generan un elevado flujo de arena sobre la duna de Valdevaqueros, así como las extracciones de áridos, trabajos de estabilización mediante captadores de arena y plantaciones, llevados todos a cabo desde hace décadas, han producido cambios significativos en el perfil dunar.

El objetivo de esta tesis es pues, evaluar la movilidad de una duna transgresiva como la de Valdevaqueros a partir del análisis de cambios en su perfil. Dicho análisis se ha llevado a cabo mediante la aplicación de Funciones Empíricas Ortogonales y su reconstrucción a largo, medio, corto y muy corto plazo, teniendo en cuenta la capacidad potencial y real de transporte sedimentario que posee la duna a partir del análisis de los datos meteorológicos.

En esta línea, esta tesis permitirá establecer una metodología capaz de evaluar de manera inédita y objetiva el comportamiento de una duna discriminando cambios volumétricos producidos por actividades antrópicas, como las extracciones de arena.

A continuación se muestran de un modo más específico los objetivos de esta tesis:

- Aplicar una metodología objetiva basada en la reconstrucción de la variabilidad espacio-temporal de perfiles para evaluar el comportamiento morfodinámico de una duna transgresiva a distintas escalas de tiempo.
- Identificar cambios morfológicos y etapas de acreción y/o erosión del perfil dunar a partir de seguimientos topográficos a largo, medio, corto y muy corto plazo.
- Obtener las tasas de transporte potencial de sedimentos a partir del análisis de datos meteorológicos y del cálculo de formulaciones tradicionales en función de los resultados granulométricos de varias muestras de arena del perfil playa-duna.
- Extraer y comparar las tasas de transporte reales obtenidas in situ mediante la utilización de una trampa de arena así como a partir del análisis topográfico y estadístico con las calculadas de forma teórica.
- Evaluar la capacidad real de transporte y avance dunar bajo fuertes condiciones eólicas frente a las técnicas de restauración empleadas por la Administración competente en materia de conservación de ecosistemas dunares.



## **CAPÍTULO SEGUNDO**



*Ralph A. Bagnold en las dunas de Libia, 1935*

## **TÉCNICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE SISTEMAS DUNARES. ESTADO DEL ARTE**





## **CAPÍTULO 2. TÉCNICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE SISTEMAS DUNARES. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1. Estudio de la actividad dunar a nivel mundial**

#### 2.1.1. Estudio de sistemas dunares estabilizados

Actualmente las líneas de investigación dunar se centran en gran medida en el estudio de la falta de movilidad eólica que presenta gran número de sistemas dunares.

En el ámbito europeo ya se han detectado sistemas dunares que presentan cierta inactividad, conllevando a una disminución de la biodiversidad típica de esos ambientes. Muchos de estos estudios sobre gestión y restauración se han llevado a cabo en el ámbito europeo. En Holanda Arens et al. (2004) y Arens et al. (2005) estudiaron durante 8 años los efectos de la restauración mediante removilización o eliminación de vegetación y tierra de una duna parabólica y Grootjans et al. (2002) hizo lo propio tras la restauración ecológica de depresiones húmedas interdunares. En Dinamarca, Clemmensen y Murray (2006) y Clemmensen et al. (2009) dataron la última fase de importante actividad eólica de dunas estabilizadas o inactivas sometiendo a exposición los minerales al método de luminiscencia estimulada ópticamente (OSL). Buynevich et al. (2007) también identificaron etapas de estabilización y reactivación en antiguos campos dunares de Lituania acontecidos a lo largo de la historia, mediante imágenes de radar de penetración terrestre (GPR). En el Reino Unido, Pye y Neal (1994) calcularon tasas medias de erosión de  $3 \text{ m año}^{-1}$  en un cordón dunar de 5 km de longitud al noroeste de Inglaterra, evaluando las causas tanto naturales como antropogénicas así como las medidas de protección y restauración empleadas durante el último siglo. Por otra parte, Williams y Davies (2001) clasificaron varios sistemas dunares de todo Gales según una lista control, estableciendo una relación entre vulnerabilidad y protección, que aplicarían también a otros sistemas dunares del Golfo de Cádiz, Francia y Portugal (Williams et al., 2001). Asimismo, Lemauviel et al. (2003) investigaron procesos

experimentales de gestión y conservación de un cordón dunar de 25 km situado en la Bretaña francesa. En Bélgica, Provoost et al. (2004) evaluaron las medidas de gestión aplicadas a dunas grises a nivel biológico (paisaje, comunidades y especies). En el marco europeo, Pye (2001) evaluó los efectos potenciales del cambio climático sobre los sistemas dunares y sobre cambios en el nivel del mar y en el transporte sedimentario.

Incluso a nivel mundial, muchas de estas dunas están siendo fijadas de forma natural por vegetación debido a la disminución de la fuerza del viento (Muhs y Holliday, 1995), a la desaparición del impacto llevado a cabo por el ser humano (Tsoar y Blumberg, 2002), o al incremento de la cobertura vegetal causada por una alteración en la fauna autóctona, como sucedió en las dunas de Gran Bretaña con una disminución en la población de conejos debido a la mixomatosis (Ranwell, 1960; Thomas, 1960 y 1963).

Los sistemas dunares costeros de Israel son un ejemplo ampliamente estudiado por la reducción de su actividad eólica y su consiguiente falta de movilidad. Levin y Ben-Dor (2004) caracterizaron el nivel de estabilización dunar de dichos sistemas a partir del cálculo de la movilidad mediante fotografías aéreas de 1944 a 1999. Posteriormente, Levin et al. (2006) relacionaron dicho estado de inactividad dunar con otros factores, como la vegetación, la precipitación y la velocidad del viento. Tsoar y Blumberg (2002) documentaron la evolución de dunas transgresivas y barjanoides a dunas parabólicas como consecuencia de cambios en la vegetación causadas por el ser humano. Además, Kutiel et al. (2000) analizaron el efecto que tenía la eliminación de cobertura masiva vegetal sobre la fauna en las dunas semi-estabilizadas del Parque Nacional de *Nahal Alexander*, al norte de Tel Aviv.

Este fenómeno también ha sido estudiado en otros continentes por múltiples investigadores. Martinho et al. (2010), describieron los cambios que experimentaron diversos campos dunares en el sur de Brasil. Thornton et al. (2006) evaluaron la erosión de las dunas de la Bahía de Monterrey (Estados Unidos) debido a los impactos de la extracción de áridos, mientras Hesp (1988) documentó el estado de las dunas estabilizadas del sureste de Australia y Hellström (1996) estudió la evolución de un campo dunar móvil en Sudáfrica, que fue estabilizado artificialmente alrededor de 1930, actuando desde entonces como una trampa sedimentaria.

### 2.1.2. Estudio de sistemas dunares móviles

Por el contrario, en otros sistemas dunares, el problema radica en la pérdida de estabilidad y su consiguiente incremento de movilidad. Algunos autores, como Del Valle et al. (2008) determinaron altas tasas de migración (superiores a  $9 \text{ m año}^{-1}$ ) de dunas costeras en la Patagonia argentina. Girardi y Davis (2010) reconocieron una fase reciente de reactivación en las dunas parabólicas de *Walking Dune Field*, en Napeague (Nueva York), mediante imágenes de GPR. Incluso se han estudiado sistemas dunares que presentan tanto dunas móviles como estabilizadas, como en el litoral del norte de Brasil (Tsoar et al., 2009). En todos estos casos, la gestión dunar suele ir enfocada a lograr una adecuada estabilización dunar. Algunos autores, como Gadgil y Ede (1998) evaluaron diversas técnicas de estabilización en Nueva Zelanda, Hertling y Lubke (1999) realizaron un seguimiento del uso de *Ammophila arenaria* en las dunas de Sudáfrica, y Gómez-Pina et al. (2002) revisaron varios ejemplos de restauración en sistemas dunares españoles así como problemas existentes detectados en la gestión dunar.

Se ha demostrado que las largas sequías o mega-sequías conllevan a la disminución de la cobertura vegetal y a la reactivación dunar (Schmeisser et al., 2009; Hanson et al., 2010). Por otro lado, Yizhaq et al. (2007) observaron que en zonas con lluvia cuya naturaleza puede soportar cobertura vegetal, y bajo vientos de fuerza intermedia, pueden coexistir tanto dunas móviles como estabilizadas, mientras que para fuerzas de viento inferiores siempre son fijas. Pese a ello, hay que tener en cuenta que la madurez de un suelo no significa que tenga que sufrir de inactividad geomorfológica tanto a lo largo del litoral como en zonas interiores (Paskoff, 2003).

Se asume que para una tensión de viento extremadamente alta, la vegetación se destruye y las dunas se reactivan. En este sentido, las dunas costeras pueden ser tanto estabilizadas como removilizadas, en respuesta a cambios en la fuerza del viento (Levin et al., 2007). Las actividades de restauración se suelen centrar en la reactivación de estos ecosistemas, si bien, en otros casos, como los comentados anteriormente, la estabilización es el principal objetivo. La estabilización dunar se aplica especialmente cuando se modifican las condiciones originales de desarrollo dunar, reflejando diferencias en la cobertura vegetal, el aporte sedimentario o aumentos en las tasas de migración.

Un ejemplo de diferentes comportamientos sufridos por las dunas costeras en un clima húmedo con fuertes vientos y poca disponibilidad de arena se describe en Tsoar et al. (2009). De hecho, los experimentos basados en la removilización suelen tener como objetivo la restauración de la riqueza ecológica dunar (Arens et al., 2004).

## **2.2. Principales sistemas dunares costeros**

Debido a que el conocimiento acerca del comportamiento dunar se encuentra siempre en proceso de expansión, no es posible hallar una única clasificación válida de los sistemas dunares costeros. Una de las clasificaciones más sencillas es la descrita por McKee (1979), que agrupa las dunas no vegetadas en función de su forma y del número de caras de deslizamiento, proponiendo seis grupos principales: barjanes, crecientes o transversales, lineales, inversas, estrella y parabólicas. Dentro de cada una de estas formas principales, se pueden encontrar tres variedades de tipos de dunas: simples, compuestas y complejas. Existen otras muchas clasificaciones morfodinámicas en las que las dunas se ordenan por su forma y relación con los vientos que las forman, especialmente por su alineación con relación al vector resultante del transporte neto de sedimento. Asimismo, las dunas pueden clasificarse según sean acumulativas (dunas transversas, longitudinales y barjanoides) o erosivas (los denominados depresiones erosivas o “blowouts”).

Tras esta pequeña revisión, vemos que, en general, los sistemas dunares costeros pueden albergar multitud de morfologías dunares: dunas parabólicas, dunas transversas, dunas invertidas, barjanes, dunas barjanoides, dunas en seif o longitudinales, campos dunares transgresivos y de bypass entre cabos. Algunas de las formaciones dunares costeras más comunes pueden verse en la Fig. 2.1.

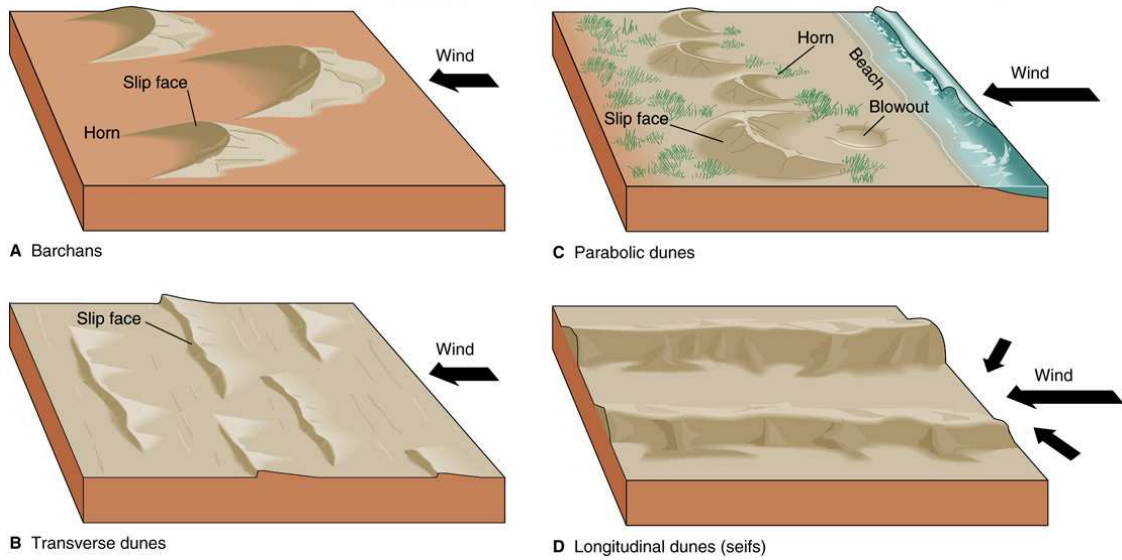


Fig. 2.1. Tipos de dunas costeras: a) barjanes, b) dunas transversas, c) dunas parabólicas, d) dunas longitudinales o en seif.

El desarrollo de estas formaciones dunares puede resumirse de modo general mediante el diagrama de triple entrada de Hack (1941), tal como aparece en la Fig. 2.2.

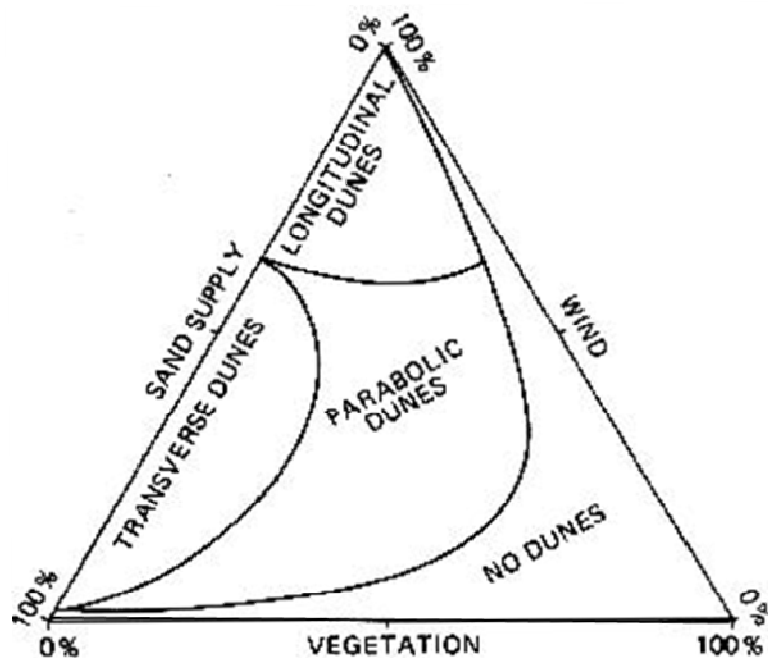


Fig. 2.2. Relación entre las formas dunares, la efectividad de la cobertura vegetal, el aporte de arena disponible por el viento y la fuerza del viento (Fuente: Hack, Geographical Review, 1941).

Las dunas transversas se forman mayoritariamente cuando existe una cobertura vegetal escasa, un aporte abundante de arena y una fuerza del viento moderada, mientras que las dunas longitudinales se forman donde hay un limitado aporte sedimentario, cobertura vegetal de escasa a moderada, pero con velocidades de viento intensas. Las dunas parabólicas aparecen mayoritariamente en áreas con moderado aporte sedimentario, con un porcentaje elevado de cobertura vegetal y velocidades de viento suaves a moderadas. Es posible identificar dunas parabólicas activas que al perder vegetación se convierten en dunas activas transversas, aunque no suele ocurrir en sentido inverso (Tsoar y Blumberg, 2002). Por último, en zonas donde la cobertura vegetal es elevada y la fuerza del viento es de baja a moderada resulta difícil la formación de dunas, ya que el sustrato arenoso está muy fijado con vegetación y la escasa fuerza del viento no permite el desarrollo de estas morfologías.

### 2.2.1. Dunas crecientes o transversales

Las dunas transversas y los barjanes, que son las dos formas principales de dunas migratorias, tienen dos pendientes diferenciadas: una moderada en la parte de barlovento y otra más abrupta en la de sotavento (Tsoar et al., 2004). La cara de barlovento (podremos ver una sección transversal típica en la Fig. 3.15) finaliza en una cresta prácticamente horizontal, con un quiebro brusco de la pendiente o borde en la cara de sotavento o de avalancha, que en general presenta una pendiente próxima a la del ángulo de reposo de la arena (34° a 40° según la humedad). Los valores máximos de la pendiente se encuentran en la parte superior, y van disminuyendo hacia la base o falda de la duna. Según las condiciones de viento y humedad, en determinadas ocasiones se forma una cornisa en el borde de avalancha. En el caso de dunas móviles, el avance de la duna deja zonas de deflación casi-horizontales denominadas depresiones o zonas interdunares.

Estas dunas se forman bajo regímenes de viento caracterizados por variaciones de dirección y sentido pequeñas. En ausencia de vegetación, las dunas crecientes serán las formas dominantes en regímenes de viento casi-unidireccionales. Este tipo de duna es estable hasta variaciones en la dirección del viento de 15° alrededor de la dirección media (Ley et al., 2007). Tal como veremos que sucede en el extremo occidental del sistema dunar de Valdevaqueros, normalmente se forman dunas crecientes aisladas o

barjanes donde la disponibilidad de arena es limitada. Estos barjanes se caracterizan por poseer una cara de barlovento de pendiente baja y una cara de deslizamiento en forma de luna creciente con los cuernos avanzando en la dirección del viento (Fig. 2.3). De forma general, a medida que aumenta la disponibilidad de arena, los cuernos de los barjanes se unen con los contiguos formando un cordón de dunas crecientes relativamente ondulantes, con la dirección principal de las crestas perpendicular a la dirección del viento y presentando claramente una cara de barlovento de suave pendiente y una cara de sotavento o deslizamiento con pendiente en el límite de equilibrio de la arena.



Fig. 2.3. Desarrollo y migración de una duna barjana (Fuente: Consejería de Medio Ambiente; [www.juntadeandalucia.es](http://www.juntadeandalucia.es))

Dentro de las dunas transversas, los sistemas dunares transgresivos son depósitos arenosos de origen eólico de gran anchura, formados por el movimiento a favor del viento de mantos sedimentarios o campos dunares sobre terrenos vegetados o semi-vegetados. Estos campos dunares pueden comprender desde pequeñas capas hasta depósitos de arena de gran escala, típicamente limitados por grandes caras de deslizamiento que suelen estar encabezados por cuencas y superficies de deflación (Hesp y Thom, 1990), que son depresiones erosivas de tipo subcircular y alargado donde el nivel freático impide que progrese la erosión por debajo.

Las dunas transgresivas pueden presentar diversos grados de cobertura vegetal. Se clasifican separadamente de las dunas parabólicas porque estas últimas normalmente muestran una forma de lóbulo deposicional parabólico, dos brazos de salida y una cuenca o superficie de deflación contenida en las crestas (Hesp, 1999), tal como se muestra en la Fig. 2.4.





Fig. 2.4. Esquema de duna parabólica (Fuente: Consejería de Medio Ambiente; [www.juntadeandalucia.es](http://www.juntadeandalucia.es))

Las dunas transgresivas suelen actuar como sumideros de arena que tienden a moverse sistemáticamente hacia el interior, lejos de la playa y de la zona litoral activa (Rust and Illenberger, 1996). Aunque las dunas móviles forman el mayor componente de los sistemas dunares transgresivos, las dunas migratorias son el grupo de dunas más activo y su migración puede provocar graves daños en viviendas y otras estructuras (Avis, 1989; Bate y Ferguson, 1996; Hertling y Lubke, 1999), ecosistemas adyacentes (Cooper y McLaughlin, 1998), tierras de cultivo o praderas (Yao et al., 2007). De hecho, según Arens (1996), las dunas embrionarias con pendientes descubiertas pueden llegar a alcanzar alturas de más de 100 metros.

Algunos ejemplos muy llamativos de este tipo de dunas los encontramos en Europa. Por un lado, en la entrada de la Bahía de Arcachón, a 50 km al suroeste de Bordeaux (Francia) se encuentra la duna de *Pilat* o *Pyla* (Fig. 2.5a), una duna transversa de 2,5 km de longitud, 100 m de altura y 500 m de anchura. Por otro lado, la duna de *Rubjerg Knude* (Fig. 2.5b) es una duna rampante de más de 40 metros de altura y 2 km de longitud, formada sobre un acantilado de 100 m de altura situado en la Península de Jutlandia, al norte de Dinamarca.



Fig. 2.5. a) Duna de Pilat (Francia); b) Duna de Rubjerg Knude (norte de Dinamarca)

### 2.3. Tecnologías existentes aplicadas al estudio del comportamiento dunar

A partir de las formulaciones definidas por Bagnold (1941), basadas en la relación entre la velocidad del viento y la tasa de movimiento de las arenas, han sido muchos los autores que han desarrollado modelos matemáticos destinados a predecir el transporte eólico de sedimentos. La mayoría de estos modelos están basados en factores teóricos pero incorporan coeficientes empíricos (Chepil, 1945; Zingg, 1953; Kawamura, 1964; Kadib, 1965; Hsu 1971; Lettau y Lettau, 1978; White, 1979). En todas estas expresiones, la tasa de transporte eólica se representa por la letra  $q$ , que contiene unidades de masa por unidades de anchura y tiempo ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ).

Otra metodología ampliamente utilizada hasta la actualidad ha sido el método desarrollado por Fryberger (1979). Se trata de un método simple para representar mediante diagramas polares o rosas de transporte de arena, la magnitud del transporte eólico de sedimentos, cuyo valor refleja la cantidad máxima potencial de arena que puede ser erosionada por el viento durante un año para todas las direcciones de viento.

Además, durante las últimas décadas se han utilizado diversos métodos para el estudio de la evolución morfológica así como de las tasas de migración de dunas.

Bailey y Bristow (2004) compararon fotografías aéreas para medir el avance dunar, mientras que otros emplearon la fotogrametría<sup>1</sup> (Brown y Arbogast, 1999; Ojeda et al., 2005) y cartografía (Martinez, 1994; Moore, 2000; Peña-Cortés et al., 2008) e incluso diseñaron una cartografía sedimentaria (Alcántara-Carrió y Alonso, 2001).

Durante los últimos años, se han utilizado otras nuevas técnicas para cuantificar volúmenes de tasas de migración en campos dunares, como el uso de la luminiscencia estimulada ópticamente<sup>2</sup> (OSL) (Chase y Thomas, 2006; Saye et al., 2006; Peterson et al., 2007), métodos de teledetección (Balduzzi et al., 2006; Del Valle et al., 2008; Kemal Sönmez et al., 2009; Hesse, 2009; Levin, 2011) y topografía (Honrado et al.,

---

<sup>1</sup> La técnica de la *fotogrametría* consiste básicamente en la utilización de dos fotografías aéreas con una zona común (zona de solape) que nos permite obtener una visión estereoscópica o tridimensional, proporcionando información acerca de las propiedades geométricas de los elementos fotografiados.

<sup>2</sup> La *luminiscencia estimulada ópticamente (OSL)* es un método de datación que se utiliza para determinar el tiempo transcurrido desde que los minerales fueron expuestos por última vez a la luz del día, gracias a la posición de sus electrones. El rango de edades que se pueden encontrar varían desde unos cientos de años a unos 100.000 años.

2010) con LIDAR<sup>3</sup> (Saye et al., 2005; Brock y Purkis, 2009) estación total, GPS y/o GIS (Ojeda-Zújar et al., 2002; Thornton et al., 2006; Anthony et al., 2007; Rodriguez et al., 2009), combinando muchos autores varias de estas técnicas de forma complementaria.

Asimismo, cabe destacar la metodología desarrollada por Oliveira et al. (2008) y Rodriguez Santalla et al. (2009) mediante la utilización de radares de penetración terrestre o *Ground Penetration Radar* (GPR) para identificar procesos dinámicos recientes en el interior de estructuras dunares como alternativa a las mediciones topográficas, además de proporcionar una vía para el estudio de comportamientos y evoluciones dunares históricas. Asimismo, el análisis granulométrico, mineralógico y micro-paleontológico del sedimento resultó de gran utilidad en la identificación de fuentes de arena transportada por el viento, tal como hicieron Alcántara-Carrió et al. (2010) en las dunas de Fuerteventura (Canarias).

Debido a que el comportamiento dunar está fuertemente ligado a la distribución de la cobertura vegetal, algunos autores han centrado sus investigaciones en la diversidad vegetal para predecir la vulnerabilidad dunar costera (García-Mora et al., 2000; Williams et al., 2001) basándose en las condiciones geomorfológicas del entorno, la influencia marina y eólica, el estado y tipo de cobertura vegetal, así como los efectos derivados del uso humano. Esta teoría la aplicaría posteriormente Martínez et al. (2006) al estado de las dunas costeras a lo largo del Golfo de México.

Generalmente, en estos planes de restauración se desarrollan métodos y tecnologías blandas poco agresivas desde el punto de vista ambiental (Román-Sierra et al., 2004), que consisten en eliminar o limitar las causas de la degradación de estos ecosistemas, y en establecer sistemas de ayuda a los procesos naturales para lograr su recuperación.

En cuanto a campos dunares transgresivos, Hesp et al. (2010) examinaron cuatro tipos de formas terrestres en un complejo campo de dunas transgresivas costeras del Golfo de México, estudiando su evolución mediante levantamientos topográficos y el estudio de su vegetación asociada. Además, Miot da Silva y Hesp (2010) estudiaron la

---

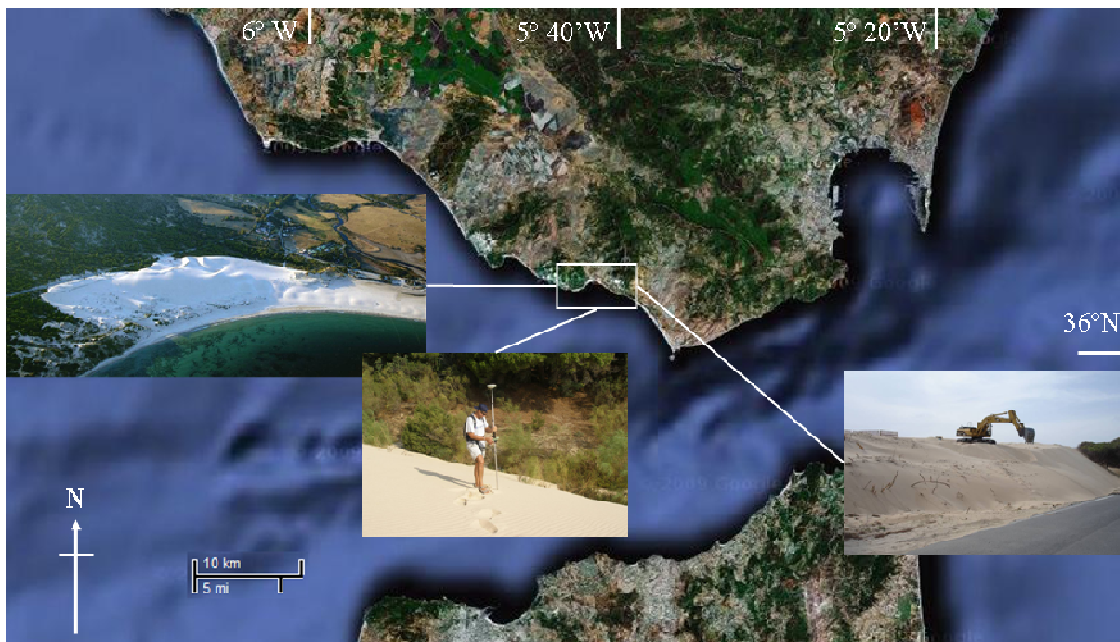
<sup>3</sup> El LIDAR (*Light Detection and Ranging*) es un sistema activo, montado normalmente sobre aviones o helicópteros, basado en un sensor que lleva a cabo la emisión de un pulso láser y la medida del tiempo que tarda dicho pulso en llegar a la superficie y volver al punto de emisión. Estos pulsos van desde la luz ultravioleta a la infrarroja, variando su longitud de onda entre 500 y 1500 nanómetros. El sensor emite pulsos de luz ininterrumpidamente y capta sus retornos, también denominados ecos o rebotes. El tiempo que tarda en regresar la luz, permite calcular la distancia y, de esa forma, obtener la altimetría del terreno, de modo que los puntos más próximos (altos) dan una respuesta más rápida.

orientación del desarrollo de dunas embrionarias y campos dunares en la Playa de *Moçambique*, al sur de Brasil. Para ello realizaron levantamientos mensuales de 5 perfiles durante un año, con el fin de obtener datos de la movilidad y anchura del sistema playa-duna y del desarrollo de las dunas embrionarias. Asimismo, se obtuvieron rosas de transporte eólico sedimentario (*sand roses*), siguiendo el método de Fryberger (1979) para determinar el transporte potencial de sedimentos en ambientes eólicos, a partir del análisis de datos de viento. Los índices de transporte potencial fueron comparados con datos volumétricos obtenidos del seguimiento topográfico.

Algunas de estas metodologías han servido de base para cuantificar el transporte potencial dunar a diferentes escalas temporales y poder así establecer un criterio de comparación con respecto a los resultados reales obtenidos in situ mediante técnicas que describiremos a lo largo de la presente tesis.



## CAPÍTULO TERCERO



### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ALTERNATIVAS PLANTEADAS



# **CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ALTERNATIVAS PLANTEADAS**

## **3.1. Descripción de la zona de estudio**

### 3.1.1. Localización

La ensenada de Valdevaqueros se encuentra situada en el término municipal de Tarifa, en el sector más meridional de la costa atlántica gaditana. A 10 km del estrecho de Gibraltar, en las coordenadas geográficas 36° 4' 15'' N y 5° 41' 30'' W, dicha ensenada presenta una abertura de unos 3,5 km, con un recorrido de costa de 4,05 km y una playa con una anchura media de 120 m (Fig. 3.1). En su extremo occidental se sitúa Punta Paloma y en el oriental la desembocadura del Río Valle, que forma un amplio estuario que recorre toda la playa a escasa distancia del mar hasta desembocar a varios cientos de metros al este del sistema dunar. Además, la ensenada de Valdevaqueros, constituye una réplica, a menor escala de la vecina ensenada de Bolonia (situada a unos 8 km al oeste) ya que aparecen los mismos ambientes y procesos costeros. El manto dunar de unos 40 metros de altura, presenta un desarrollo en dirección SE-NW, formado por los vientos dominantes de levante. Bajo estas duras condiciones, la duna se desplaza hacia el interior, enterrando un denso pinar costero de repoblación así como la única carretera (CA-222) que comunica con el poblado de Punta Paloma.





Fig. 3.1. Localización del área de estudio

### 3.1.2. Clima atmosférico y marítimo

El viento, el oleaje, las mareas y las corrientes son los principales agentes físicos que actúan sobre el litoral suratlántico gaditano, determinando el desarrollo de los diversos ambientes litorales de la zona.

El borde litoral de la ensenada de Valdevaqueros tiene una orientación NW-SE y posee características meso- micromareales, con rangos medios de marea de 1,5 m y 0,5 m en mareas vivas y muertas respectivamente (Instituto Hidrográfico de la Marina, 2010), debido a la disminución paulatina del rango de marea conforme nos acercamos al Estrecho de Gibraltar.

Los vientos dominantes soplan fuertemente del Este con cierta componente SE (Fig. 3.2), con una velocidad media de 27,8 km/h (7,72 m/s) y rachas a veces huracanadas de más de 100 km/h (MARM, 2008). Estas condiciones eólicas tan fuertes y frecuentes representan un paraíso para las actividades de windsurfing y kitesurfing, que se llevan a cabo en la zona.

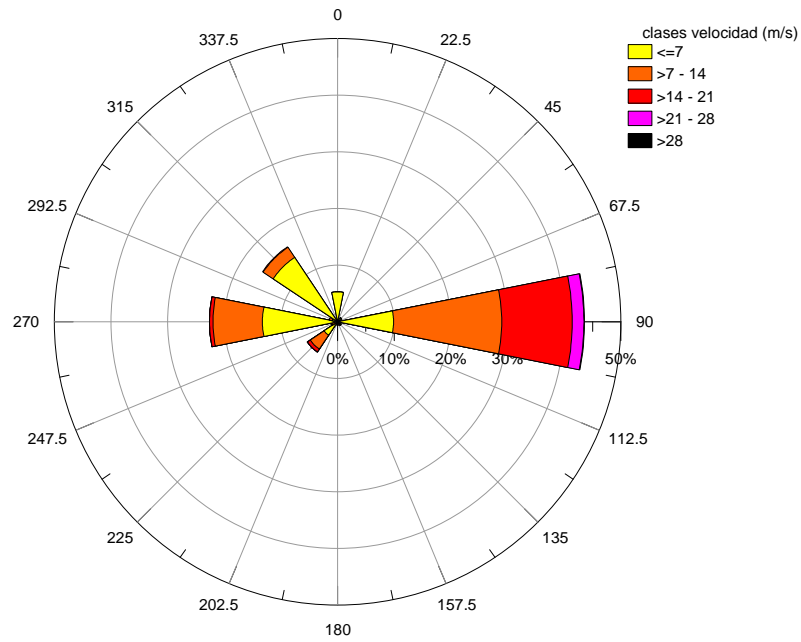


Fig. 3.2. Rosa de vientos desde 1956 hasta 2006 para Tarifa (Fuente: MARM, 2008)

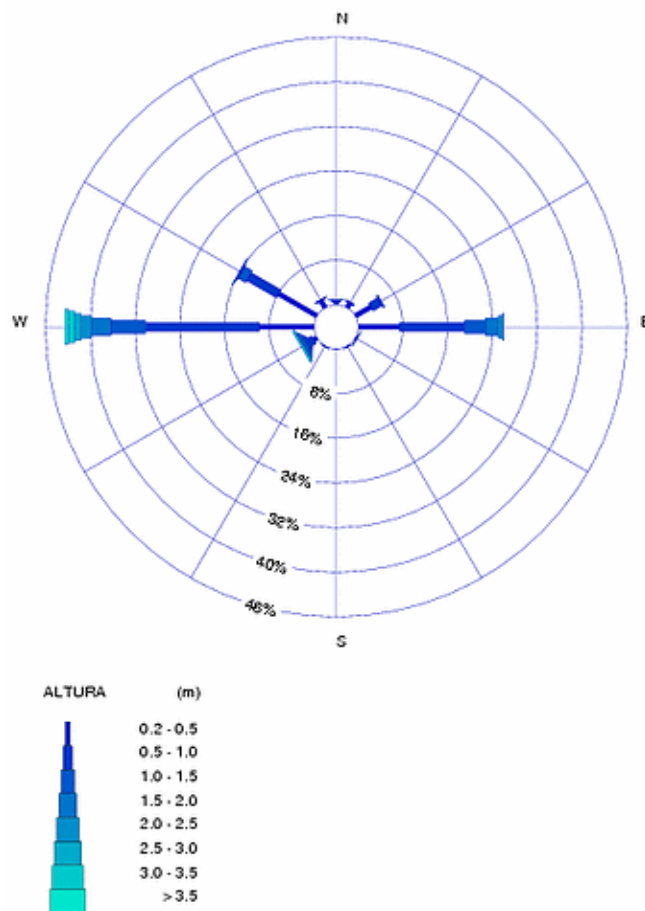


Fig. 3.3. Rosa de oleaje para 2009 en el punto WANA 1057044, situado en el Estrecho de Gibraltar (Fuente: Puertos del Estado; [www.puertos.es](http://www.puertos.es))

Asimismo, los vientos de poniente, aunque menos frecuentes y energéticos (con velocidades medias de 19,3 km/h), están asociados a frentes fríos procedentes del océano Atlántico, que producen temporales y generan oleaje predominante tipo “swell” o mar de fondo. Estos temporales influyen decisivamente en la dinámica costera, con la llegada de olas cuya altura media significativa puede superar los 3,5 metros (Fig. 3.3).

Aparte de las corrientes mareales, destacan las ligadas al oleaje. Éstas, debido a la orientación de la costa, generan una deriva litoral neta hacia el SE. Los frentes de oleaje de poniente, refractados y parcialmente disipados, son los responsables de la redistribución de los depósitos arenosos que se ven arrastrados por el Río Valle, dando lugar a una flecha litoral de pequeña extensión.

### 3.1.3. Unidades geomorfológicas

El área de estudio se encuentra en el sector más occidental de las cordilleras Béticas. La zona del Estrecho, desde Punta Carnero hasta la Punta de Tarifa, está formada por zonas de acantilados debido a la proximidad de estas sierras (Fig. 3.4). La geología del terreno, formado por depósitos de tipo *flysch*, hace que se sucedan en toda esta área diversas calas, originadas por la degradación de materiales blandos y la permanencia de los materiales duros.

La historia geológica del litoral gaditano nos indica que éste se encuentra afectado por importantes procesos tectónicos como fallas transversales que han modificado la morfología, provocando un escalonamiento litoral sucesivo a lo largo de la costa, tal como puede verse en la Fig. 3.5.

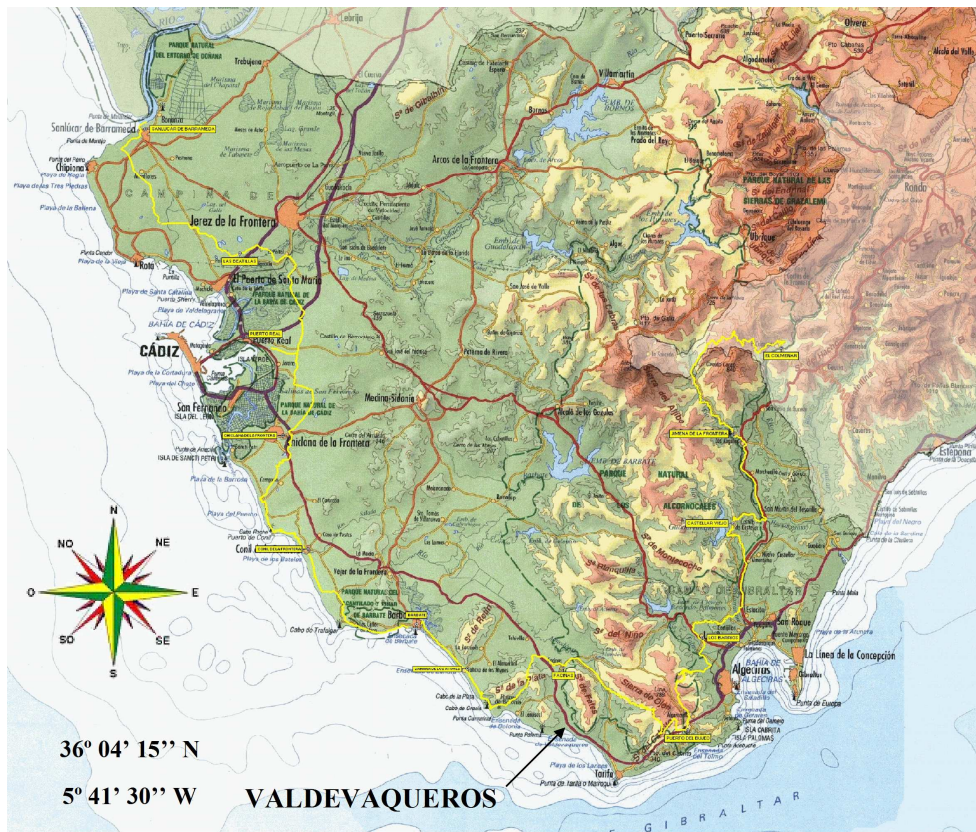


Fig. 3.4. Mapa físico de la zona de estudio

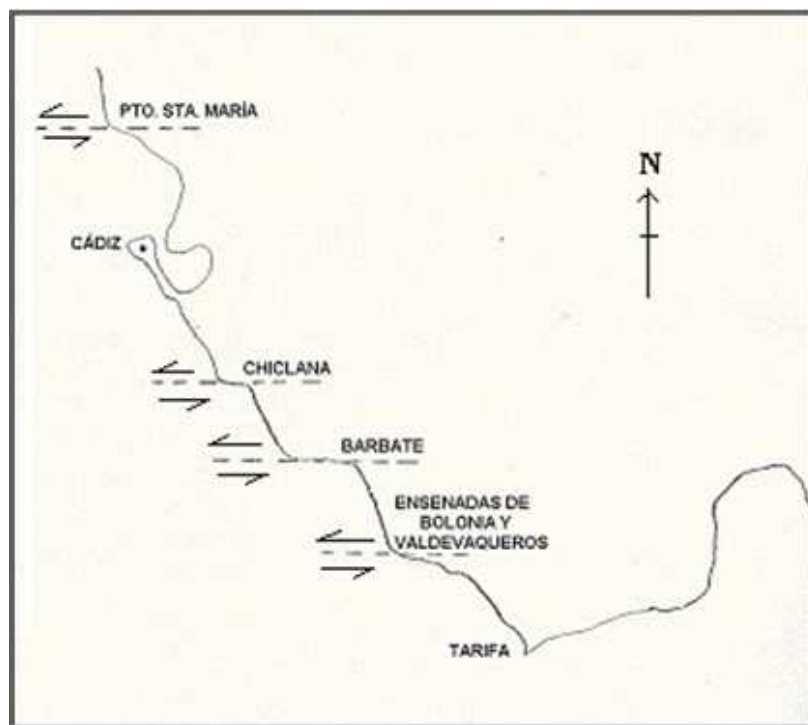


Fig. 3.5. Esquema del escalonamiento del litoral de Cádiz producido por series de fallas transversales (Fuente: Román Sierra et al., 2004)

Esta particularidad origina el desvío de los cauces de ríos, que actúan como trampas interrumpiendo el transporte sedimentario litoral procedente de acumulaciones de arena situadas más al sur (Gutiérrez Mas, 1991). De este modo, puede suponerse que la erosión eólica de arena de las playas de Los Lances y de la Isla de Tarifa se ve en parte transportada y sedimentada en dichas trampas tectónicas, generando así un exceso de acumulación que se traduce en la formación de grandes dunas móviles, como la de Bolonia o la de Valdevaqueros en este caso.

Del Río y Gracia (2007) analizaron la vulnerabilidad de los acantilados del litoral gaditano, determinando un bajo índice de vulnerabilidad relativa para los situados en Punta Paloma (34,3%), gracias a que, por su localización y orientación, las areniscas que lo forman quedan protegidas del ataque directo del oleaje más energético, además de contar con la presencia de la playa y de la plataforma rocosa que disipan parte de dicha energía incidente.

Tal como se muestra en la Fig. 3.6, la ensenada de Valdevaqueros es la última gran ensenada del litoral atlántico gaditano (y la más meridional) antes de llegar al Estrecho de Gibraltar. Los relieves que la circundan (sierras de San Bartolomé y de Enmedio) están labrados sobre series de areniscas oligocenas, llamadas “areniscas del Aljibe” constituidas por más del 90% de cuarzo y predominio de granos redondeados y subredondeados y pulimento generalizado en la superficie (Achab et al., 2005). Al sur de la Sierra de Enmedio se desarrolla la Playa de los Lances, con unos 7 km de longitud y dirección NW-SE, que se extiende hasta la localidad de Tarifa.

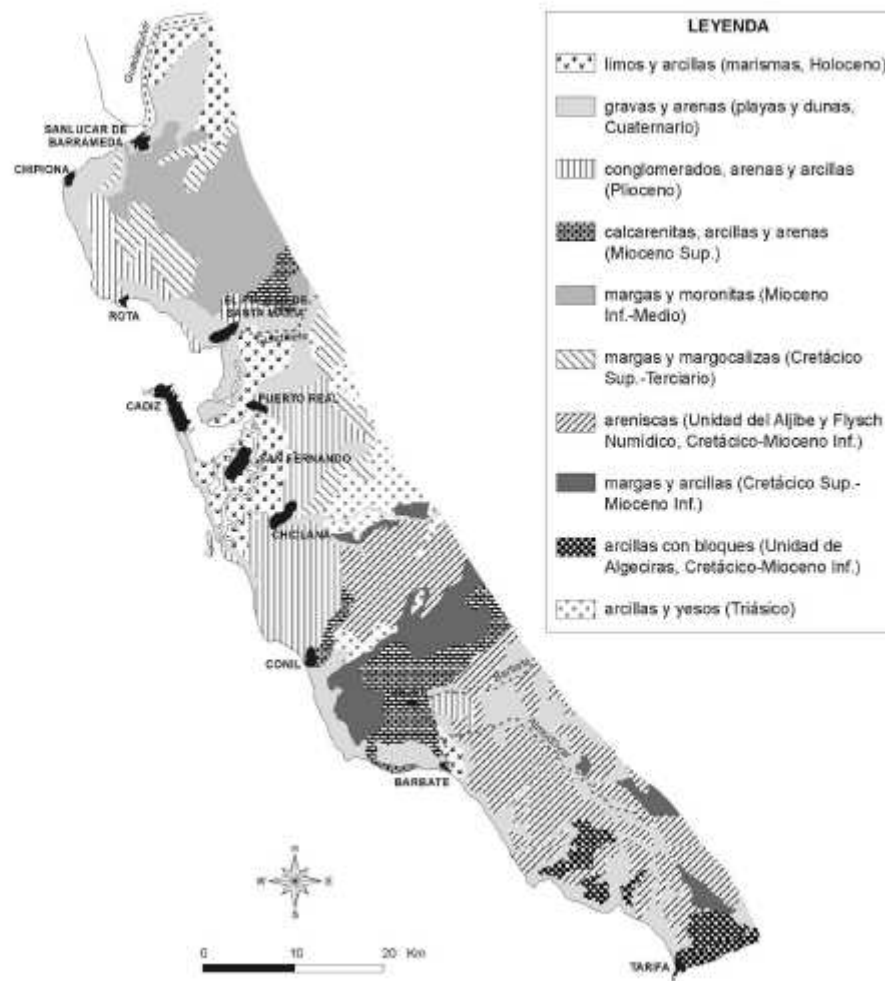


Fig. 3.6. Esquema litológico del litoral gaditano (Fuente: Del Río y Gracia, 2007)

La ensenada representa un escenario único formado por una playa natural (Fages et al. 2007) que encierra, aparte de la duna activa de Valdevaqueros, numerosas unidades ambientales (Fig. 3.7): la desembocadura del Río Valle, una laguna costera estacional, dunas barjanoides en su extremo occidental, así como diferentes infraestructuras antrópicas (baterías militares, una carretera, una zona de aparcamientos, un camping y hasta una granja de cerdos).



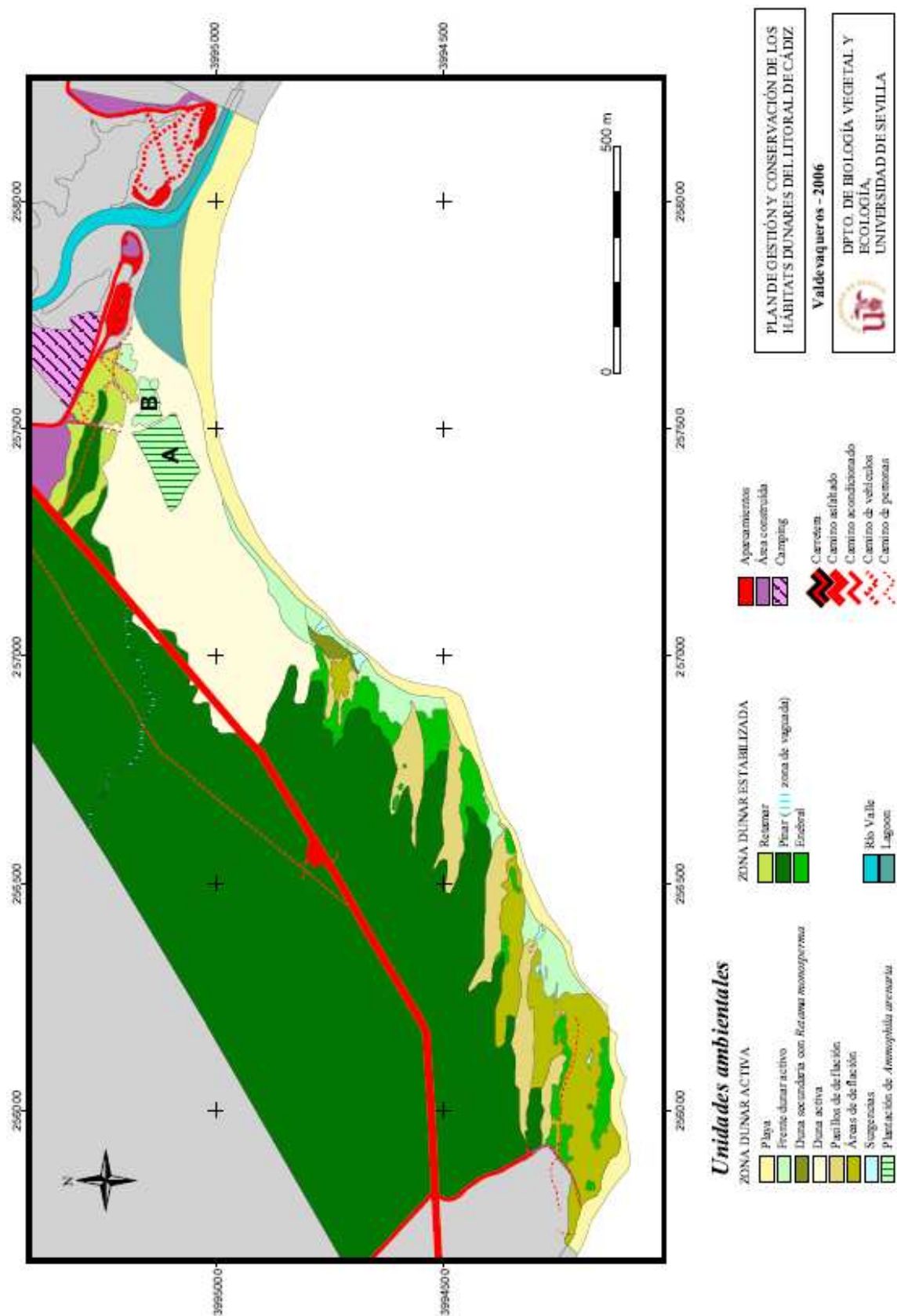
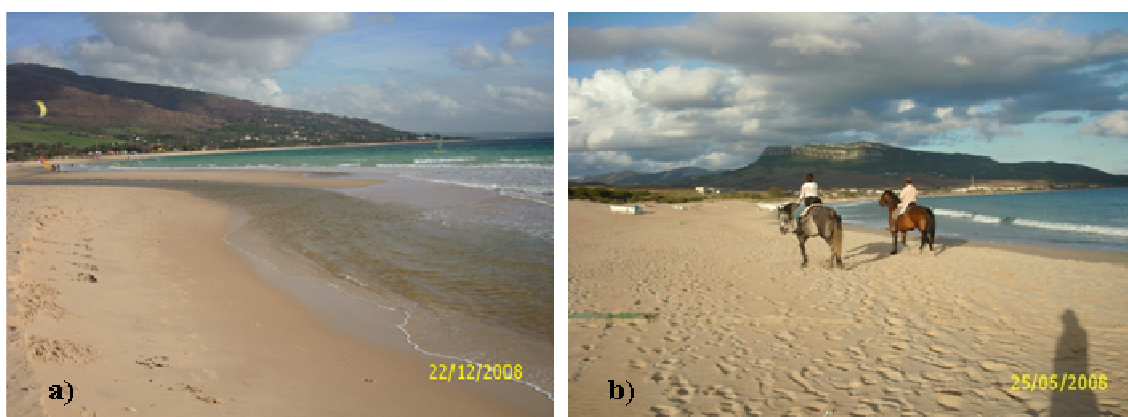


Fig. 3.7. Esquema de las unidades ambientales e infraestructuras existentes en la Ensenada de Valdevaqueros (Fuente: Plan de Gestión y Conservación de los hábitats dunares del litoral de Cádiz; Gallego Fernández et al., 2006)

La ensenada de Valdevaqueros puede considerarse una bahía en Z por su forma asimétrica, disposición y ángulo de ataque del oleaje. Tiene una tendencia relativamente estable, donde el balance de aportes y pérdidas de sedimento se encuentra en equilibrio. En bajamar aflora una plataforma rocosa a lo largo de todo el frente litoral, que se extiende hacia mar adentro. Esta plataforma juega un doble papel dinámico: por un lado protege la costa de la erosión, ya que las olas rompen en su borde externo y llegan a la playa con menor energía y removilizando menos el sedimento; y por otro, ante la llegada de temporales marítimos supone una trampa de sedimentos en la zona submareal, que retiene arena durante las épocas de oleaje de buen tiempo, formando un sistema de barras de arena en media luna (MARM, 2008).

En dicha ensenada pueden establecerse dos principales unidades geomorfológicas: una zona dunar activa y una zona dunar estabilizada, a las que se añaden zonas construidas y la desembocadura del Río Valle. Todas estas unidades cubren un total de unas 160 hectáreas. Dentro de estas dos unidades, se desarrollan las siguientes unidades ambientales (Fig. 3.7): la playa, el frente dunar activo, la duna transgresiva activa, la duna secundaria fijada por *Retama monosperma*, pasillos y áreas de deflación, así como zonas de enebro, retamar y pinar, cuyas características ecológicas pueden consultarse en Gallego Fernández et al. (2006).

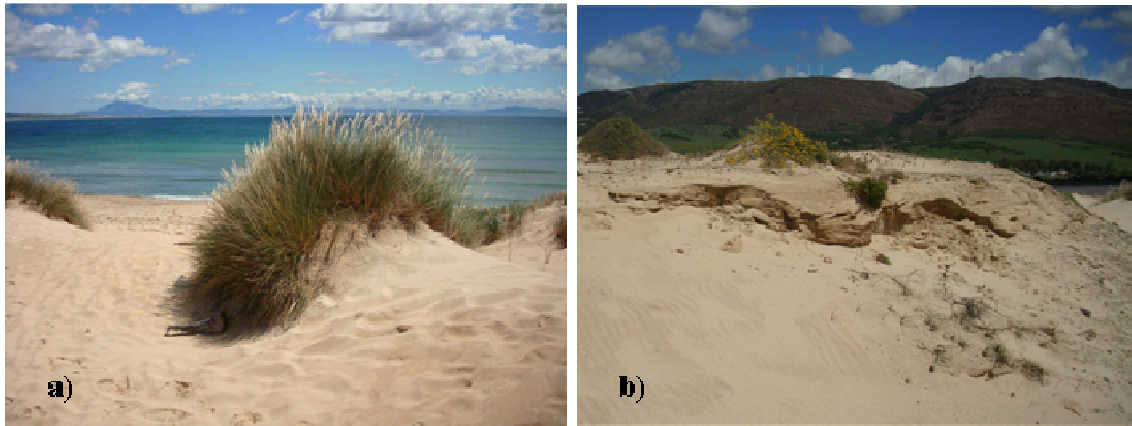
- *Playa*: Formada por una franja arenosa de unas 9 ha de extensión, sometida a la influencia directa de las mareas y el oleaje, donde no existe vegetación. Son importantes los usos y actividades que allí se llevan a cabo durante todo el año (Fig. 3.8).



*Fig. 3.8. Playa de Valdevaqueros; a) Comunicación de la laguna costera con el mar; b) Usos habituales de la playa a parte del baño: paseos a caballo y kitesurfing*



- *Frente dunar activo*: Formado por dunas primarias situadas al pie de la duna transgresiva activa en el sector este y con las dunas secundarias activas del sector central y suroeste (Fig. 3.9). Las dunas están enfrentadas directamente a la acción marina, predominando procesos de erosión y acumulación de arenas. El frente dunar del sector este ocupa una pequeña superficie (1.800 m<sup>2</sup>). Presenta una cobertura de vegetación de un 40%, siendo las especies dominantes *Ammophila arenaria* y *Elymus farctus*, y estando también presentes otras especies como *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias*, *Othanthus maritimus*, *Salsola kali*, *Panocratium maritimum*, *Polygonum maritimum* y *Lotus creticus*, *Echium gaditanum*.



*Fig. 3.9. Frente dunar activo de la zona central (a) y suroeste (b)*

- *Duna transgresiva activa*: Esta unidad, objeto de estudio de la presente tesis, está formada por una duna transgresiva de unas 20 ha, cuyo avance en la dirección sureste-noroeste está invadiendo el pinar adyacente. Debido a que presenta una movilidad de sustrato muy elevada, por los fuertes vientos de levante y el aporte sedimentario desde la playa, la vegetación propia de esta unidad es prácticamente inexistente (Fig. 3.10).



Fig. 3.10. Perspectiva de la duna transgresiva activa desde la playa

- *Duna secundaria con retama monosperma*: Se encuentra representada en dos zonas separadas ocupando unas 0,5 ha; una en el extremo nororiental, junto al aparcamiento, y otra en la zona suroccidental tras la playa o tras el frente dunar activo. Presenta cierta actividad de movimiento de arenas con elevada cobertura de *Retama monosperma* (Fig. 3.11).



Fig. 3.11. Duna secundaria con retama monosperma

- *Pasillos y áreas de deflación*: Son zonas de elevada movilidad de sustrato que penetran hacia el interior del sistema desde el frente dunar, en la misma dirección que los vientos dominantes. Situadas en el extremo suroccidental de la ensenada, comprendiendo unas 5,8 ha, la dinámica predominante es la transferencia de

arenas. Los pasillos presentan una morfología característica en forma de medio cañón, con una anchura de unos 10 a 75 m y una longitud de 100 a 400 m. La vegetación que aquí se desarrolla es básicamente herbácea, con coberturas menores del 40%, estando presentes esqueletos de pinos muertos por desecación, así como individuos escasos y dispersos de matorral como la sabina negra (*Juniperus phoenicea*) o la retama (*Retama monosperma*). Esta morfología hace que el viento alcance unas velocidades muy altas que, en determinadas circunstancias, desmantela completamente las arenas de origen eólico, apareciendo en superficie el material autóctono de base margoso y formando así áreas de deflación desmanteladas de arena (Fig. 3.12).



Fig. 3.12. Áreas de deflación y afloramiento del sustrato margoso

- *Enebral*: Es una formación vegetal dominada por *Juniperus oxycedrus*, situada en la zona dunar estabilizada del tramo suroccidental de la ensenada. Esta unidad se corresponde con el único tipo de formación vegetal autóctona de este sector costero, además de la vegetación psammófila de dunas primarias y secundarias (Fig. 3.13a).
- *Retamar*: Se corresponde con plantaciones de *Retama monosperma* realizadas en alta densidad sobre el manto arenoso que había tras la duna activa. Es una unidad en vías de desaparición debido al avance de la duna transgresiva, y que en los últimos 17 años ha perdido más de 3 ha de superficie (Fig. 3.13b).

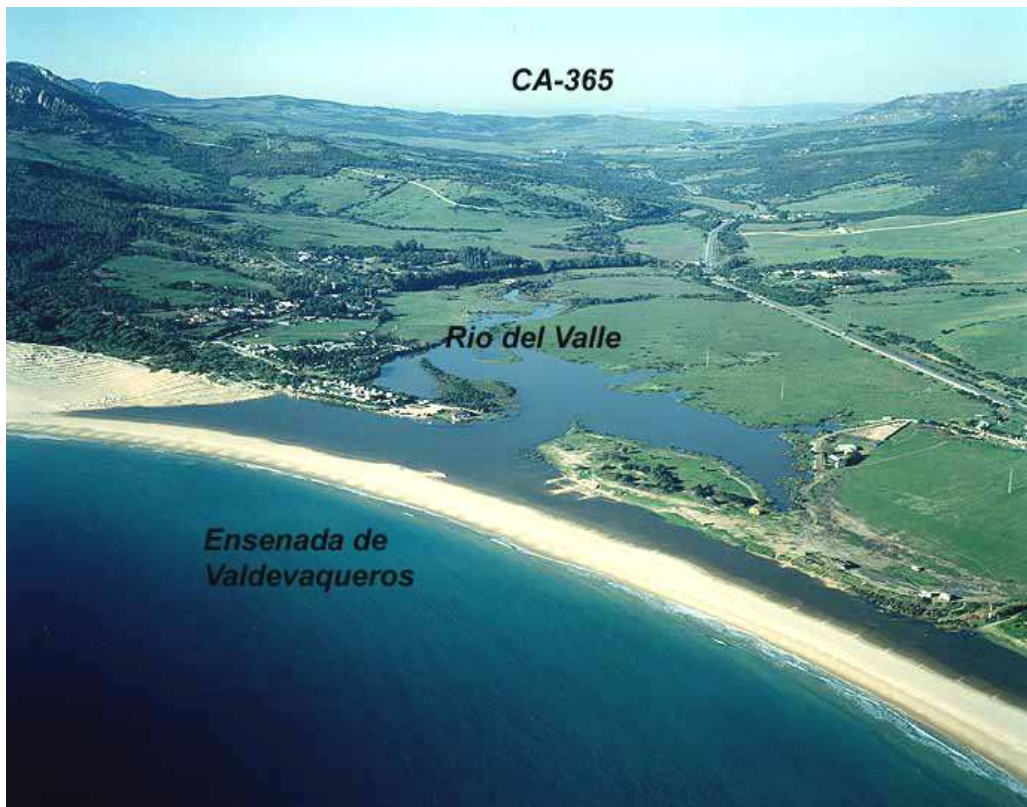
- *Pinar*: Unidad ambiental dominada por la especie arbórea *Pinus pinea* plantada en los años 1950 con el objetivo de estabilizar las arenas. La densidad de pinos es muy alta, existiendo una elevada superficie hacia el suroeste donde la cobertura de copa es del 100% (Fig. 3.13b).



*Fig. 3.13. a) Enebral en la zona suroccidental de la ensenada; b) Retamar y pinar tras la duna activa*

El escaso flujo experimentado por el Río Valle, el pequeño rango mareal y la baja energía del oleaje producen el cierre total de la ensenada por la flecha, dando lugar a un pequeño charcón o albufera en progresiva colmatación. Esta laguna costera no tiene una extensión muy grande (unas 2,9 hectáreas en su mayor extensión), pudiendo llegar a secarse durante la estación estival debido a la evaporación (Moreno et al. 2010). Con una profundidad inferior a 0,5 m en mareas bajas y superior a 1,5 m en mareas vivas (Del Río, 2007), presenta aguas salobres parcialmente alimentadas por el escaso caudal del río, cuyo flujo llega hasta el mar por infiltración a través de la barra arenosa que cierra la bahía (Fig. 3.14). En épocas invernales, la avenida fluvial y el oleaje de poniente suelen romper la flecha-barrera, abriendo canales de comunicación de la laguna con el mar, que se cierran nuevamente durante las épocas de buen tiempo.

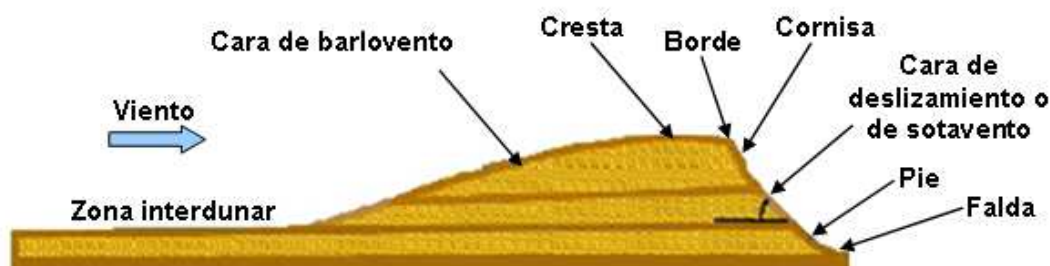




*Fig. 3.14. Fotografías oblicuas de la desembocadura del Río Valle y flecha litoral en la playa de Valdevaqueros, tras un periodo de lluvias (Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, MARM; [www.marm.es](http://www.marm.es))*

### **3.2. La duna activa de Valdevaqueros**

El sistema dunar de Valdevaqueros se caracteriza principalmente por desarrollar una duna creciente o transversal, de escala hectométrica, en la que el viento fluye prácticamente perpendicular a la línea de cresta. En ausencia de vegetación y otras limitaciones topográficas, una sección transversal de dicha duna puede ser representada por la Fig. 3.15.



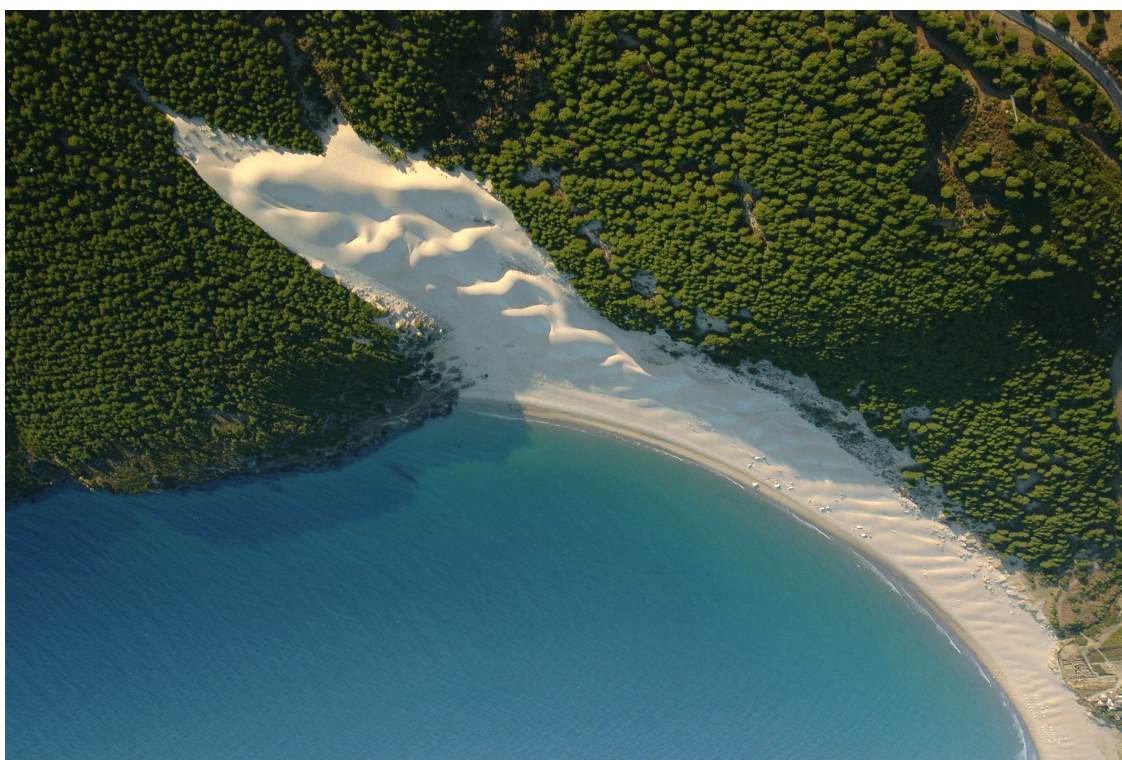
*Fig. 3.15. Sección transversal de una duna creciente (Fuente: Ley et al. 2007)*

Actualmente, la duna de Valdevaqueros posee una longitud de 700 metros y una anchura media de 300 metros, aunque la anchura máxima está en torno a 350 metros en la zona de mayor acreción. Presenta una movilidad de sustrato muy elevada debido a los fuertes vientos de levante y al aporte sedimentario desde la playa. Los sedimentos que alcanzan la cresta dunar de Valdevaqueros pertenecen a arenas medias compuestas principalmente de cuarzo, tratándose de materiales bien clasificados.

Los sistemas dunares de Bolonia (Fig. 3.16) y de Valdevaqueros (Fig. 3.17), son sistemas dunares transgresivos que forman parte de un antiguo campo dunar de by-pass que traspasaba Punta Paloma (tal como podrá observarse en la Fig. 3.21, en la sección de antecedentes históricos). Los alrededores son zonas mínimamente habitadas, sin asentamientos urbanos importantes, pero sí con áreas de gran importancia histórico-cultural, destacando las ruinas romanas de Baelo-Claudia junto a la playa de Bolonia (Román-Sierra et al., 2004). Ambos sistemas dunares forman parte del Parque Natural del Estrecho y, además, la duna de Bolonia fue declarada Monumento Natural en 2001. Estos dos campos dunares comparten similares características, estando constituidos por un manto de arenas eólicas de levante que se han desarrollado al margen de diversas



medidas (instalación de empalizadas, plantación de un bosque de pino piñonero, etc.) con el objetivo de frenar de algún modo el avance del frente dunar. En el sistema dunar de Bolonia pueden observarse cierta diversidad de formas, algunas poco habituales en las costas españolas, como los barjanes, deparados por cubetas de delación. Todas estas morfologías presentan una alta variabilidad dinámica, sobre durante los temporales de levante. Bajo estas condiciones, la duna se desplaza hacia el interior, remontando el relieve del cabo Camarinal, situado en su extremo occidental (Fig. 3.16).



*Fig. 3.16. Diferentes perspectivas del sistema dunar de Bolonia, en 2003.*





*Fig. 3.17. Diferentes perspectivas del sistema dunar de Valdevaqueros, en 2003*

La duna de Valdevaqueros es un campo dunar transgresivo especial, con una situación geográfica y condiciones meteorológicas particulares, donde el transporte eólico sedimentario domina sobre otros procesos. Su crecimiento se produce desde el SE hacia el NW, desarrollando unas crestas orientadas perpendicularmente a la dirección del flujo de viento dominante. La dimensión de la duna de Valdevaqueros hace que se trate de una de las más grandes de España, con una altura media de 40 metros por encima del nivel de bajamar viva equinoccial (Fig. 3.18).





Fig. 3.18. Fotografía aérea de la Duna de Valdevaqueros, donde se aprecia la invasión de la duna sobre la carretera en la actualidad (Fuente: Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico, 2010)

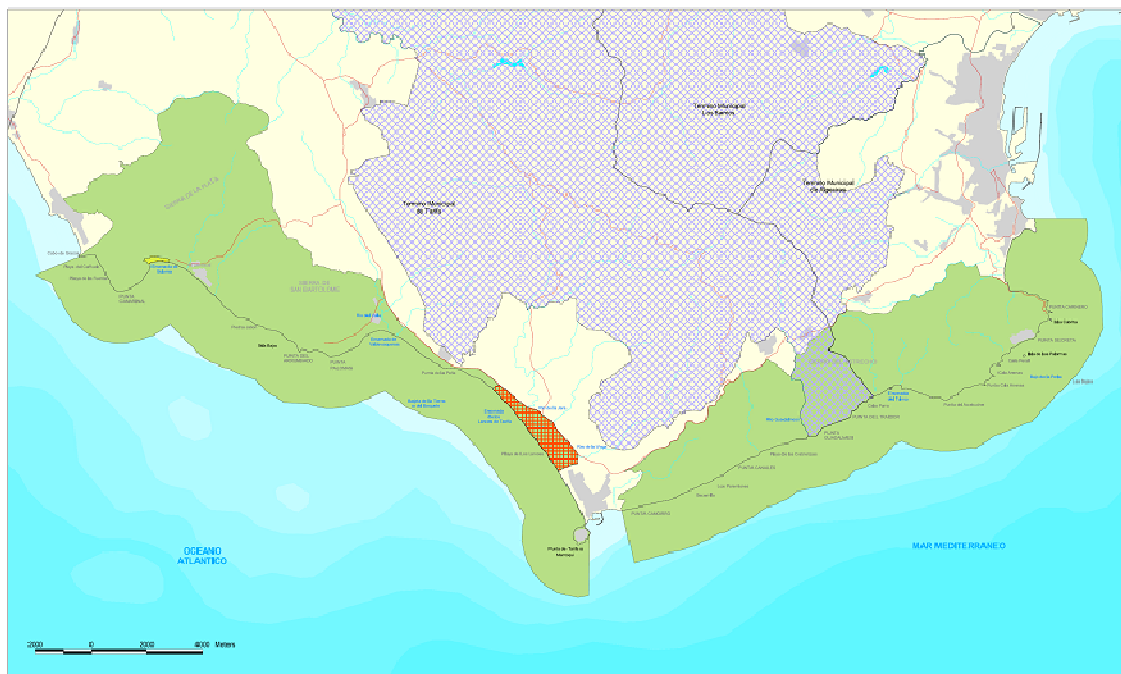
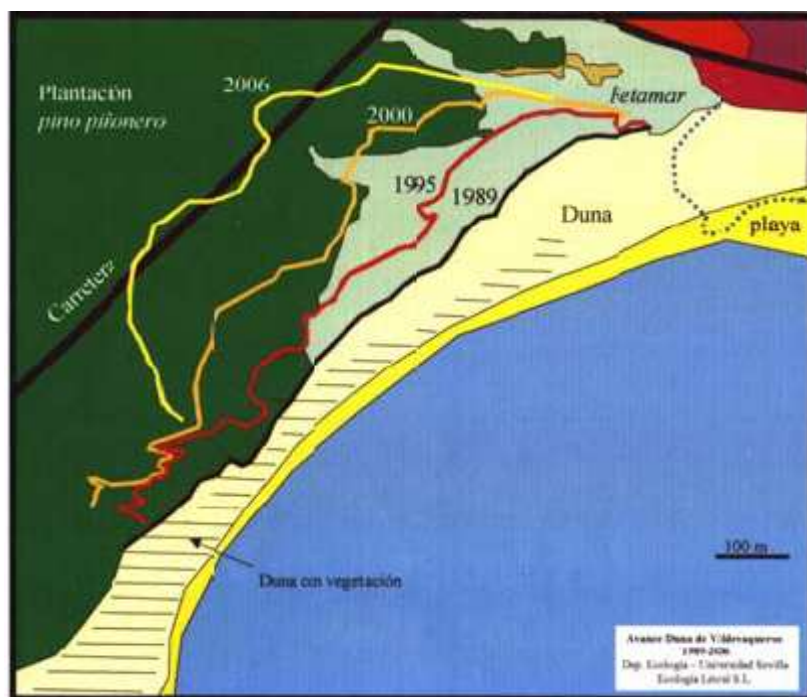


Fig. 3.19. Red de Espacios Naturales Protegidos del litoral de Tarifa y Algeciras. En color verde se muestra el área perteneciente al ámbito de aplicación del Plan de Ordenación de Recursos Naturales (PORN), la zona anaranjada corresponde al Paraje Natural de la Playa de los Lances, la zona amarilla es el Monumento Natural de la Duna de Bolonia y el área mallada en azul marino abarca el Parque Natural de los Alcornoques (Fuente: Consejería de Medio Ambiente; [www.juntadeandalucia.es](http://www.juntadeandalucia.es))

La Duna de Valdevaqueros forma parte de un espacio de la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA), concretamente el Parque Natural del Estrecho (Fig. 3.19), declarado en 2003 y que consta de 18.931 ha (9.684 de las cuales son de ámbito terrestre). Según esta zonificación, la duna de Valdevaqueros se encuentra incluida en la zona de regulación especial B1, por ser una zona incluida en el Dominio Público Marítimo y Terrestre, de alto valor ambiental con bajo grado de antropización, donde existe un uso público del suelo que se desarrolla sin que haya producido una pérdida importante de los valores naturales, culturales y paisajísticos.

Esta unidad ha experimentado un importante aumento de superficie en los últimos años debido al avance del frente dunar unos 300 m hacia el interior (Fig. 3.20).

Tal como se extrae del Plan de Gestión y Conservación de los hábitats dunares del litoral de Cádiz elaborado por Gallego Fernández et al. (2006), la Duna de Valdevaqueros pasó de ocupar una superficie de 78.049 m<sup>2</sup> en 1989 a ocupar una superficie de 144.000 m<sup>2</sup> en 1995 y 160.977 m<sup>2</sup> en 2001. En 2005 se georreferenció en campo el nuevo límite de la duna, observándose un incremento del 38.84 % en su superficie (223.501 m<sup>2</sup>). De este modo, la duna avanzó hacia el noroeste a una velocidad promedio de 9.090 m<sup>2</sup> sobrepasando los límites de la carretera A-2325.



*Fig. 3.20. Esquema del avance de la duna de Valdevaqueros desde 1989 a 2006 (Fuente: Plan de Gestión y Conservación de los hábitats dunares del litoral de Cádiz, Dep. Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla, 2006)*

### 3.2.1. Antecedentes históricos

La duna de Valdevaqueros forma parte de un antiguo campo de dunas móviles que hasta mediados del siglo XX se extendía, en dirección Este-Oeste, desde la ensenada de Valdevaqueros, remontando la Sierra de San Bartolomé a unos 200 m de altitud hasta la playa de Bolonia, situada varios kilómetros hacia el Este (Fig. 3.21). Dicho campo dunar estaba formado por arenas transportadas por vientos de levante de gran intensidad (MARM, 2008).

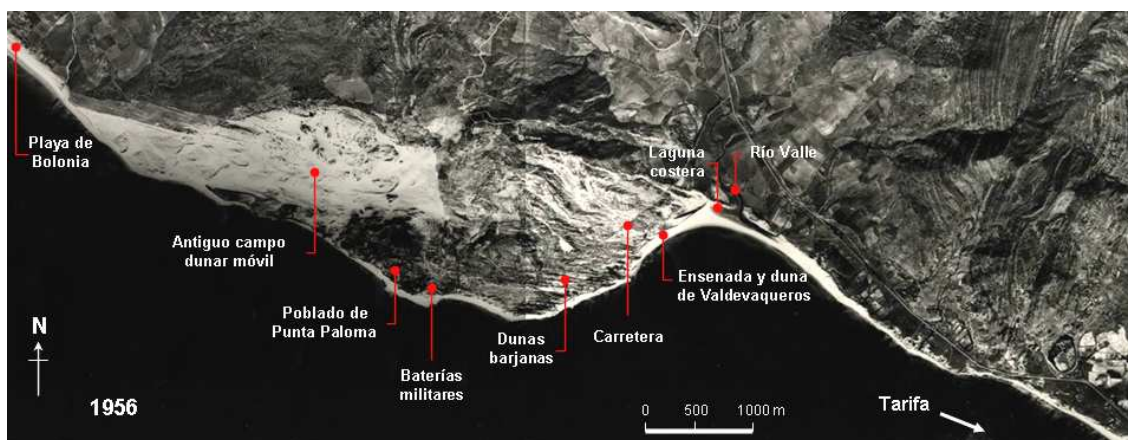


Fig. 3.21. Unidades geomorfológicas de la zona de estudio (fotografía: vuelo americano 1956). (Fuente: Navarro et al., 2011)

En los años 30 existía ya una incipiente acumulación de arena en la parte alta de la Ensenada de Valdevaqueros. Por aquellas fechas, con motivo de la construcción de unas baterías de cañones militares en Punta Paloma, se comenzaron a colocar obstáculos en la duna provocando su crecimiento paulatino. El objetivo era impedir el movimiento de arenas hacia dichas baterías militares, cortando el aporte de arena que, proveniente de la playa, alimentaba el mencionado campo de dunas móviles que constituía entonces toda la ladera de San Bartolomé, desde Paloma Alta hasta el mar y desde la ensenada de Valdevaqueros hasta la de Bolonia, una extensa zona hoy totalmente cubierta de vegetación.

Desde principios del siglo XX han sido numerosos los esfuerzos por fijar este campo dunar que amenazaba las instalaciones militares de Punta Paloma. A mediados del siglo



pasado se construye una duna costera artificial y se fijan los arenales de las laderas de San Bartolomé con pino piñonero (*Pinus pinea*) y retama blanca (*Retama monosperma*).

Desde ese momento, han sido objeto de diversas actuaciones para reducir su avance hacia el pinar adyacente, lugar hacia donde existe un transporte natural causado por el viento de levante. Las primeras actuaciones llevadas a cabo durante esos años consistieron básicamente en la instalación de varias filas de unas estructuras construidas en hormigón armado de 1 m de altura (Román-Sierra et al. 2004), tal como se aprecia en la Fig. 3.22. Estas estructuras no sólo no frenaron el avance dunar sino que alteraron gravemente el perfil natural del ecosistema, ya que al carecer de ningún tipo de porosidad la arena quedaba totalmente retenida en esas zonas, escapando de ser distribuida por el viento de forma natural y evitando de este modo que las especies vegetales pudieran desarrollarse, tal como se ha demostrado en posteriores investigaciones, siendo la porosidad óptima de los captadores de arena de aproximadamente el 50% (una detallada revisión bibliográfica acerca de la eficiencia de sistemas de estabilización de arenas puede consultarse en Phillips y Willetts, 1978).



*Fig. 3.22. Estructuras de hormigón colocadas a mediados del s. XX (Fuente: Román-Sierra et al., 2004)*

Posteriormente, en los años 60, estos sistemas se sustituyeron por la acción de mantener erguidas vallas de caña cortada que frenaban la capacidad de transportar eólicamente la arena, provocando su acumulación, sobre todo, tras las vallas. Después de cada temporal, personal especializado renovaba las vallas, que solían quedar parcial o totalmente tapadas tras el fuerte viento. Posteriormente se comenzó a utilizar también varas de mimbre y tablestacado de eucalipto, menos trabajoso en su manipulación y colocación que la caña, pero a su vez menos efectivo, según algunos, por su menor capacidad de retención de arena (Román-Sierra et al., 2004).

La fijación artificial del campo dunar tuvo un doble efecto: por una parte se consiguió frenar el aporte de arena proveniente de la playa hacia la ladera de Punta Paloma y por otro se inició un proceso de regresión marina, es decir, un lento avance de la línea de costa hacia el mar, pues al fijar la duna y aumentar artificialmente su altura, aumentó también la pendiente de barlovento, provocando una mayor sedimentación de arena en la base, junto a la playa. Las avenidas del río del Valle, los temporales y las corrientes de oleaje transversal y longitudinal se encargaron luego de transportar y volver a sedimentar esta arena supuestamente en el fondo marino somero.

La única zona del campo dunar que permaneció activa, a pesar de los trabajos de fijación realizados, fue la duna de Valdevaqueros, que desde entonces ha crecido en volumen y movilidad (Fig. 3.23).

Actualmente, tal como se puede observar en la Fig. 3.24, la duna ha rebasado la carretera interior que da acceso a las instalaciones militares, lo que está acelerando actuaciones y proyectos de fijación del campo dunar móvil.



*Fig. 3.23. Fotografía oblicua del ecosistema dunar y su entorno en 1992 (Fuente: Dirección General de Costas)*



*Fig. 3.24. Fotografía aérea reciente de la duna con los sistemas de captación*

Por otra parte, el estado actual de la duna de Valdevaqueros ha venido en parte motivado por un conjunto de causas, entre las que se pueden citar las siguientes (Navarro et al., 2007):

- Con la entrada en vigor de la Ley de Costas 22/1988, del 28 de Julio, se abandonó la práctica de extracción de arena del frente interior dunar, por parte de particulares, hecho que controlaba de forma periódica el avance dunar. La prohibición de dichas extracciones ayudó a que el volumen de la duna experimentara un fuerte y continuo aumento.
- En las dunas embrionarias estabilizadas se produce un desmantelamiento de la cubierta vegetal, debido a la emigración de la arena bajo la que se sustenta, inhibiéndose su capacidad de fijación dunar y retención sedimentaria.
- En la parte Sur de la Duna de Valdevaqueros, junto al río Valle, se produce erosión eólica, quedando la superficie invadida por las aguas estuarinas del propio río, formándose una laguna litoral que ocupa parte de la playa.

A partir de la aprobación de la Ley de Costas, fue la Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico quien se encargó del control y mantenimiento de la duna, aplicando diversas medidas para frenar el avance dunar, como extracciones y movimientos de arena, suavizados del perfil y establecimiento de técnicas de restauración. En 1996, debido al estado de degradación de las zonas dunares litorales, se llevó a cabo un estudio fruto del convenio entre la Demarcación de Costas de Cádiz y el Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla: *Conservación y Plantaciones en Campos Dunares de Bolonia y Valdevaqueros en el Termino Municipal de Tarifa (Cádiz)*. En concreto, los objetivos de dicha Asistencia Técnica para el sistema dunar de Valdevaqueros consistían en reducir la velocidad de avance del frente interior de la duna, la erosión de las superficies dunares vegetadas, así como la extensión de la laguna litoral y el aporte de arenas a la duna, tal como se detalla más adelante.

Las medidas aplicadas incluían, por regla general, sistemas de protección y sistemas de regeneración. Los sistemas de protección se basaron en la instalación de pasarelas de madera y vallados o cerramientos en zonas donde se pretendía evitar la acción del pisoteo por los usuarios de la playa (Fig. 3.25).





Fig. 3.25. Instalación de sistemas de protección

Por otro lado, entre los sistemas de regeneración se encuentra la instalación de captadores pasivos de arena y la revegetación con plantas dunares. La vegetación que se ha estado utilizando para la fijación del cordón dunar ha consistido en la plantación de especies “estructurales” (García Mora et al., 2000) como el barrón (*Ammophila arenaria*), una gramínea perenne procedente del vivero de Laredo (Cantabria), propiedad del Ministerio de Medio Ambiente, y arbustos como la retama blanca (*Retama monosperma*).

En los sistemas dunares naturales las plantas de barrón se reproducen principalmente por rizomas subterráneos (Fig. 3.26). Sin embargo, en vivero se puede reproducir mediante semilla. El barrón ha sido casi la única especie de gramínea utilizada en la estabilización de sistemas dunares, motivo por el cual es la especie más ampliamente cultivada. Las semillas se suelen cultivar en viveros con una temperatura y humedad adecuadas. Una vez las semillas germinan y el tamaño de las plántulas alcanza de 15 a 20 cm (normalmente tras 1 o 2 años), se procede a la plantación manual en el exterior, excavando hoyos de unos 25 cm de profundidad y dejando la planta enterrada unos 10 cm. La época apropiada para realizar las plantaciones está comprendida entre mediados



de octubre y mediados de marzo, excluyendo los momentos muy fríos (normalmente entre mediados de diciembre y mediados de febrero). En condiciones naturales, el crecimiento y vigor de estas plantas es óptimo con un aporte de aproximadamente 30 cm al año. Más información acerca del proceso de siembra, recolección y plantación de barrón puede consultarse en el *Manual de restauración de dunas costeras* (Ley et al. 2007).

Por su parte, los captadores de arena utilizados han sido empalizadas normalmente de ramas muertas de plantas, como mimbre (Fig. 3.27), cañas, matorrales, etc., y tablas de madera o tablestacados (Fig. 3.28). Su función es reducir la velocidad del viento por fricción y con ello, disminuir la carga de arena transportada, propiciando la acumulación de arena, aumentando la altura y anchura del depósito. Estos tipos de materiales son biodegradables, aunque en el caso de las ramas muertas, éstas tardan menos tiempo en degradarse, aumentando el contenido en materia orgánica del suelo para la vegetación que posteriormente se instale.



*Fig. 3.26. Detalle del tallo y rizoma de una plántula de barrón (Ammophila arenaria)*



*Fig. 3.27. Instalación de captadores de mimbre seco*



*Fig. 3.28. Colocación de tablestacas de madera*

Con captadores flexibles, como los formados por varas de mimbre, la sedimentación tiene lugar a sotavento de las filas de captadores y en una anchura de ocho veces su altura, por lo cual, la distancia entre filas suele ser aproximadamente de ocho metros. En el caso de las tablestacas, la sedimentación es mucho más irregular que en los captadores flexibles, por lo que su funcionamiento y utilización no es similar a la de éstos. No obstante, la utilización de tablestacados ha sido más frecuente en la parte alta de la duna, concretamente sobre la cresta y en el borde de la pendiente a sotavento, ya que lo que se pretendía era evitar el avance horizontal de la duna provocando un aumento en altura de ésta. Debido a las propiedades de estos captadores, los flexibles producen una acumulación más homogénea y tendida, consiguiendo una topografía más aerodinámica y estable que en el caso de las tablestacas. Además, la vegetación coloniza mucho mejor las arenas estabilizadas con captadores flexibles que con tablestacas, debido a que estabilizan la superficie reduciendo la erosión por el viento. Por este motivo, este tipo de captadores flexibles se han ido instalando en la parte baja de la duna, paralelos a la línea de costa, para formar una acumulación más natural que permita la estabilización mediante vegetación, tal como puede apreciarse en la Fig. 3.29.



*Fig. 3.29. Distintos tipos de captadores en la Duna de Valdevaqueros (año 2006)*



La función de estos captadores es reducir la velocidad del viento por fricción y, con ello disminuir la carga de arena transportada, consiguiendo la acumulación de arena y aumentando el volumen del depósito. Estos sistemas contrarrestan la erosión eólica y aportan una mayor estabilidad al depósito arenoso. La eficiencia en la acumulación de arenas y la morfología de las dunas así formadas depende de muchos factores. Por una parte, obedece al tipo de sistema de captación (porosidad, altura, inclinación y número de filas de captadores y distancia entre las mismas) y por otra, a las características de la zona donde se sitúan (la superficie de arena seca susceptible de ser transportada, la velocidad del viento, y características topográficas y del sedimento movilizado). En general, los captadores porosos son más efectivos que los sólidos ya que estos últimos producen depósitos menos estables y pueden provocar turbulencias. Savage y Woodhouse (1968) aconsejaron que los captadores tuvieran un 50% de porosidad.

Más recientemente, la Dirección General de Costas y concretamente la Demarcación de Costas en Andalucía Atlántico, ha ido realizando en los últimos años, proyectos de conservación y recuperación ambiental del sistema dunar de Valdevaqueros, así como algunos estudios en colaboración con otros organismos. Estos proyectos han consistido, a grandes rasgos, en la realización de extracciones de áridos y su posterior transporte a otras playas o zonas, así como en establecimiento de diversos sistemas de protección y restauración. Algunas de estas prácticas vienen resumidas a continuación:

*- Estabilización de las dunas de Bolonia y Valdevaqueros (1993):*

Las obras consistieron en la instalación de empalizadas formadas por cañizo redondo, para que la pantalla colocada evitara el paso de la arena. La longitud máxima de estas empalizadas fue de 100 m, dejando aberturas para facilitar el paso de los usuarios. La colocación se hizo equidistando 4 m entre una alineación y la otra y superponiendo los extremos de una alineación con la siguiente. En el lateral, con vistas al mar, de la plataforma de coronación de las dunas se situaron empalizadas formadas por tablestacas de madera de altura 1,75 m, con 0,50 m enterrados en la arena. El espaciado entre tablas fue de 0,035 m. La orientación de las empalizadas se hizo perpendicularmente a los vientos dominantes. Por primera vez, de manera experimental, se llevó a cabo la colocación de cañizo.

*- Conservación y plantaciones en las dunas Bolonia y Valdevaqueros (1996):*

Este estudio, llevado a cabo con la colaboración del Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla y con la empresa Ecología Litoral, tuvo

como objetivo presentar un conjunto de informaciones elaboradas sobre la situación ambiental del sector costero de dichas zonas, la elaboración de un modelo numérico de dinámica de la duna de Valdevaqueros así como un programa de gestión ambiental. Las actuaciones más importantes a destacar que se pusieron en práctica por dicho estudio en el sistema playa-duna fueron las siguientes:

- Retirada de los puntos más activos del frente dunar un volumen equivalente a 2/3 del aporte anual de la duna.
- Modificación de la morfología de la duna incrementando la cota y la pendiente de barlovento hasta reducir el transporte neto.
- Relleno, mediante tablestacado y acumulación, de las depresiones que rodeaban las superficies de vegetación dunar erosionadas.
- Revegetación por medio de siembra de las superficies degradadas, anteriormente estabilizadas así como nuevas zonas con *Ammophila arenaria* (Fig. 3.30; Fig. 3.31 y Fig. 3.32).
- Relleno de la laguna litoral con arenas extraídas del frente dunar y revegetación con plantas de medios salobres del estuario.
- Actuaciones de limpieza manual y con maquinaria.



*Fig. 3.30. Plantaciones de barrón en la duna de Valdevaqueros. Apertura de hoyos y colocación de la planta*



*Fig. 3.31. Estado de las plantaciones de barrón a los 2 años*



*Fig. 3.32. Estado de las plantaciones de barrón a los 3 años*



*- Recuperación Ambiental de la Duna de Valdevaqueros: (1999):*

El estado de la duna en 1999 ya era de relativa degradación motivada por las siguientes causas:

- La invasión del frente interior hacia el pinar adyacente, la carretera y cableado telefónico.
- En las dunas embrionarias estabilizadas se produjo un desmantelamiento de la cubierta vegetal.
- En la cola de la duna se produjo erosión eólica, quedando la superficie invadida por las aguas del estuario del arroyo de Valdevaqueros formándose una laguna litoral que ocupaba parte de la playa.

Las actuaciones consistieron en permitir la estabilización del sistema dunar impidiendo el avance de la duna sobre el pinar, mediante el traslado de arena procedente del frente interior de la duna a diferentes zonas de aportación; la recuperación de la cubierta vegetal, mediante la plantación de especies autóctonas propias de estos ecosistemas dunares y la limitación de la excesiva presión de visitantes en las zonas más frágiles. Dichas actuaciones consistieron en la extracción de arena del frente interior y su posterior traslado para reintegrarla a su uso como playa y a la cola de la duna que por entonces se encontraba muy degradada, trasladando el resto a las dunas embrionarias del cordón dunar y a la zona Este de la playa de Valdevaqueros, con objeto de recuperar el perfil de la misma. Por otra parte, se procedió a la instalación de captadores de arena. Además, se instalaron sistemas de protección, como cerramientos, una pasarela peatonal de acceso a la playa así como paneles y carteles informativos, para concienciar a los visitantes sobre la necesidad de conservación de los ecosistemas dunares. Asimismo, debido a su peligrosidad, se retiraron restos de tablestacado existente en la duna, basuras y escombros y se impidió el tráfico de vehículos todoterreno por la zona del pinar que daba acceso al frente de duna, mediante la colocación de grandes piedras.

*- Actuaciones en las Dunas de Valdevaqueros y Bolonia, Fase I Experimental (2003):*

Este proyecto, en el cual presté colaboración, consistió por una parte, en la realimentación de la playa con arena procedente del frente interior de la duna (unos 7.700 m<sup>3</sup>). Por otra parte, se procedió a la colocación de 700 m de tablestacas perpendiculares al viento, se proyectó la instalación de 4.000 m de captadores de mimbre sobre con una dotación de 5 kg/m, 700 m de cerramiento para evitar el pisoteo

por los usuarios de la playa y 120 m de pasarela. Asimismo, se plantaron 46.400 unidades de barrón en un área de 15.000 m<sup>2</sup>. En total, para ambos sistemas dunares, dicho proyecto contó con un presupuesto de 1.562.451,95 euros.

- *Actuaciones Dunas Bolonia y Valdevaqueros (2006):*

Las obras ejecutadas consistieron en el by-pass de arenas desde el frente dunar hacia el pie de duna y de la extracción del resto a playas próximas (8.420 m<sup>3</sup>). También se procedió a la estabilización mediante la colocación de tablestacas y empalizadas de mimbre, cerramientos de madera, así como a la revegetación de 30.000 m<sup>2</sup> con *Ammophila arenaria* (Fig. 3.33).

En la actualidad, estos los sistemas de protección y captación han seguido aplicándose, logrando cierto desarrollo de las plantaciones en el área más oriental de la duna, debido a que la acumulación de arenas ha sido visiblemente menor en esas zonas (Fig. 3.34).

Normalmente, los resultados derivados de los procesos de restauración ecológica en sistemas dunares se obtienen a medio plazo, debido a que es la propia naturaleza la que realiza la mayor parte del esfuerzo (el viento transporta la arena, la vegetación se establece y extiende su cobertura). En cualquier caso se trata de obras muy poco costosas en comparación con los costes de extracción y transporte de arenas al exterior del sistema. El presupuesto de una restauración puede ser variable en función de la superficie de actuación, de la dificultad del acceso y de otros factores, pero en general los precios no tienen una variación excesiva. A modo de ejemplo, se adjuntan en la Tabla 3.1.





Fig. 3.33. Esquema de la ubicación de plantaciones en la zona baja de la duna, en 2006 (Fuente: Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente)



Fig. 3.34. Estado actual de los sistemas de captación en el pie de duna en Abril 2010 (Fuente: Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico)

Tabla 3.1. Precios finales por unidad de obra en un proyecto de restauración

Unidad de obra	Precio
ml. de captador de vara de mimbre de 1,8 ml. de longitud con gasto de 3 Kg/ml incluso suministro e instalación completa	6,5 €
Ud. de planta de duna, barrón o grama marina ( <i>Ammophila arenaria</i> o <i>Elymus farctus</i> ) proveniente del vivero de plantas de duna de Loredo de la D.G.C., incluso transporte e instalación completa	0,8 €
Ud. de cartel informativo-descriptivo de 1,0 ml. x 1,5 ml. realizado en cuatro colores sobre chapa de aluminio anodizado, incluido diseño y elaboración, suministro y montaje de soporte con cimentación; con tejadillo e instalación completa	5.700 €
Ud. de cartel indicativo de 0,5 ml. x 0,4 ml. realizado en blanco y negro sobre chapa de aluminio anodizado, incluido diseño y elaboración, suministro y montaje de soporte e instalación completa	100 €
Ud. de cartel anunciador de la obra según la normativa vigente.	4.500 €
m <sup>2</sup> de pasarela llana con barandilla, de 1,5 ml. de anchura, de madera de pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> ) cepillada, con los bordes redondeados, y tratada en autoclave para una clase de riesgo 4, con penetración P4, con tornillería de acero inoxidable AISI 316 y angulares de acero inoxidable AISI 304, incluso instalación completa y transporte y parte proporcional de las terminaciones del último módulo.	280 €
m <sup>2</sup> de pasarela en escalera con barandilla, de 1,5 ml. de anchura, de madera de pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> ) cepillada, con los bordes redondeados, y tratada en autoclave para una clase de riesgo 4, con penetración P4, con tornillería de acero inoxidable AISI 316 y angulares de acero inoxidable AISI 304, incluso instalación completa y transporte y parte proporcional de las terminaciones del último módulo.	355 €
m <sup>2</sup> de eliminación de vegetación invasora (uña de gato, <i>Carpobrotus edulis</i> ).	3 €
ml. de cerramiento de protección dunar, en madera tratada (nivel 4) y malla metálica de 1,5 ml. de altura, incluso suministro e instalación completa.	22 €
ml. de cerramiento exterior formado por rollizos de madera de 10 cml. de diámetro. Con postes cada 2 metros, con 1 ml. de altura libre y 1 ml. incrustado en el terreno, con 2 diagonales de poste a poste, y pasamanos. Incluye transporte a pie de obra, colocación y tornillería formada por tirafondos de 8x150 mml.	55 €
m <sup>3</sup> de relleno de arena para restauración del perfil dunar en pasarelas.	22 €

Todas estas actuaciones, llevadas a cabo por la Demarcación de Costas, requirieron de la aplicación de una normativa específica, que a continuación se detalla:

- *Ley 2/2000 de 16 de junio de Contratos de las Administraciones Públicas.*
- *R.D. 22/1988 de 28 de julio sobre Costas.*
- *R.D. 1471/1989 de de 1 de diciembre del Reglamento para la Aplicación de la Ley de Costas.*
- *R.D. 1098/2001 de 12 de octubre del Reglamento para la aplicación de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas.*
- *Pliego de Prescripciones Técnicas generales para la ejecución de las Obras del Estado.*
- *Ley 7/1994 de 18 de mayo de Protección Ambiental.*
- *R.D.9/2000 de 6 de octubre que modifica el R.D. Legislativo 1302/1986 de Evaluación de Impacto Ambiental.*
- *Ley 40/1977 de conservación de Espacios Naturales.*
- *Decreto 292/1995 de 12 de diciembre de la Junta de Andalucía por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental.*
- *R.D. 1997/1995 de 7 de diciembre sobre Biodiversidad de Especies y demás normativa relacionada con el Medio Ambiente y relacionadas en el pliego de condiciones del presente proyecto.*


De este modo, la Demarcación de Costas ha sido la responsable de la extracción de unos 441.118 m<sup>3</sup> en un periodo de 15 años (hasta 2006) en una superficie de cerca de 200 metros lineales paralelos a la carretera, es decir, un total de 147 m<sup>3</sup> por metro lineal y por año (Muñoz-Pérez et al. 2009). A finales de 2009 ya se habían extraído 684.124 m<sup>3</sup> en casi 20 años desde 1991, lo que hace una media de 180 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Estos volúmenes de arena extraídos pueden consultarse en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Volúmenes extraídos de arena de la duna de Valdevaqueros para el periodo 1991-2009. Los cuadros coloreados corresponden a los periodos de toma de datos topográficos

**EXTRACCIONES DE ÁRIDOS (m³)**

AÑO	TOTAL	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1991	76.700	-	-	-	-	76.700	-	-	-	-	-	-	-
1994	174.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1995	12.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1996	15.000	-	-	-	-	-	5.700	-	-	-	-	-	-
1999	85.407	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	66.299	-	-	15.000	25.000	28.488	16.912	9.387	-	-	-	-	-
2002	94.787	-	-	-	-	-	-	-	3.600	-	-	-	-
2003	3.600	-	-	-	-	-	4.387	7.000	-	-	-	4.587	-
2004	7.000	-	4.587	-	-	-	6.750	-	-	4.700	7.700	7.700	-
2005	52.031	-	8.420	-	-	-	-	-	15.000	15.000	-	-	-
2006	30.000	-	-	-	-	-	-	-	15.000	15.000	-	-	-
2008	24.300	-	5.000	8.750	6.250	6.600	4.500	13.800	3.000	6.000	7.500	25.447	8.435
2009	42.500	8.965	9.011	9.687	4.232	42.500	-	-	15.200*	19.596	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>684.124</b>												

**CAMPAÑAS**

-  Largo plazo
-  Medio plazo mensual
-  Medio plazo bimensual
-  Corto plazo
-  Muy corto plazo

\*Las extracciones de Agosto 2009 se realizaron justo antes de la campaña de muy corto plazo



A pesar de todos estos esfuerzos y medidas, la duna ha continuado su avance sobre la carretera adyacente y aumentando el riesgo de que ésta permanezca cortada, siendo ésta la única vía de acceso para llegar al poblado de Punta Paloma. En la Fig. 3.35 se observan diferentes instantáneas tomadas durante las mencionadas actuaciones para lograr la restauración y estabilización dunar.



*Fig. 3.35. Trabajos de restauración y estabilización realizados en la duna de Valdevaqueros durante los últimos años: a) Estado de la duna antes de las intervenciones; b) Retirada de arenas; c) Remodelación fisiográfica; d) Colocación de tablestacado; e) Plantación de barrón; f) Sistemas de protección y vallado*

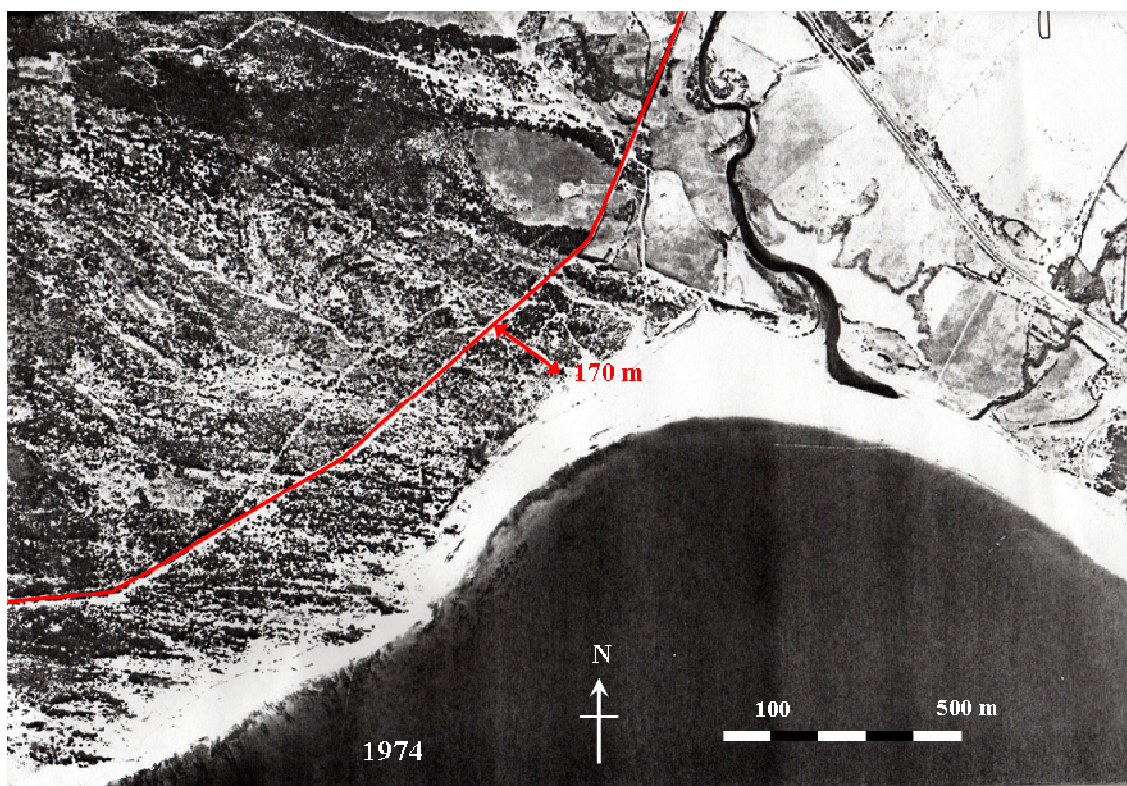
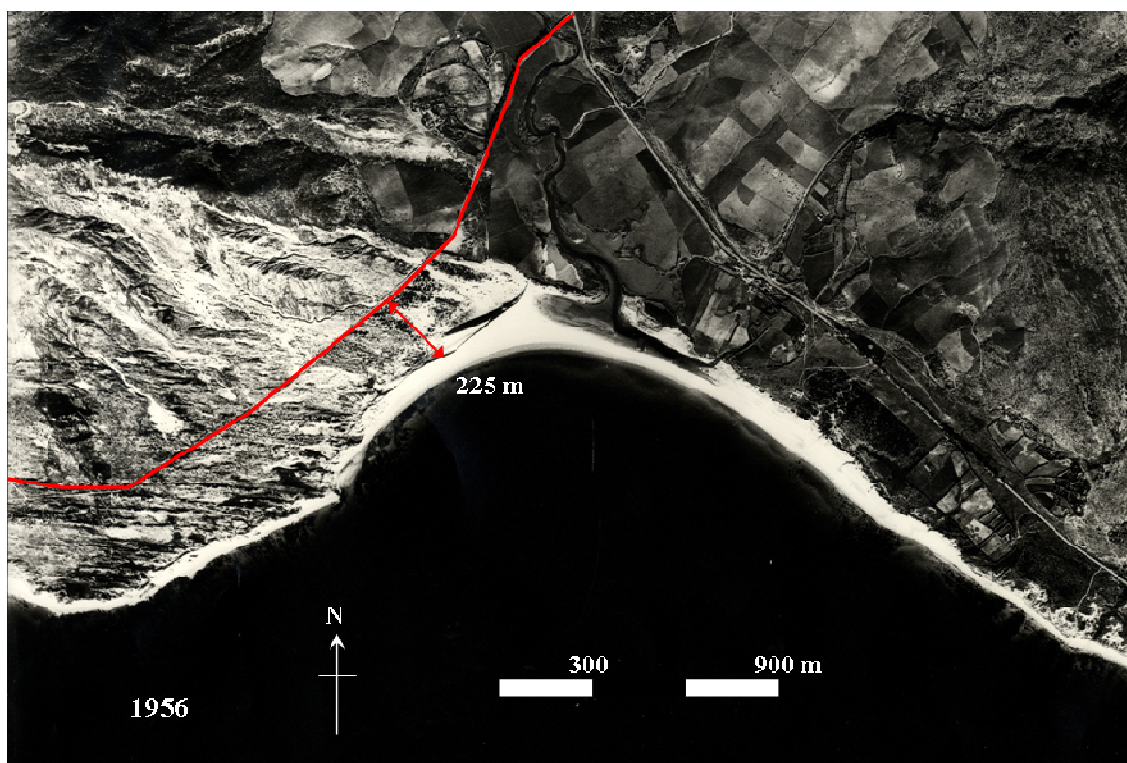
Por este motivo, la invasión progresiva de la duna sobre el pinar (Fig. 3.36), pero sobre todo sobre la carretera, hace que se origine un serio problema local que surge de la necesidad de integrar tanto intereses naturales como socioeconómicos en dicha zona.



*Fig. 3.36. Cara de avalancha de la duna sobre el pinar adyacente*

A continuación se muestra una comparativa entre varias fotografías aéreas tomadas entre 1956 y 2004 (Fig. 3.37). Nótese que el avance de la duna ha sido superior a los 225 metros en algunos puntos de la duna durante los últimos 50 años, considerando que en la imagen más reciente la duna ya había llegado a la carretera.







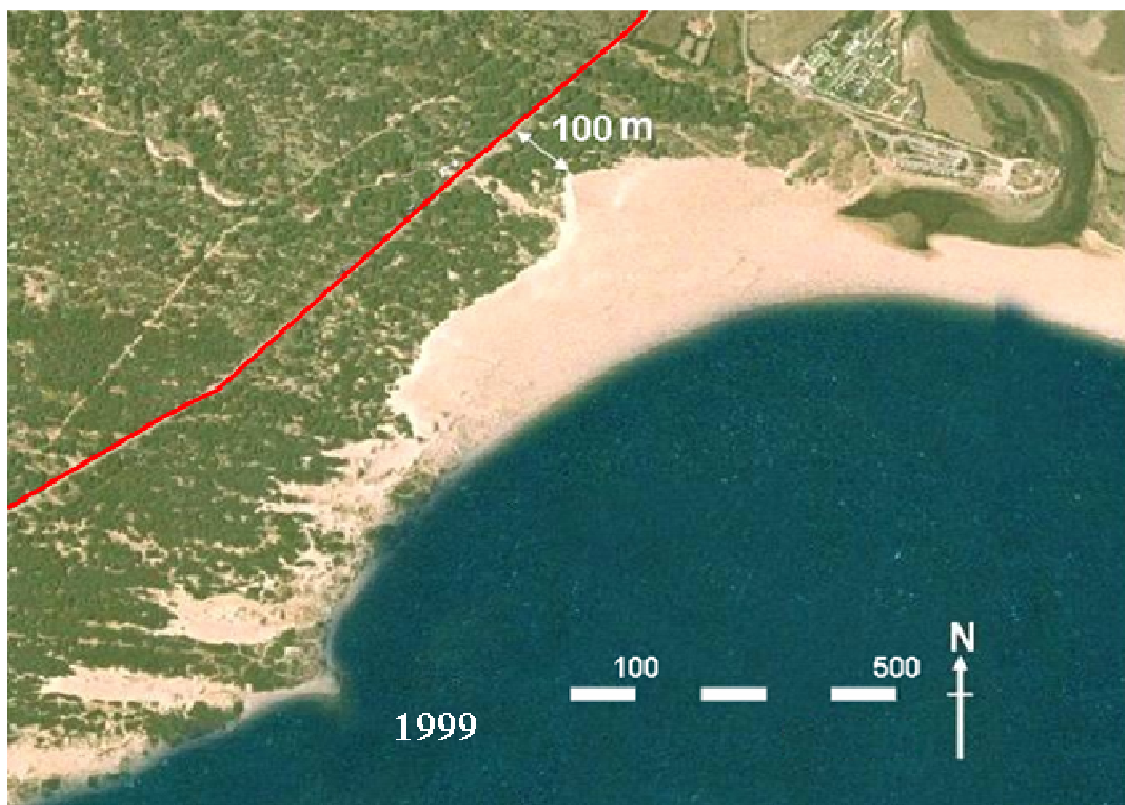






Fig. 3.37. Evolución de la duna de Valdevaqueros desde 1956 a la actualidad (Fuente: Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico, MARM)

### 3.2.2. Diagnóstico y alternativas planteadas

Siempre que aparece un problema en el litoral, surgen ciertas dudas a la hora de gestionarlo. Tal como propone Barragán Muñoz (2003) existe una lista de pautas a seguir en el análisis de este tipo de problemas. Por un lado, es importante conocer el origen, naturaleza y efectos del problema, espacios y recursos costeros afectados (ya sean naturales, culturales, equipamientos o infraestructuras, bienes y propiedades, públicas y privadas, personas, colectivos, grupos sociales o instituciones afectadas). Además, cabe plantearse acerca de por qué el problema es un problema (si se justifica el tiempo, trabajo y recursos empleados para su resolución o incluso si es conveniente considerar la acción cero, es decir, la no intervención). Por último, políticas, programas y planes relacionados con el problema (que integran el conocimiento de las acciones del pasado, presente y las previstas en el futuro por los distintos agentes sociales e institucionales).

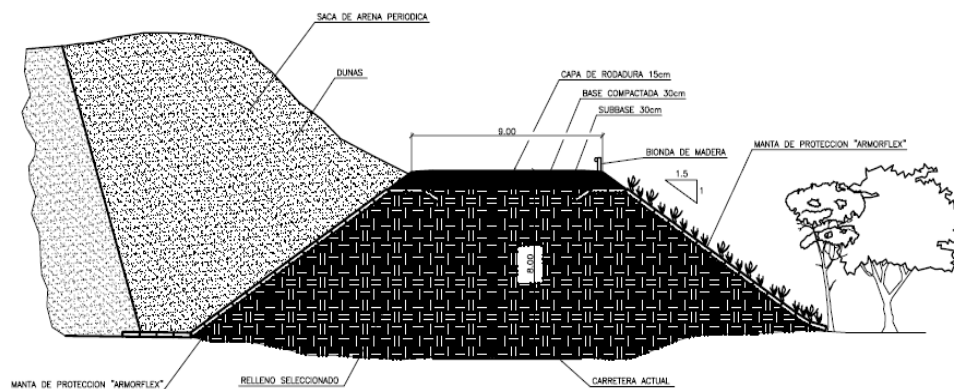
En el caso de la duna de Valdevaqueros, las primeras pautas parecen claras, se conocen las causas (naturales y antropogénicas), los efectos producidos por el continuo avance dunar, los espacios naturales así como los recursos materiales y sociales afectados. Sin embargo, las siguientes pautas no parecen ser tan evidentes, si nos planteamos porqué el problema es un problema (o si por el contrario se trata de una oportunidad) y cómo podría solucionarse éste, teniendo en cuenta los métodos empleados por la Administración en el pasado (sobre todo anteriores a la Ley de Costas de 1988), en la actualidad y cómo pueden enfocarse en un futuro.

A nivel ecológico, puede decirse que el estado de conservación del sistema dunar activo de Valdevaqueros es aceptable en las zonas que no han sufrido desestabilización. El elevado aporte de arenas provenientes del mar asegura el mantenimiento de los sistemas activos presentes, siendo una garantía para la restauración ecológica de los arenales interiores fijados. La zona activa presenta prácticamente todas las especies de flora y tipos de vegetación característicos de ecosistemas dunares existentes en el Golfo de Cádiz y además, la presencia de especies de plantas exóticas es poco relevante (Gallego Fernández et al., 2006). Si consideramos que la riqueza ecológica está basada en la presencia de flora autóctona, la pérdida de gran parte del pinar de reciente plantación por invasión de las arenas no supone una disminución de su singularidad.

Por otra parte, el soterramiento de la única carretera que se dirige al poblado de Punta Paloma, supone un problema desde el punto de vista social. En ese sentido y debido al carácter urgente de dicho problema, el Ministerio de Medio Ambiente (2005), a partir de un estudio que elaboró la consultora Giménez-Cuenca, planteó varias alternativas técnicamente viables y de bajo impacto ambiental para dar solución al corte e interrupción de la vía al Destacamento Militar y viviendas cercanas que viene produciéndose de forma cíclica y periódica a lo largo de los últimos años. Dos de las tres alternativas aprovecharían el trazado de la carretera existente, mientras que la otra se corresponde con un trazado alternativo.

*Alternativa I: Elevación de la carretera existente.*

Consiste en la modificación del nivel de la carretera en la zona afectada (Fig. 3.38). La obra se realizaría a lo largo de 500 metros y la carretera se elevaría unos 8 metros. Según la Demarcación de Costas, esta medida frenaría la capacidad de avance de la duna, siendo las extracciones de arena mucho más sencillas de llevar a cabo en un futuro. El presupuesto total ascendería a 1.740.153,19 €.



*Fig. 3.38. Alternativa I: Elevación de la carretera existente (MMA, 2005)*

*Alternativa II: Creación de un falso túnel.*

Dicha alternativa está basada en la protección de la carretera mediante la creación de un falso túnel (Fig. 3.39). El objeto sería facilitar la circulación de vehículos sin necesidad de llevar a cabo extracciones de arena. Como resultado, el desarrollo natural de la duna no se interrumpiría. Ésta sería la alternativa más cara, con un presupuesto de 2.190.507,16 €.

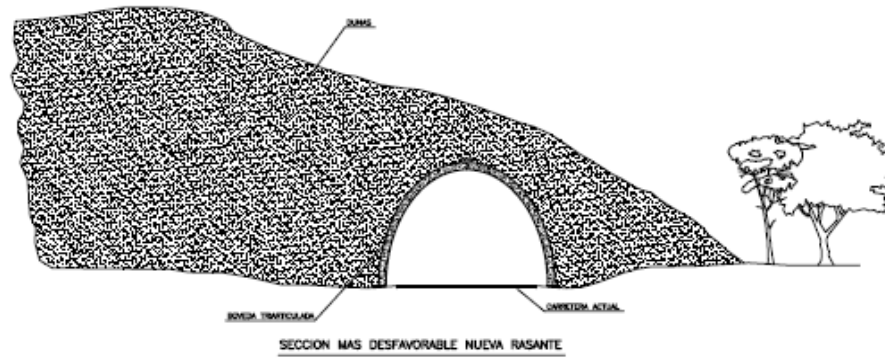


Fig. 3.39. Alternativa II: Creación de un falso túnel (MMA, 2005)

*Alternativa III: Construcción de una nueva carretera*

La tercera alternativa consiste en la reconstrucción de la carretera afectada por la duna. Esta actuación significaría el abandono de la actual carretera, dejando que la duna se desarrollara sin intervención alguna. La nueva ruta aprovecharía una carretera militar existente que se dirige a Punta Paloma (Fig. 3.40).

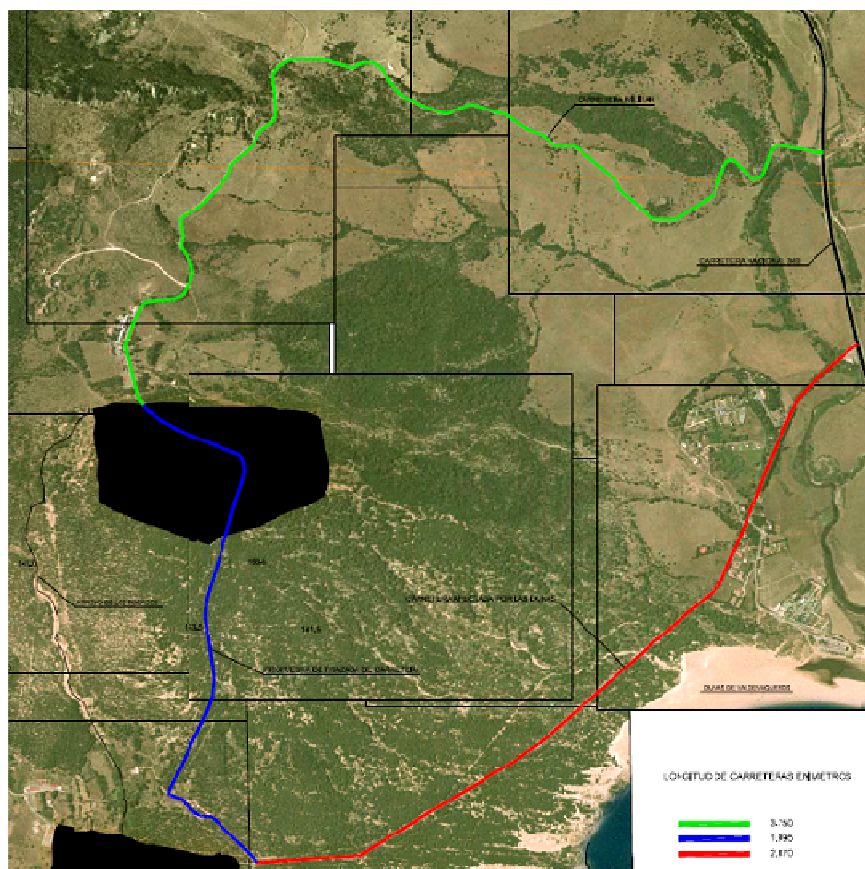


Fig. 3.40. Alternativa III: Utilización de una nueva carretera (MMA, 2005)

La nueva distancia a recorrer tendría una longitud total de 5,74 km (trazado verde y azul en la Fig. 3.40), a diferencia de los 2,67 km de la carretera actual (en rojo). En lo referente a la carretera militar, sería necesario su asfaltado. El presupuesto total sería de unos 900.969,14 €.

A raíz de la necesidad de evaluar dicho problema, en 2008 se realizó el *Estudio de la evolución de la duna de Valdevaqueros (T.M. Tarifa, Cádiz) y propuestas de actuación*, encargado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, y elaborado por la UPC, el Departamento de Historia, Geografía y Filosofía y el Departamento de Física Aplicada de la UCA (donde participó extensamente la que suscribe). En dicho estudio, las tres anteriores alternativas fueron evaluadas y sometidas a encuesta por diferentes grupos sociales (representantes institucionales, administradores públicos, empresas, ciudadanía y comunidad científica). Las conclusiones de dicho estudio partieron de una percepción común del origen y efectos del problema existente en la duna de Valdevaqueros. Dado que se considera que el entorno dunar no es natural sino que ha sido antropizado en gran medida, el planteamiento de la re-naturalización del sistema no pareció una opción plausible, pues no se dan las condiciones óptimas para que la vegetación pudiera establecerse. En cuanto a las alternativas proyectadas, el colectivo en general insistió en la necesidad de volver a gestionar el sistema como se hacía anteriormente, es decir, mediante la fijación de la duna y la extracción de la arena sobrante, sin embargo, se planteó de forma complementaria, la posibilidad de construir la carretera alternativa ya que ello generaría un menor impacto paisajístico (MARM, 2008).

Con el fin de calcular la viabilidad de las diferentes alternativas y poder aplicar un criterio de comparación, se hizo imprescindible establecer un sistema de medición de la duna completamente carente de subjetividad. Asimismo, resulta necesario conocer en qué escala temporal ocurren los cambios volumétricos en el perfil dunar y con qué rapidez la duna es capaz de volver a cubrir la carretera existente.



## **CAPÍTULO CUARTO**



## **METODOLOGÍA APLICADA AL SISTEMA DUNAR DE VALDEVAQUEROS**



# **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA APLICADA AL SISTEMA DUNAR DE VALDEVAQUEROS**

## **4.1. Metodología de la toma de datos de campo**

### 4.1.1. Levantamientos topográficos mediante GPS Diferencial

Hasta la fecha, los perfiles de playa se solían llevar a cabo de forma periódica mediante dispositivos, tales como los distanciómetros, teodolitos (Anfuso et al., 2007), y más recientemente las estaciones totales, que fueron, durante décadas, los instrumentos que proporcionaban una mayor precisión en la evolución de este tipo de sustratos arenosos (Baptista et al. 2008). Hoy en día, el Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (GPSD) puede aportar precisiones de nivel centimétrico (normalmente menor a 10 cm), minimizando el error cometido en cada medición. Es más, es, probablemente el mejor método de recopilación de datos topográficos para el seguimiento dunar, especialmente cuando la morfología del sistema es compleja (debido a cambios bruscos en la pendiente) y la utilización de estaciones totales y otro tipo de dispositivos es muy dificultosa, por la necesidad de establecer bases auxiliares sobre la propia duna.

Para determinar la evolución morfológica de la duna de Valdevaqueros, se tomaron 5 perfiles transversales a la orilla de playa y paralelos entre sí, espaciados aproximadamente 100 metros, siguiendo las recomendaciones del Coastal Engineering Manual (2002), tal como se muestra en la Fig. 4.1.



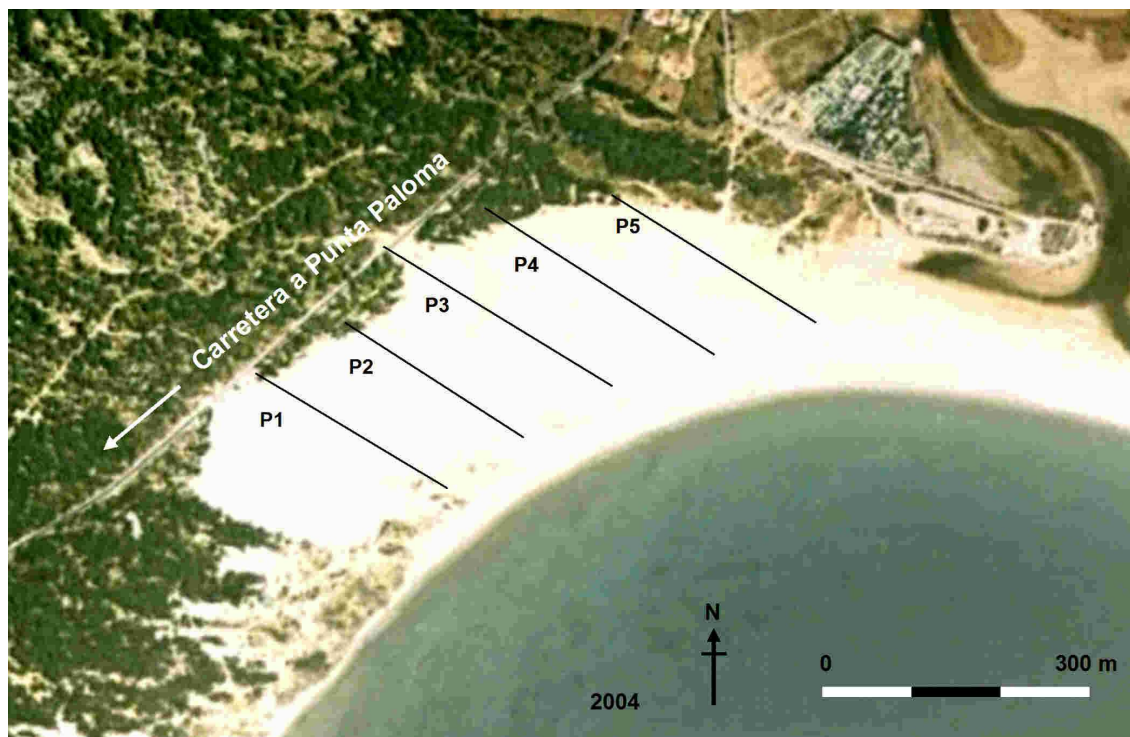


Fig. 4.1. Perfiles topografiados en la duna de Valdevaqueros

Los primeros levantamientos topográficos realizados en la duna fueron tomados por la Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico mediante estación total, posicionando la base del dispositivo en cada pie de perfil y tomando como referencia el cero hidrográfico, utilizando una base ubicada en el aparcamiento de la playa de Valdevaqueros. Si bien en los años 90 la morfología de la duna permitía aún la toma de puntos mediante este sistema, posteriormente se hizo necesaria la utilización de GPS diferencial para evitar tener que estacionar en diversos puntos de cada perfil.

De este modo, para el resto de las campañas, se utilizaron dos modelos distintos de GPSD: Thales (Fig. 4.2a) y Leica 1.200 (Fig. 4.2b). Para la toma de datos se requieren dos receptores, los cuales van recopilando datos de forma simultánea (Rodríguez Santalla et al. 2009). Uno de ellos permanece en un punto de coordenadas conocidas (en este caso fue en el aparcamiento de la playa de Valdevaqueros) durante todas las mediciones topográficas. Una vez se ha estacionado el receptor base, el posicionamiento del GPSD puede realizarse con un receptor móvil que va recogiendo puntos de un modo estático o cinemático. En este caso, debido a la complejidad de la morfología dunar, la toma de puntos mediante el receptor móvil se llevó a cabo mediante la opción *Stop-and-go*, en la cual la antena del receptor móvil se coloca en la parte superior de un jalón y se

sitúa durante unos segundos en el punto de interés, tomando datos de posición tridimensional. Seguidamente, las coordenadas tomadas se corrigen automáticamente con la situación geográfica del receptor base (Rodríguez Santalla et al. 2009).

Se partió de vértices geodésicos cuyas coordenadas son conocidas. Expresadas en el Sistema Transversal Mercator (UTM), tomando como sistema de referencia el European Datum 50 (ED50), en el huso 29 N.

Finalizado este proceso los planos obtenidos se exportan a un programa de procesado de datos geográficos utilizando el formato GRID y DXF.



*Fig. 4.2. Estacionamiento de dos tipos de GPSD en un punto determinado del aparcamiento de la playa de Valdevaqueros, durante diferentes campañas; a) Thales; b) Leica 1.200*

De este modo, la recolección de datos (Fig. 4.3) se realizó durante diferentes periodos de tiempo: una campaña a largo plazo (conteniendo 11 años), dos a medio plazo (6 y 12 meses respectivamente), una a corto plazo (durante una quincena) y finalmente otra a muy corto plazo (durante 24 horas). Un resumen de estos datos puede verse en la Fig. 4.3.



*Fig. 4.3. Varias imágenes de diferentes campañas de tomas de datos: a) Topografía en dunas primarias; b) Topografía en la cresta dunar; c y e) Topografía en las caras de sotavento; d) Instalación de la trampa de arena; f) Recogida de muestra de sedimento en la cara de avalancha*

Tabla 4.1. Diferentes campañas llevadas a cabo en la duna de Valdevaqueros. \*Levantamientos topográficos efectuados bajo fuertes vientos de levante

Campañas	Periodos	Frecuencia	Fecha
Largo plazo	11 años	anual	Jun 1995-May 2006
Medio plazo	12 meses	bimensual	Sep 2008-Ago 2009
	6 meses	mensual	May 2006-Dic 2006
Corto plazo	15 días*	diaria	5-22 Jul 2006
Muy corto plazo	1 día*	horaria	14-15 Ago 2009

#### 4.1.1.1. Estimación de la precisión en la utilización de GPSD.

Con el propósito de evaluar la precisión tanto del instrumento como de la metodología empleada durante la toma de datos, se llevaron a cabo varios levantamientos consecutivos del mismo perfil en Febrero de 2009. Las estimaciones de precisión de las alturas proporcionadas por los levantamientos topográficos con GPS Diferencial se obtuvieron calculando la media y el error cuadrático medio (ECM) de las diferencias entre cada levantamiento.

Baptista et al. (2008) calcularon que, utilizando métodos cinemáticas de GPS diferencial sobre morfologías arenosas costeras, se obtenía una precisión mayor a 10 cm. En este caso, se ha estimado que el error cuadrático medio cometido en la utilización del GPSD en modo puntual es de aproximadamente 1,8 cm, identificándose errores mínimos y máximos de 0,1 cm y 3,7 cm, respectivamente (Navarro et al., 2011). Esto supondría un error relativamente pequeño, si consideramos que como máximo, correspondería un 2,3% de las variaciones de la altura del perfil.

#### 4.1.2. Determinación de las características granulométricas del sedimento

Para la determinación del tamaño medio de grano en el sistema dunar de Valdevaqueros, se tomaron 6 muestras en distintos puntos de un perfil transversal, tal y como se detalla a continuación:



- Playa media o intermareal
- Playa alta o supramareal
- Pie de duna
- Cara a barlovento
- Cresta dunar
- Cara a sotavento
- Mezcla compuesta de todo el perfil dunar

Para todas las muestras se ha realizado un análisis granulométrico, siguiendo el procedimiento internacional definido por la normativa del US Army Engineers Corps (Coastal Engineering Manual, 2002) para ensayos de sedimentos.

En los análisis se han determinado parámetros físicos y estadísticos que clasifican el material en función del peso retenido en cada uno de los tamices utilizados. Las luces de malla empleadas han sido: 1,0 - 0,71 - 0,5 - 0,35 - 0,25 - 0,18 - 0,125 y 0,075 mm. Estos resultados granulométricos, que pueden consultarse en el ANEXO III, han sido aplicados posteriormente en el cálculo de las tasas de transporte teórico de arena para cada zona característica del perfil playa-duna.

En la Fig. 4.4 se representa un típico perfil transversal para una mejor localización del las zonas muestreadas.

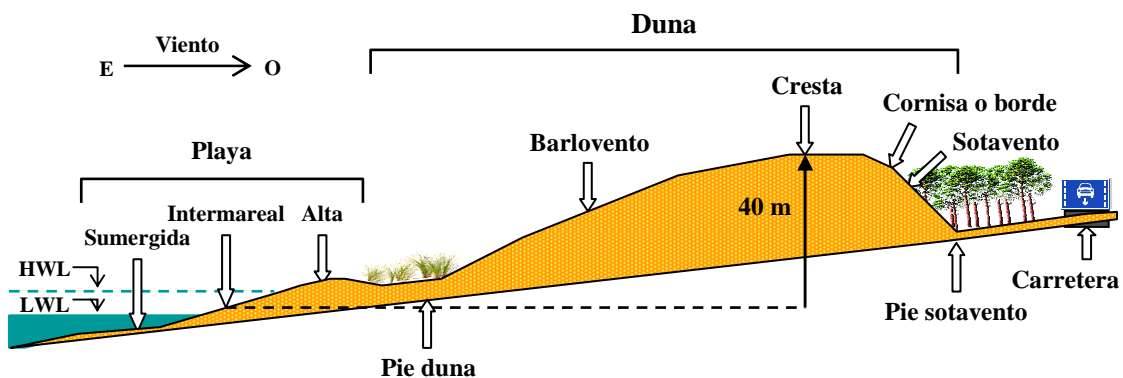


Fig. 4.4. Esquema de un perfil transversal de la playa-duna

#### 4.1.3. Determinación del transporte sedimentario in situ

Para la determinación de las tasas reales de transporte sedimentario, se ha procedido a la instalación de una trampa de arena de fabricación propia (Fig. 4.3d) que fue probada con anterioridad. Los resultados han sido tomados durante la campaña de 24 h (muy corto plazo) y bajo un fuerte temporal de levante. La trampa, de 50 cm alto x 20 cm ancho x 40 cm de profundidad, que constaba de 5 niveles de dimensiones 10x20 cm, colocados de 0 a 10 cm, de 10 a 20, de 20 a 30, de 30 a 40 y de 40 a 50 cm por encima de la superficie dunar, fue colocada durante 30 minutos cara al viento, en tres zonas del perfil dunar: pie de duna, cara de barlovento y cresta.

#### 4.1.4. Recopilación de datos meteorológicos

Los datos meteorológicos desde 1995 hasta 2009 (dirección y velocidad del viento, precipitación, temperatura y humedad) pertenecientes a la estación meteorológica de Tarifa, han sido solicitados al Instituto Nacional de Meteorología (INM), recientemente denominado Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Cabe comentar el hecho de que la estación meteorológica de Tarifa ha sido reubicada en los últimos años, estando situada en el Castillo de Santa Catalina (Fig. 4.5a), junto a la playa de los Lances hasta finales de 1999 y poco después se trasladó a las afueras de Tarifa sobre un cerro frente al mar (Fig. 4.5b y Fig. 4.5c), donde se encuentra en la actualidad. A pesar de este cambio de localización, ambas estaciones están situadas a una altura de 41 metros sobre el nivel del mar.

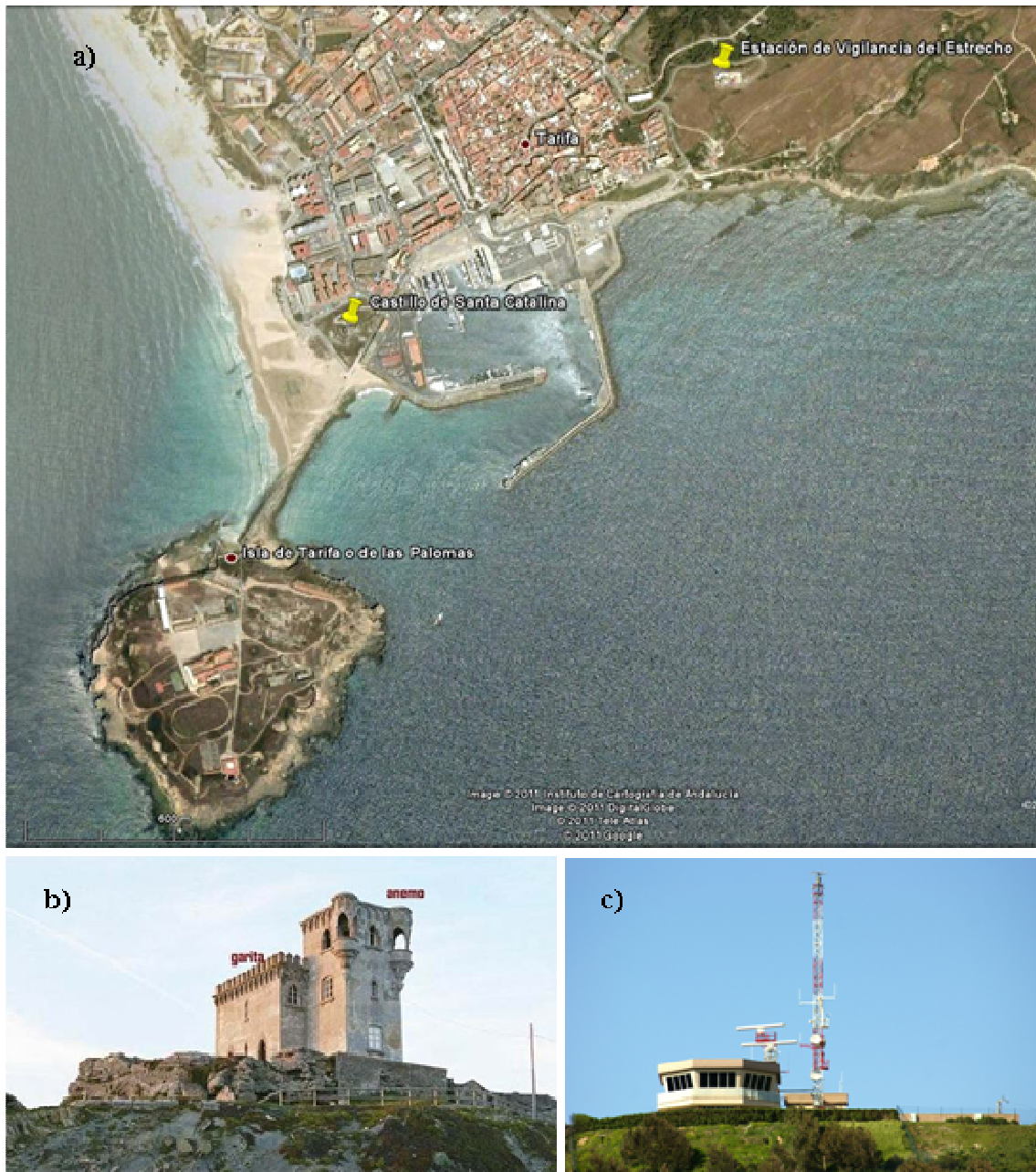


Fig. 4.5. a) Vista general de la ubicación de las estaciones meteorológicas en Tarifa; b) Antigua estación situada en el Castillo de Santa Catalina (anterior a diciembre de 1999); c) Estación de Vigilancia del Estrecho (posterior a febrero de 2000)

## 4.2. Las Funciones Empíricas Ortogonales. Aplicaciones en el ámbito costero

En los últimos 50 años múltiples morfologías costeras se han visto degradadas por causas naturales y antropogénicas. Para comprender mejor su evolución y poder solucionar los problemas que las afectan, surge la necesidad de estudiar el comportamiento de nuestros ecosistemas litorales. Normalmente, el único modo de conocer de forma detallada los balances de arena de nuestras playas y dunas, consiste en efectuar levantamientos batimétricos y topográficos periódicos y proceder a su comparación.

Sin embargo, mediante procedimientos estadísticos adecuados como el de las Funciones Empíricas Ortogonales, se le puede sacar a esta serie de datos mucho más partido que el de averiguar distintas tasas de erosión. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en la geomorfología de costas desde que Winant et al (1975) y Aubrey (1978) caracterizaron cambios en los perfiles de playa. Entre otros, Dick y Dalrymple (1984) estudian los perfiles de playa y su variación longitudinal, Losada et al. (1991) aplicaron este método al estudio de la variación longitudinal de curvas de nivel determinadas, mientras que Medina et al. (1991 y 1994) al transporte de arena en sentido transversal e, incluso, a la distribución del tamaño de grano del sedimento a lo largo del perfil transversal. El análisis de las EOF se ha empleado desde entonces para identificar cualquier patrón predominante de variabilidad en cada serie de datos. Por otra parte, Pruszek (1993) analiza las diferencias entre perfiles a los que ha restado no la media sino el perfil de Dean, Larson et al. (1999) investigan la respuesta en el tiempo de las realimentaciones de arena, y Muñoz-Pérez y Medina (2000) así como Muñoz-Pérez et al. (1999 y 2001) estudian, respectivamente, el comportamiento de los perfiles apoyados en laja rocosa, los cambios experimentados por un perfil frente a un ciclo mareal quincenal y la evolución en planta de las líneas de pleamar y bajamar.

Mediante el método de las funciones empíricas ortogonales (*Empirical Orthogonal Functions, EOF*) pueden, además, deducirse distintas tendencias en el comportamiento del sistema playa-duna en función de la escala temporal: perfil medio o casi invariable, variaciones a largo plazo (varios años), estacionales (cambios invierno-verano) e incluso los cambios experimentados por un solo temporal seguido de un período de calma o bonanza (Muñoz-Pérez y Medina, 2010).

Por tanto, cada posición transversal tiene una variación alrededor del perfil medio, que puede ser expresado en términos de varianza (o desviación estándar). De este modo,



las EOF describen de qué manera los perfiles dunares difieren del perfil medio a partir de funciones ortogonales de forma.

El objetivo de la utilización de las EOF es pues, además de indicar una metodología para la interpretación de las topografías de seguimiento, mostrar cómo la aplicación de dichas autofunciones a series temporales de levantamientos topográficos puede proporcionar un método para identificar las tendencias evolutivas y de comportamiento de nuestras dunas a corto, medio y largo plazo.

La evolución de perfiles se puede explicar por procesos a diferentes escalas, como cambios espaciales y temporales. Trabajar con datos de campo sin realizar tratamiento estadístico puede hacer que la obtención de conclusiones resulte difícil, debido no sólo a la enorme cantidad de datos y su variabilidad, sino también a la dificultad añadida de interpretar tendencias espaciales y temporales en su conjunto.

La aplicación de una metodología objetiva, como las EOF resulta una alternativa muy útil para interpretar estas variaciones. Dicho método estadístico, también conocido como Análisis de Componentes Principales (PCA) se utiliza para separar la variabilidad espacial de la temporal en una serie de datos. El análisis mediante EOF no sólo descompone la varianza en patrones espaciales independientes de variabilidad, sino que también proporciona una firma temporal relacionada con esos modos de varianza (Haxel y Holman, 2004).

El objetivo de este método es caracterizar los cambios ocurridos en un perfil dunar mediante el mínimo número posible de funciones. Las autofunciones se clasifican de acuerdo al porcentaje de variabilidad que éstas explican, definido por el Valor Cuadrático Medio de los datos (MSV) (Shenoi et al., 1987).

De este modo, Winant y Aubrey (1976) fueron capaces de relacionar las primeras tres autofunciones de su serie de datos con modos físicos de variabilidad, representando el perfil medio de playa, la transición estacional entre los perfiles típicos de verano (berma) e invierno (barra), así como la terraza de bajamar con el análisis del perfil de playa. Por otro lado, tal como se ha mencionado anteriormente, Dick y Dalrymple (1984) y Muñoz-Pérez et al. (2001) utilizaron las EOF para analizar cambios longitudinales en playas, aunque la mayoría de las aplicaciones continuaron enfocadas en la variabilidad de perfiles transversales. El análisis de las EOF se ha empleado desde entonces para identificar cualquier patrón predominante de variabilidad en cada serie de datos.

El análisis mediante EOF se aplica aprovechando las propiedades de las matrices para identificar patrones de oscilaciones regulares en una serie de datos que pueden ser utilizados para representar los valores de una forma más compacta. Esto se logra aislando la dependencia temporal y espacial de los datos, de manera que éstos pueden ser representados por una serie de combinaciones lineales de funciones espaciales y temporales. Puede hallarse una descripción detallada en textos de estadística (Daultrey, 1976; Jackson, 1991).

Como ejemplo, nos basaremos en el desarrollo del método para el caso del análisis de perfiles de playa. En este caso, partimos de que tenemos una serie de datos  $h_{ij} = h(x_i, t_j)$ , donde,  $h_{ij}$  es la cota del punto  $x_i$  durante la campaña batimétrica  $j$ . El factor  $x_i$  es la distancia a la cabecera desde el punto  $i$  dentro de un perfil transversal, con  $i$  variando entre 1 y  $n_x$ , y siendo  $n_x$  el número de puntos del perfil. El parámetro  $t_j$  indica que se trata de los datos tomados en la campaña  $j$ , donde dicho índice varía entre 1 y  $n_t$ , y siendo  $n_t$  el número de batimetrías efectuadas (Fig. 4.6).

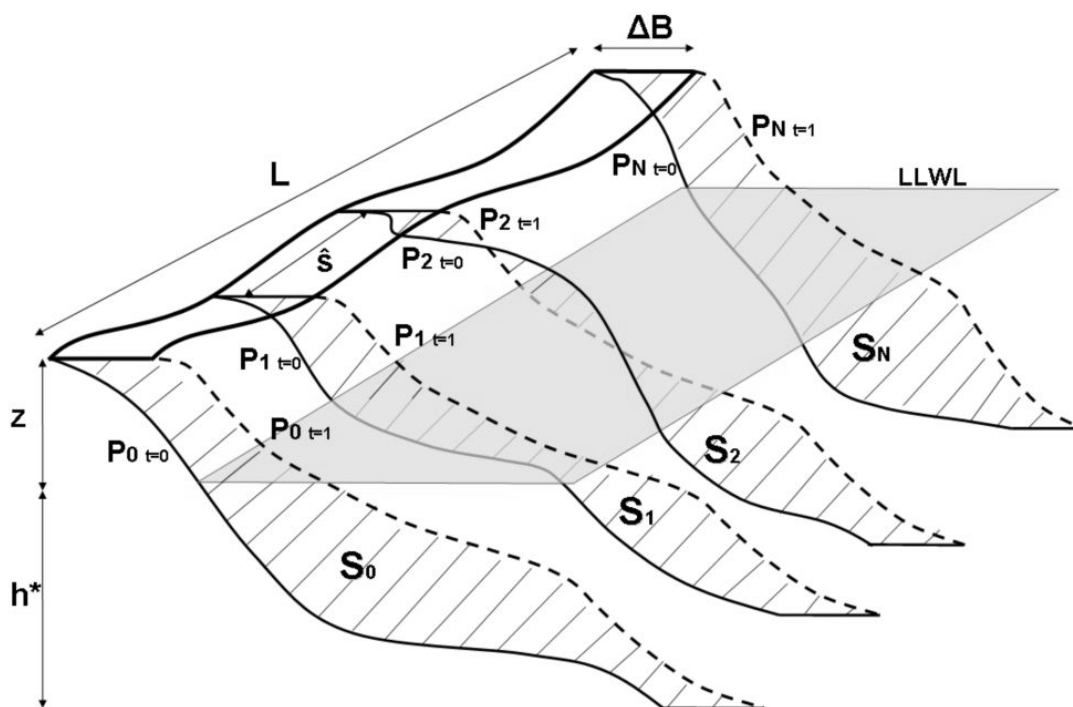


Fig. 4.6. Esquema con  $N+1$  perfiles transversales de playa ( $P_0, P_1, P_2 \dots P_N$ ), con un espaciado  $\hat{s}$  entre perfiles. Las áreas o superficies entre diferentes batimetrías vienen definidas por  $S_0, S_1, S_2 \dots S_N$ .  $LLWL$  hace referencia a la bajamar viva equinoccial,  $z$  la altura de la berma y  $h^*$  la profundidad de cierre.

En resumen, si la función  $h_{ij} = h(x_i, t_j)$  representa la altura del perfil en una posición y tiempo determinados, dicha función puede ser definida como una combinación lineal formada por un número limitado de autofunciones espaciales  $X_n(x)$ , y temporales  $T_n(t)$ , de forma que:

$$h_{ij} = h(x_i, t_j) = \sum_{l=1}^N a_l \cdot X_l(x_i) \cdot T_l(t_j)$$

donde  $a$  es el factor de normalización, dado por  $a_k = \sqrt{\lambda_k n_x n_t}$  (siendo  $\lambda_k$  el autovalor asociado a la autofunción  $k$ -ésima).

Las autofunciones aparecen ordenadas, de modo que la primera autofunción representa la mayor parte de la variabilidad de la serie de datos, y cada subsiguiente autofunción explica la mayor parte de la variabilidad restante, asegurándose que las primeras describirán las variaciones más significativas. Como los primeros autovalores contienen típicamente la mayoría de la variabilidad, las EOF se utilizan normalmente dentro de una serie de datos para separar las señales más significativas del “ruido de fondo” descrito por las funciones inferiores, que representa una cantidad mínima de variabilidad y que es eliminada. De hecho, extrayendo las funciones empíricas, la mayor parte de las componentes que conllevan ruido pueden ser eliminadas de la serie de datos (LeBlanc y Middleton, 1980).

A pesar de que a priori las autofunciones resultantes son de naturaleza puramente matemática, careciendo de significado físico intrínseco, el análisis puede ser aplicado para proporcionar una interpretación física de los resultados. Como resultado de su aplicación, la primera autofunción,  $X_1(x)$ , guarda normalmente una fuerte similitud con la media estadística (Miller y Dean, 2007). Consecuente con la terminología tomada por Winant et al. (1975) cuando se refería a la primera autofunción como la función de “playa media”, la primera autofunción obtenida de los datos topográficos transversales de la duna coincidirá con el “perfil dunar medio” o perfil (teórico) de equilibrio, sobre el cual se originan los cambios. Esto significa que las EOF representan un método objetivo para el cálculo del perfil medio, de modo que éste puede ser comparado en diferentes lugares o momentos.

Asimismo, los extremos de las autofunciones espaciales representan las zonas de máxima variabilidad, mientras que los puntos pivote o puntos donde la variabilidad es nula, indican estabilidad. Estos puntos nodales o puntos de inflexión, separan zonas

adyacentes de erosión y acreción. Además, Aubrey (1979) identificó puntos pivotes en perfiles transversales los cuales iban asociados a intercambios de sedimento entre la zona somera y la profunda.

La interpretación de estas autofunciones espaciales y temporales puede resultar complicada, más aún para investigadores no especializados. Sin embargo, estos problemas desaparecen mediante la metodología de reconstrucción de dichos perfiles (Smith et al. 1996), ya que se representan conjuntamente los modos espaciales y temporales, mostrando de un modo más directo e intuitivo la máxima variabilidad de los datos. En concreto para este estudio, la reconstrucción de las EOF nos permite obtener unos perfiles de campo más sencillos de interpretar espacialmente. En resumen, el método de reconstrucción de las EOF es un procedimiento descriptivo y por lo tanto, aunque no identifica qué procesos físicos están implicados en cada cambio del perfil, es capaz de evaluar las variaciones de estos procesos, proporcionando una interpretación más sencilla e intuitiva de la serie de datos.

En el caso de la duna de Valdevaqueros, la reconstrucción de los perfiles se ha llevado a cabo mediante registros de altura del perfil dunar. La ventaja de la reconstrucción radica en que se trabaja con perfiles reales (altura en metros) en lugar de con valores adimensionales, como son las autofunciones espaciales y temporales. Cada perfil es reconstruido teniendo en cuenta la contribución aislada de cada componente (la primera componente espacial con la primera componente temporal y así sucesivamente, hasta que la varianza restante es prácticamente despreciable). Los perfiles reconstruidos no aportan nuevos datos, solamente simplifican la explicación del análisis mediante el filtrado del “ruido”, indicando la contribución de cada autofunción a la variabilidad de los datos.

El desarrollo matemático del método y su aplicación para la extracción de los perfiles dunares reconstruidos puede consultarse en el ANEXO I y ANEXO II, respectivamente.

### 4.3. Aplicación de las Funciones Empíricas Ortogonales en el ámbito dunar

El método de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF) es una aproximación estadística que caracteriza las variaciones o no regularidades así como otras características de los perfiles (Pruszek, 1993). Aunque este método se ha aplicado normalmente a perfiles de playa, también ha sido empleado dentro del ámbito dunar, si bien enfocándose a otros campos de conocimiento. En concreto, De Castro (1995) presentó un modelo informático para simular el movimiento de bordes dunares paralelos en relación con el crecimiento de la vegetación y el nivel freático, asumiendo un aporte de arena uniforme. De modo parecido, Robertson et al. (2003) predijeron la distribución potencial para plantas dunares costeras basada en las EOF. Van der Burgh et al. (2007) propuso la utilización de las EOF para extraer funciones que caracterizaran la forma dunar y poder así incluirla en la predicción de la erosión costera tras fuertes temporales a largo plazo, mediante un modelo de erosión dunar.

De este modo, las EOF proporcionan múltiples posibilidades para estimar y predecir las características geométricas y dinámicas de perfiles de duna. Sin embargo, las EOF todavía no han sido utilizadas para definir la evolución de perfiles transversales para dunas transgresivas de naturaleza altamente activa y cambiante.

En el ANEXO II se detalla la aplicación de las EOF a los cambios morfológicos de perfiles dunares, mediante la ejecución de los programas para la extracción de las autofunciones y su reconstrucción.

## **CAPÍTULO QUINTO**



### **ANÁLISIS MORFODINÁMICO DEL SISTEMA DUNAR DE VALDEVAQUEROS A DISTINTOS PLAZOS**





# **CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MORFODINÁMICO DEL SISTEMA DUNAR DE VALDEVAQUEROS A DISTINTOS PLAZOS**

## **5.1. Escalas temporales comprendidas en el estudio**

Para identificar qué escala de tiempo es más determinante para que el sistema dunar alcance una determinada forma o perfil de estabilidad, se ha realizado un seguimiento topográfico de la duna a diferentes plazos. A partir de ahí, y teniendo en cuenta los efectos que actúan sobre la duna, descritos en los capítulos 3 y 6, como la aparición de vientos de levante que alteran directamente la dinámica dunar aumentando su transporte potencial eólico, la instalación de captadores de arena y plantación de especies psamófilas, las continuas extracciones y movilizaciones de sedimentos, etc., se ha procedido a evaluar el comportamiento dunar bajo estas distintas condiciones a diferentes escalas de tiempo: largo plazo (11 años), medio plazo (1 año), corto plazo (15 días) y a muy corto plazo (24 horas). Con el fin de analizar la evolución dunar se ha aplicado el método de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) que analiza las variaciones del perfil de una forma objetiva e intuitiva.

## **5.2. Largo plazo (años)**

### 5.2.1. Introducción

Durante un análisis preliminar de los 5 perfiles dunares, se observaron diferencias importantes de comportamiento según el perfil, como resultado de la dirección neta de avance dunar. Los perfiles situados en el lado más occidental de la duna (perfiles 1 y 2) revelaron un comportamiento acumulativo, mientras que los perfiles más orientales (perfiles 4 y 5) no sólo no eran tan activos sino que incluso sufrían una erosión relativa

en comparación con los primeros, cediendo arena a favor de la dirección del viento, es decir de Este a Oeste.

Con el fin de poder obtener una comparación más directa, nos centraremos en el análisis de la evolución del Perfil 1, ya que obedece al perfil dunar más activo y es en el que mejor se manifiesta el efecto del transporte eólico de sedimentos. Este primer análisis del comportamiento dunar se ha llevado a cabo mediante la representación gráfica de la evolución del perfil, para determinar cambios dunares a largo plazo. Las campañas realizadas para dicho estudio han consistido en la obtención de 6 levantamientos topográficos de 5 perfiles dunares (Figura 4.1) durante un periodo de estudio de 11 años, tal como se detalla en la Tabla 5.1.

*Tabla 5.1. Fechas de los levantamientos realizados durante el seguimiento a largo plazo*

<b>SEGUIMIENTO A LARGO PLAZO</b>
junio 1995
mayo 1999
noviembre 1999
junio 2000
noviembre 2003
mayo 2006

### 5.2.2. Obtención del perfil sin tratamiento estadístico

Previamente a la aplicación de las Funciones Empíricas Ortogonales, se ha representado el perfil “real” extraído de todos los puntos topográficos obtenidos mediante estación total y GPSD. En la Fig. 5.1 vemos una representación de la altura del perfil 1 durante las campañas llevadas a cabo durante dicho periodo de 11 años. En el extremo izquierdo del eje de abscisas se posicionaría la carretera y en el derecho la playa de Valdevaqueros. Aunque a partir de dicha Fig. 5.1 podemos observar el progresivo avance y crecimiento de la duna, se hace difícil extraer conclusiones objetivas de comportamiento sin realizar tratamiento estadístico, debido a los grandes cambios morfológicos acontecidos entre levantamientos. Para ello, se han extraído las componentes de las funciones empíricas ortogonales.

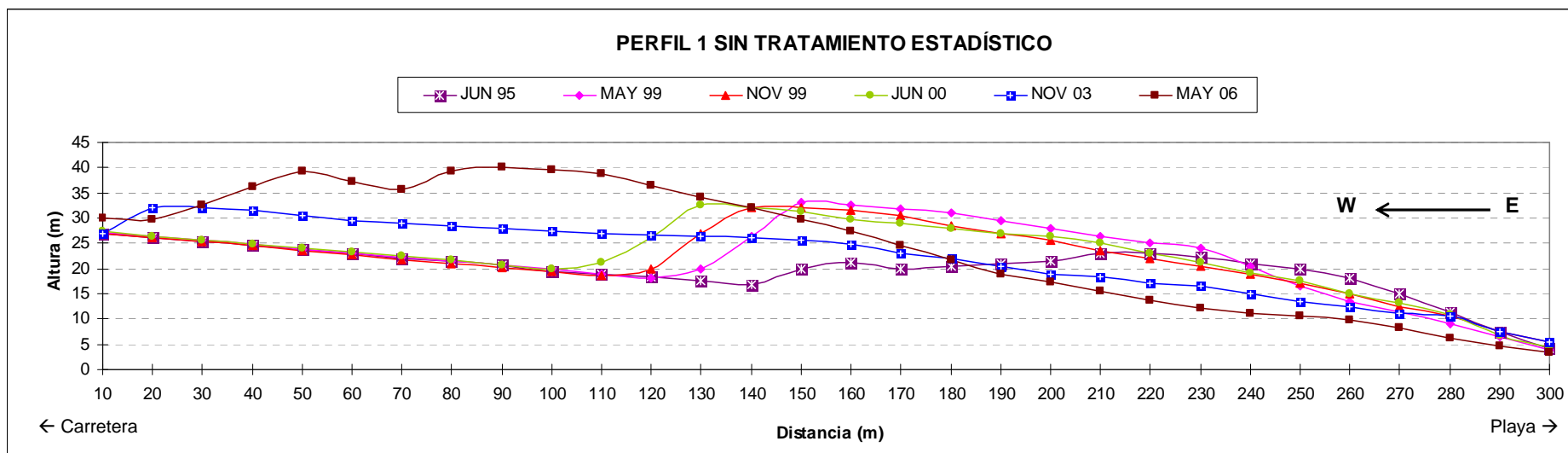


Fig. 5.1. Representación del perfil 1 durante un periodo de 11 años sin tratamiento estadístico.

5.2.3. Obtención de las componentes espaciales y temporales del perfil a largo plazo mediante la aplicación de las EOFs

Mediante el programa 3PCA (Análisis de Componentes Principales), se han extraído las componentes espaciales (Fig. 5.2) y temporales (Fig. 5.3) para el Perfil 1 de cada campaña, así como su variación durante el periodo de estudio.

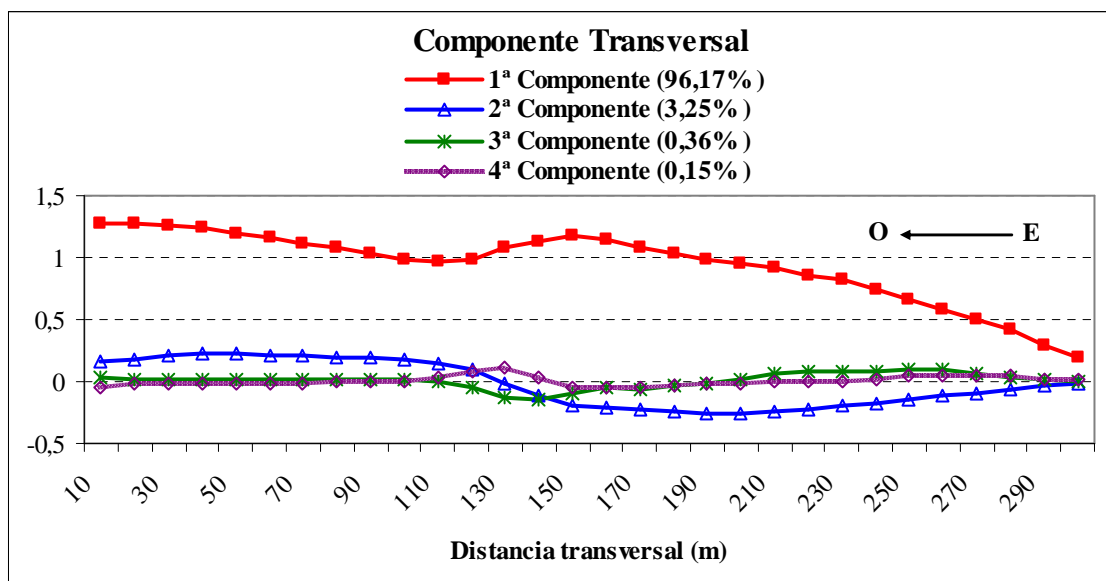


Fig. 5.2. Representación de las 4 primeras componentes transversales para el perfil 1

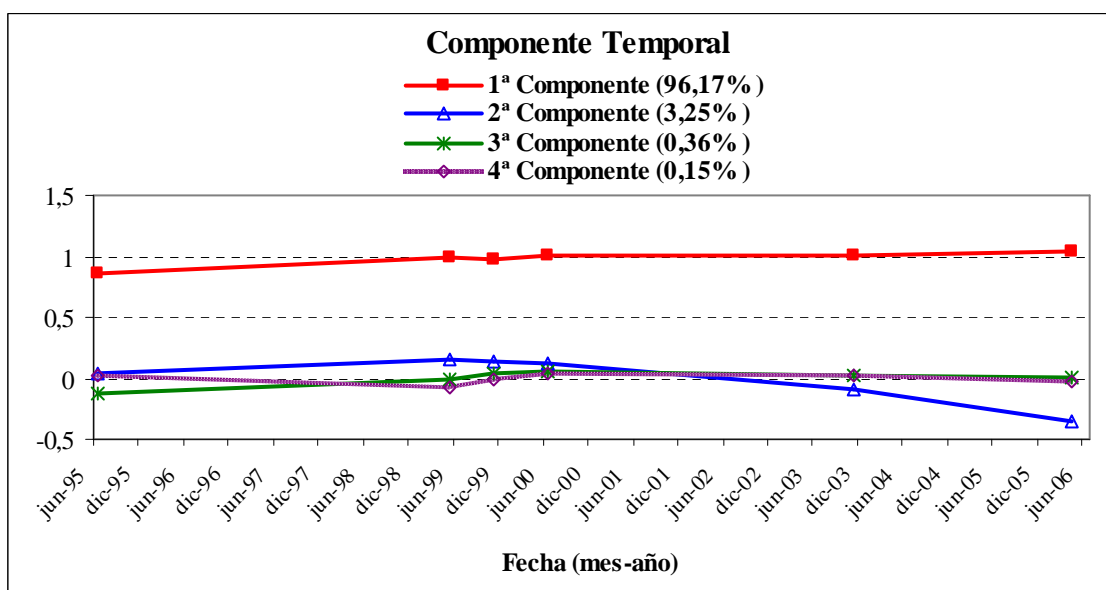


Fig. 5.3. Representación de las 4 primeras componentes temporales para el perfil 1

Una vez las componentes del perfil 1 han sido identificadas, ha sido posible analizar el comportamiento de la duna durante el periodo de estudio. Cabe destacar que la 1ª componente espacial representa el perfil medio o perfil “de equilibrio” (Fig. 5.2). En cuanto a la gráfica, el lado de sotavento está representado en el extremo izquierdo del eje de abscisas, mientras que el pie de duna se sitúa en el extremo derecho. Como puede observarse, la altura máxima se localiza en la cresta de la duna, la cual se forma muy cerca de la carretera. El perfil muestra un descenso generalizado desde el lado de sotavento hacia el pie de duna: aparece primero una disminución de la duna desde el lado de la carretera hasta los 210 metros, aunque se observa un pico en el p.k. 150. Después de este punto, el perfil continúa disminuyendo hacia el pie de duna. En cambio, la 1ª componente temporal refleja un leve aunque constante aumento a lo largo del periodo de estudio (Fig. 5.3), lo que significa un aumento generalizado del perfil y, por consiguiente, del volumen de arena acumulado en la duna. Por otro lado, la 2ª componente espacial y temporal desvela comportamientos diversos de la duna, describiendo acreción y episodios de erosión en varias zonas a lo largo del perfil. Aunque estas dos primeras componentes explican el 99,42% de la variabilidad total de los datos del perfil, se hace necesario ahondar en las restantes 3ª y 4ª componente para describir cambios a más corto plazo entre campañas.

#### 5.2.4. Obtención del perfil reconstruido

Tras la extracción de las componentes espaciales y temporales es posible construir un perfil que unifique ambas dimensiones. Sin embargo, todavía resulta difícil deducir explicaciones físicas derivadas de dichas componentes. Para aportar una mayor claridad a los resultados, se ha procedido a la reconstrucción de las EOFs, cuya técnica nos proporciona una metodología más fácil e intuitiva para medir todos los parámetros encontrados en la Fig. 5.2 y Fig. 5.3. El hecho de comparar los perfiles reconstruidos proporciona un modo objetivo de evaluar los cambios de las pendientes principales y la elevación del nivel de la superficie dunar.

De este modo, se representará el perfil 1 reconstruido para las 4 componentes individuales de las EOFs, de acuerdo con la metodología detallada en el ANEXO II, con el fin de lograr una interpretación más clara.

De forma paralela, en la Tabla 5.2 se muestran las variaciones de pendiente y altura para las principales zonas dunares durante todo el periodo de estudio, según se

representa en la Figura 4.10 del capítulo de toma de datos. En este caso, los resultados han sido obtenidos a partir del análisis de las 4 componentes reconstruidas de forma conjunta. En la Tabla 5.3 se muestran las diferencias de volumen identificadas en el perfil 1 utilizando las 4 primeras componentes y en la Tabla 5.4 se proporcionan las tasas volumétricas anuales, donde pueden identificarse procesos de acreción (+) o erosión (-).

#### *5.2.4.1. Reconstrucción del perfil medio*

El perfil de equilibrio puede analizarse mediante la representación de la primera componente aislada (Fig. 5.4), donde el perfil muestra una tendencia a aumentar su crecimiento. Los valores generales de altura pueden medirse mediante esta función. Tras el análisis de la 1ª componente, y tal como se deduce de la Tabla 5.3, se han identificado tres periodos importantes de acreción (Jun 95-May 99, Nov 99-Jun 00 y Nov 03-May 06), con una disminución de la altura dunar durante las restantes etapas. Desde Mayo a Noviembre de 1999, se han detectado tasas de erosión mayores a  $167 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Tabla 5.4) mientras que de Junio de 2000 a Noviembre de 2003 el perfil se ha mantenido en un régimen estacionario. Se considera que una duna alcanza una forma de régimen estacionario cuando su morfología, tamaño y perfil no cambian mientras la duna está avanzando (Tsoar, 1985). A pesar de estos hechos, el perfil dunar de equilibrio (representado por la 1ª componente aislada) ha ganado un volumen de  $1.758 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  en 11 años.



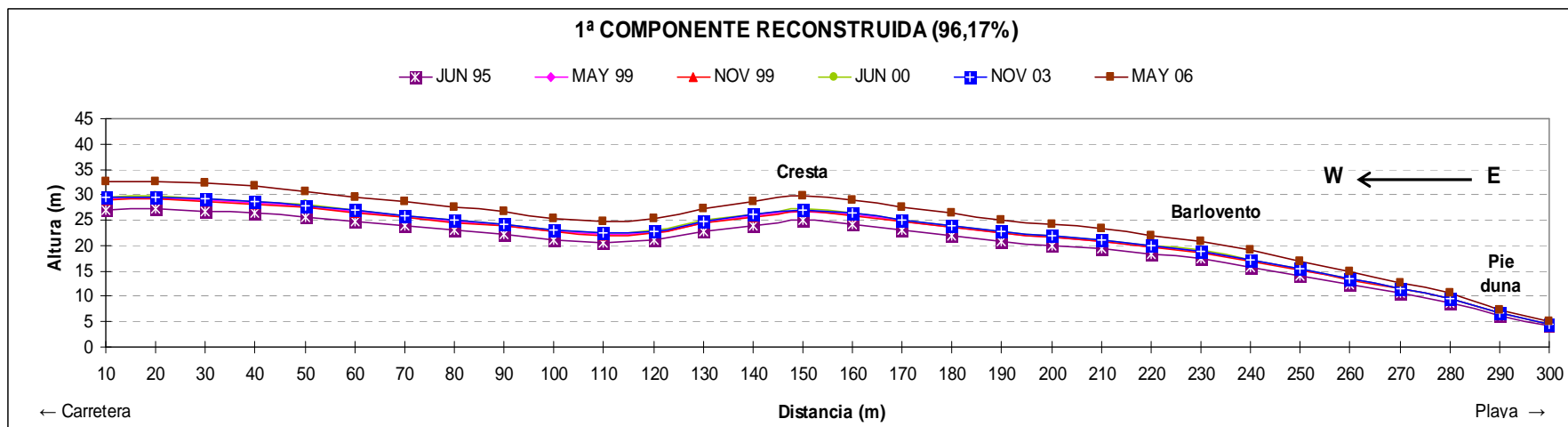


Fig. 5.4. Representación de la 1ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 96,17%.

#### 5.2.4.2. *Reconstrucción de la 2ª componente*

La Fig. 5.5 muestra la 2ª componente aislada reconstruida, con un 3.25% de la varianza de los datos, mientras que la Fig. 5.6 es la representación de la suma de la 1ª y 2ª componente, que explica un 99.42% de la variabilidad total de los datos. Esta 2ª componente ha permitido identificar un perfil basculante alrededor de un punto pivote situado en el p.k. 127 (i.e., en el centro del lado de sotavento). Este comportamiento ha sido generado por un cambio morfológico ligado al avance dunar. Por tanto, esta componente es la principal responsable de los cambios de pendiente en el perfil. El volumen de arena ha sido claramente transportado desde barlovento (p.k. 125-300) hacia la cresta dunar y sotavento (p.k. 10-125), excepto para el primer periodo estudiado. De hecho, los datos volumétricos de la 2ª componente muestran un transporte de arena no equilibrado debido a que se ha producido mayor erosión en el lado de barlovento que acreción en la cresta dunar y a sotavento. Estos resultados son probablemente debidos a las extracciones de arena llevadas a cabo en la cresta y cara de sotavento. Como resultado, los valores netos muestran tasas de ligera erosión para este perfil. Según Hugenholtz y Wolfe (2005), las variaciones en la velocidad del viento están probablemente asociadas a cambios volumétricos de la actividad dunar.

#### 5.2.4.3. *Reconstrucción de la 3ª componente*

De forma similar, la Fig. 5.7 y Fig. 5.8 representan la 3ª componente aislada reconstruida, con un 0.36% de explicación de la varianza y la suma de las primeras tres componentes reconstruidas (contribuyendo a un 99.78% de la varianza de los datos), respectivamente.

En la 3ª autofunción, se identifica un punto pivote en el lado de barlovento, cercano al p.k. 200, a partir del cual hay un cambio de tendencia. Hay que destacar que la contribución a la varianza de los datos está prácticamente contenida en la serie de datos de Junio de 1995. Durante las tres primeras campañas, el transporte de arena desde el pie de duna hacia la cresta es mayor que el que se produce durante las dos últimas campañas (Tabla 5.3), aunque los valores no son muy significativos.

De este modo, la 3ª componente describe un aumento del talud de sotavento desde Junio de 1995 hasta Junio de 2000, manteniendo la pendiente a partir de entonces (Tabla 5.2). Este cambio fue probablemente debido a que desde 1991 a 1995 las

extracciones de arena fueron muy puntuales (tal como puede consultarse en la Tabla 3.2), lo cual contribuyó a que la cara de deslizamiento se aproximara más a su ángulo crítico.

#### *5.2.4.4. Reconstrucción de la 4ª componente*

Finalmente, la 4ª componente aislada y la representación de las 4 componentes conjuntas reconstruidas se muestran en las Fig. 5.9 y Fig. 5.10, respectivamente. La 4ª componente aislada proporciona una explicación para movimientos de avance paralelos, principalmente para los periodos May 99-Nov 99 y Nov 99-Jun 00. Como puede deducirse de la Tabla 5.4, las tasas volumétricas netas alcanzan 73 y 57 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente.

Por tanto, esta última componente es especialmente importante a la hora de describir cambios semestrales. Hay que destacar que la duna avanza hacia la carretera, donde se apoya la cara de avalancha. Durante la primera y la última campaña, el transporte de arena se produjo desde la cresta hasta el pie de duna (151 y 142 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> respectivamente). Sin embargo, desde Mayo de 1999 hasta Noviembre de 2003 el sedimento fue transportado en sentido contrario. Sin embargo, el volumen neto total explicado por la 4ª componente no superó los 38 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> de erosión (Tabla 5.3). Consecuentemente, el análisis de esta 4ª componente nos ha permitido medir tasas de avance independientes de otros factores, como cambios estacionales y comportamientos basculantes.

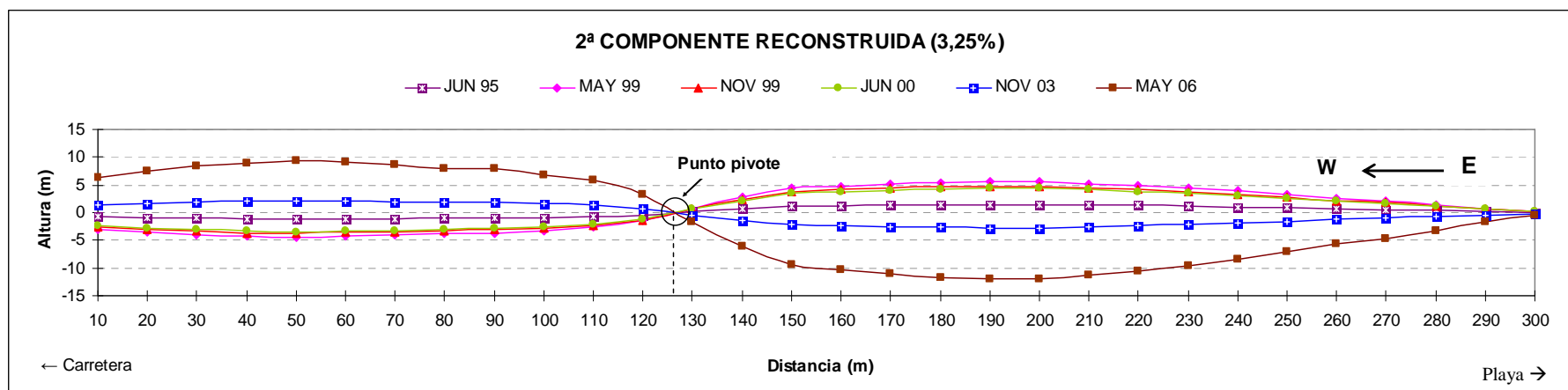


Fig. 5.5. Representación de la 2ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 3.25%.

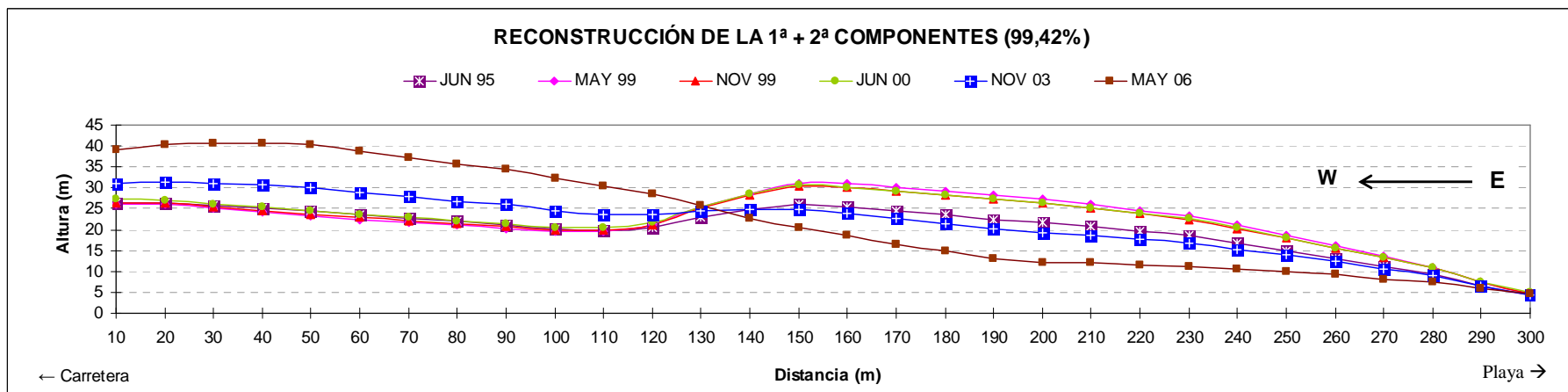


Fig. 5.6. Representación de la suma de la 1ª y la 2ª componentes reconstruidas para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 99.42%.

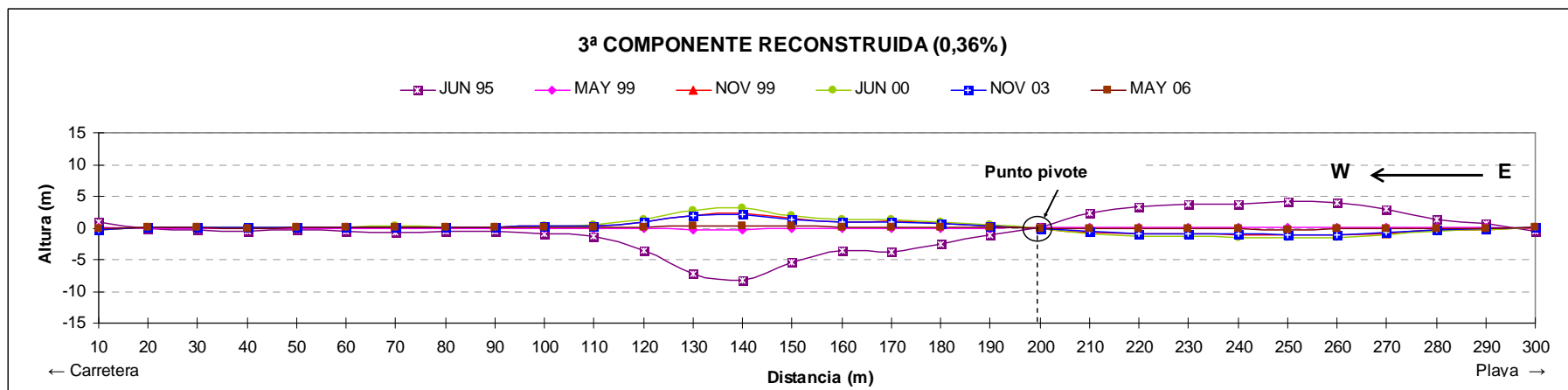


Fig. 5.7. Representación de la 3ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 0,36%.

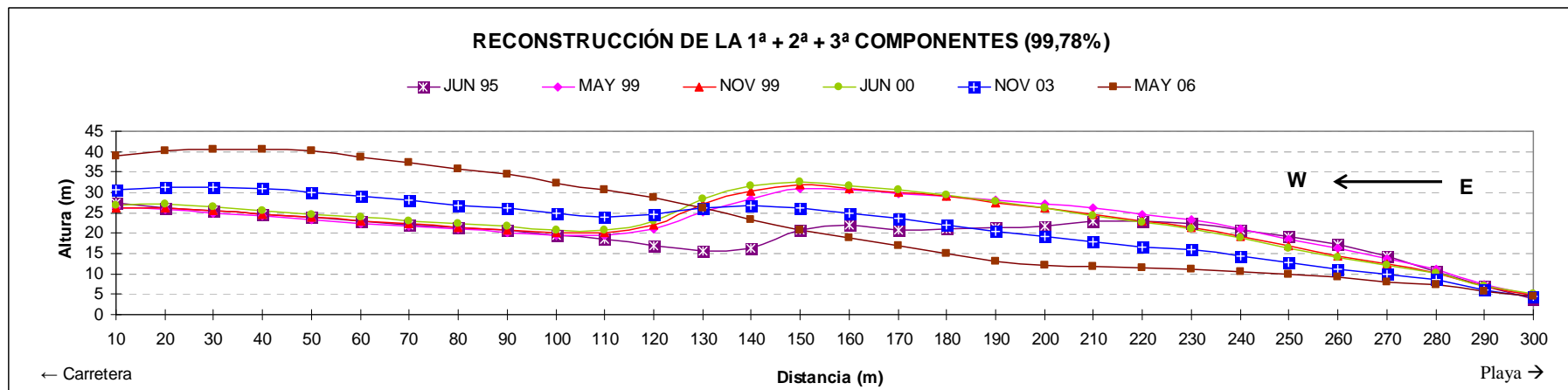


Fig. 5.8. Representación de la suma de la 1ª, 2ª y 3ª componentes reconstruidas para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 99,78%.

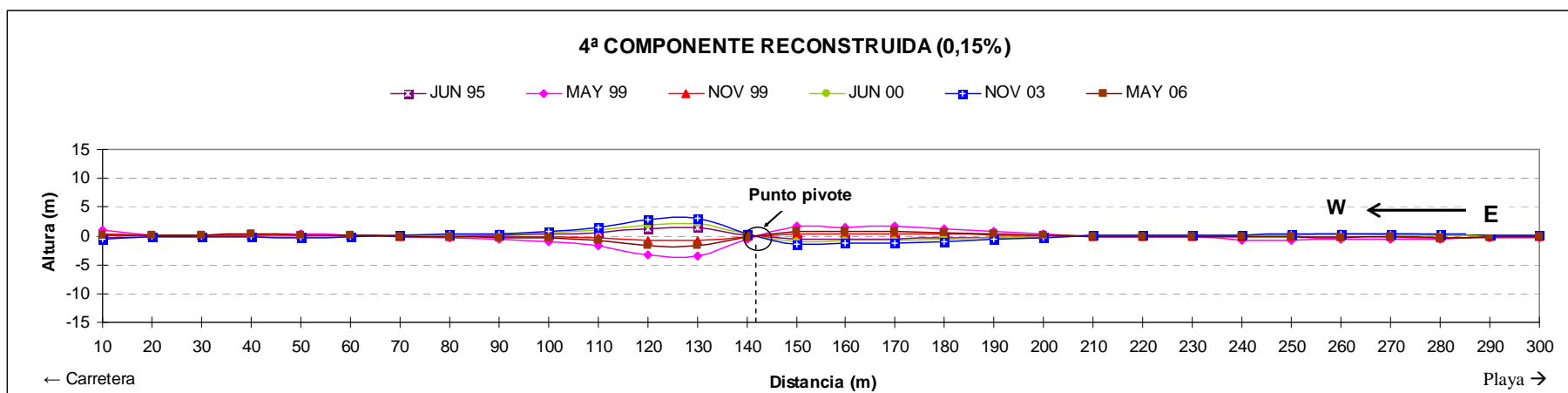


Fig. 5.9. Representación de la 4ª componente aislada reconstruida para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 0,15%.

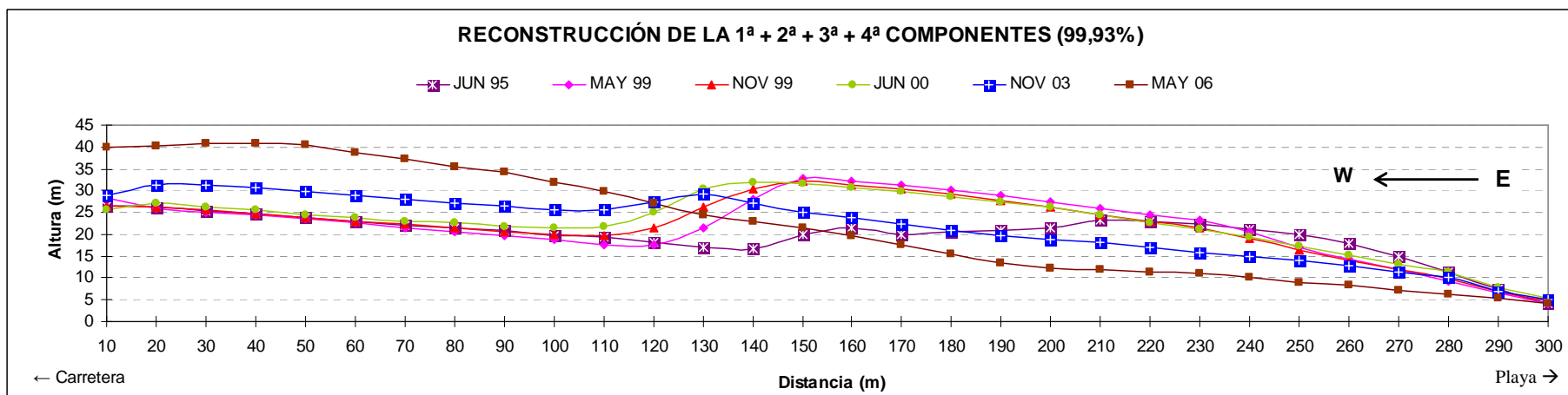


Fig. 5.10. Representación de la suma de la 1ª, 2ª, 3ª y 4ª componentes reconstruidas para el Perfil 1. Su contribución a la varianza es del 99,93%.

5.2.4.5. *Obtención de características morfodinámicas del perfil*

A partir de la Tabla 5.2 se ha podido identificar un suavizado generalizado a lo largo del perfil desde la primera hasta la última campaña. La pendiente de barlovento, que siempre suele ser más suave que la de de la cara de deslizamiento, ha mantenido una tendencia decreciente y relativamente más estable, con una pendiente media de 10,3° y una desviación estándar de 1,6°. Como era de esperar, el talud de sotavento ha sufrido mayores cambios, reflejando una pendiente media de 15,7° con una desviación estándar de 6,8°. Estas alteraciones han sido causadas tanto por el incremento en la altura de duna como de las importantes extracciones realizadas en esta zona a lo largo de todo el periodo de estudio (Tabla 5.2). De este modo, se demuestra que la altura de duna ha variado durante todo el seguimiento, aunque se ha identificado una tendencia a un aumento generalizado, con una altura media de 31,3 m durante todo el estudio, alcanzando hasta los 41,1 m de altura en 2006. El continuo avance de la cresta dunar también se ha medido teniendo como referencia la cercanía a la carretera, con un valor máximo de 38 m año<sup>-1</sup> de Junio de 2000 a Noviembre de 2003, y un avance medio de 17,5 m año<sup>-1</sup> durante todo el periodo de estudio. En la Fig. 5.11 se muestra una gráfica donde se refleja el avance del perfil desde 1956 hasta 2006, utilizando fotografías aéreas y datos topográficos derivados de este estudio.

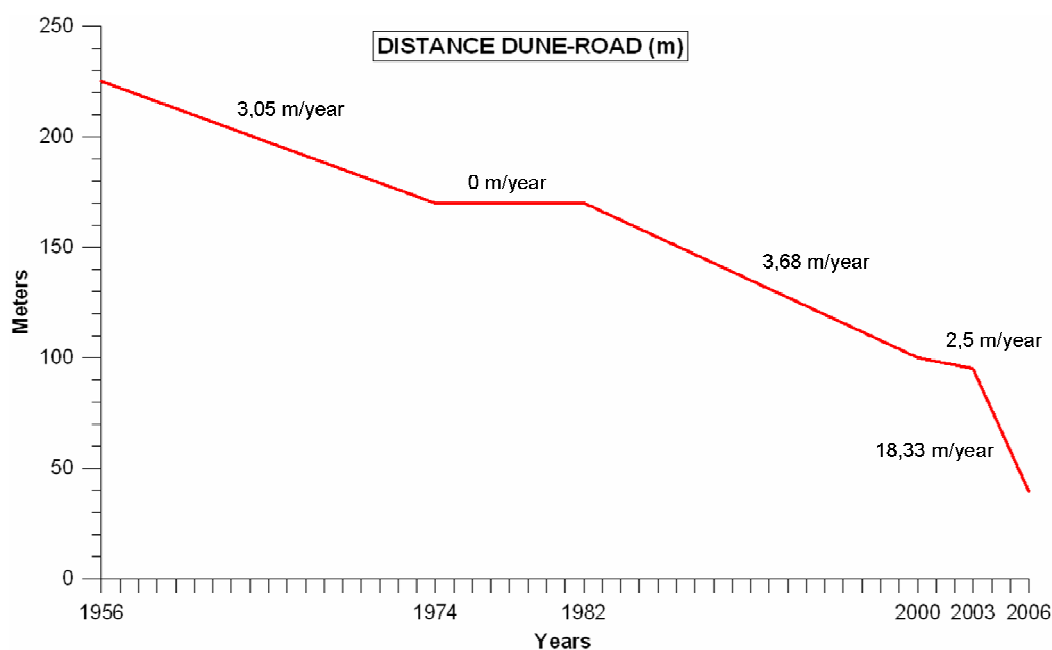


Fig. 5.11. *Tasas de avance del perfil dunar durante el periodo 1956-2006 (Fuente: Navarro et al., 2007).*



Tabla 5.2. Parámetros relativos a las pendientes dunares y cambios en la altura basados en la campaña de largo plazo. Las zonas en cuestión se detallan en el esquema de la Figura 4.10.

		JUN 95	MAY 99	NOV 99	JUN 00	NOV 03	MAY 06	Media	Desviación
<b>Pendiente barlovento (°)</b>	<b>Max</b>	19,1	15,3	13,4	16,9	14,2	14,1	15,8	2,2
	<b>Media</b>	11,9	11,0	10,6	11,0	9,3	7,4	10,3	1,6
	<b>Min</b>	7,3	6,7	7,7	6,3	4,1	2,2	5,6	2,1
<b>Pendiente sotavento (°)</b>	<b>Max</b>	13,6	32,4	23,9	28,3	13,0	17,1	20,8	8,1
	<b>Media</b>	9,0	26,6	17,6	18,3	13,0	8,6	15,7	6,8
	<b>Min</b>	4,3	21,4	10,9	8,4	13,0	2,3	10,9	6,8
<b>Altura pie duna (m)</b>		4,1	4,2	4,7	5,3	5,1	4,3	4,6	0,5
<b>Altura cresta (m)</b>		23,1	32,6	32,2	31,8	31,3	41,1	31,3	4,9
<b>Altura pie sotavento (m)</b>		16,6	17,6	19,7	21,4	29,0	35,7	23,4	6,5
<b>Distancia pie duna-cresta (m)</b>		90	150	150	160	280	310	193,9	79,0
<b>Distancia cresta-carretera (m)</b>		320	260	259	250	120	90	212,2	83,6
<b>Avance duna (m/año)</b>		-	15,3	2,0	15,4	38,0	12,0	17,5	12,1

Comparando estos resultados con otras dunas, dichos valores de migración se asemejan mucho a los calculados para los barjanes de Jericoacoara, situados en el estado de Ceará, en la costa noreste de Brasil (Jiménez et al., 1999), cuyos valores oscilaban entre  $14,6 \text{ m año}^{-1}$  y  $21 \text{ m año}^{-1}$ , siendo la tasa media de migración de  $17,5 \text{ m año}^{-1}$ , al igual que se ha hallado en la duna de Valdevaqueros. Por otro lado, en el mismo Ceará también se estudió la migración de mantos arenosos en la región de Pegen, aunque las tasas de avance eran algo menores, rondando los  $6 \text{ m año}^{-1}$ , a pesar de ser causadas por los efectos del fenómeno climático de El Niño. De dicho estudio se concluyó que las tasas de migración dependían de las dimensiones de las dunas estudiadas, de modo que la migración disminuía a medida que el tamaño de las dunas móviles aumentaba. Según Kocurek y Ewing (2005), las dunas se reorientan sólo en las terminaciones de sus crestas cuando ocurre un cambio en el régimen de vientos, siendo más rápida la tasa de formación de nuevas dunas pequeñas que la tasa de reorientación de dunas ya existentes (de forma que darían lugar a patrones dunares más complejos).

Asimismo, en las dunas móviles de Doñana, Ojeda et al. (2005) detectaron tasas medias de avance de  $1,2 \text{ m año}^{-1}$  con tasas máximas de  $5 \text{ m año}^{-1}$  para el periodo comprendido entre 1977 y 1999.

Según otros resultados obtenidos por Bailey y Bristow (2004) en las dunas parabólicas de Aberffraw (Norte de Gales), la tasa media de migración para estas dunas durante un periodo de 53 años fue de  $1,3 \text{ m año}^{-1}$ . En general, este tipo de tasas de movimiento de varios metros al año son características de formas dunares individuales pertenecientes a sistemas dunares transgresivos. Estas formas individuales son dinámicas y a menudo manifiestan rápidos cambios en la forma y posición, dependiendo del régimen de vientos (Rust y Illenberger, 1996).

#### *5.2.4.6. Obtención de variaciones y tasas volumétricas del perfil*

Tal como se deduce de la Tabla 5.3, el volumen neto total explicado por las 4 componentes de forma conjunta asciende a  $1.513 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  durante los 11 años de estudio (i.e.,  $140 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), mientras que los volúmenes netos entre cada campaña oscilaron desde 317 (acreción) a  $-56$  (erosión)  $\text{m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Tabla 5.4).

Por otra parte, además de los factores meteorológicos, las actividades antrópicas también han alterado el estado de la duna, ya que se llevaron a cabo numerosos movimientos de arena a lo largo del periodo de investigación. Desde 1995 a 2006

(siendo consecuente con el periodo del estudio a largo plazo), la Demarcación de Costas retiró un volumen superior a  $366.000 \text{ m}^3$  (Tabla 3.2); esto significa una media de aproximadamente  $33.300 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  a lo largo de 200 metros del lado de sotavento dunar que más afectaba a la carretera, lo que equivale a  $166 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Comparando este último dato con la tasa de acumulación natural de arena que ha sufrido el perfil (un total de  $1.513 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  en un periodo de 11 años, es decir,  $138 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , tal como se extrae de la Tabla 5.3) podemos comprobar que las ganancias volumétricas del perfil siguen compensando las grandes cantidades extraídas. Si consideramos ambos volúmenes (el ganado por el perfil y el extraído anualmente) se obtiene un volumen total de  $304 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$  desplazado por la duna de forma natural.

A raíz de la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4, se ha podido identificar el particular comportamiento dunar experimentado durante el último periodo analizado (Nov'03-May'06), cuando la duna acumuló  $683 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  ( $273.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), a pesar de los  $372,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  ( $124 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) de arena extraídos durante esos 3 años (Tabla 3.1), que representan el 45% del sedimento acumulado de forma natural en el perfil. Por tanto, con el fin de controlar el avance dunar hacia la carretera, las extracciones de arena deberían incrementarse aproximadamente en un 55%, de forma proporcional a la diferencia volumétrica anteriormente comentada. Sería por tanto útil, considerar otras alternativas para lograr métodos de control más económicos y sostenibles. Además, las continuas intervenciones antrópicas dificultan una aproximación más fiel del análisis de los cambios experimentados por el perfil de forma natural, por lo que se hace necesario analizar el comportamiento dunar a menor plazo con el fin de evaluar qué método sería más adecuado para gestionar la duna atendiendo a los patrones de comportamiento.

Tabla 5.3. Volúmenes de erosión y acreción ( $m^3 m^{-1}$ ) obtenidos entre cada levantamiento tras el análisis de las 4 componentes aisladas reconstruidas

PERFIL 1 - VOLUMEN ( $m^3/m$ )											
PERIODO	1 <sup>a</sup> COMPONENTE	2 <sup>a</sup> COMPONENTE			3 <sup>a</sup> COMPONENTE			4 <sup>a</sup> COMPONENTE			TOTAL
		110-225	225-400	Vol. neto	110-300	300-400	Vol. neto	110-242	242-400	Vol. neto	Vol. neto
JUN 95-MAY 99	702	-386	464	77	396	-255	141	-151	91	-60	860
MAY 99-NOV 99	-83	73	-93	-20	117	-78	39	87	-50	36	-28
NOV 99-JUN 00	158	31	-43	-12	40	-34	6	84	-51	33	185
JUN 00-NOV 03	-12	638	-809	-171	-47	34	-13	26	-18	8	-187
NOV 03-MAY 06	993	836	-1.055	-220	-93	58	-34	-142	86	-56	683
<b>TOTAL</b>	1.758	1.191	-1.537	-346	414	-275	139	-97	58	-38	1.513

Tabla 5.4. Tasas volumétricas ( $m^3 m^{-1} \text{año}^{-1}$ ) derivadas del análisis de las 4 componentes aisladas reconstruidas

PERFIL 1 - TASAS ANUALES ( $m^3/m\text{-año}$ )											
PERIODO	1 <sup>a</sup> COMPONENTE	2 <sup>a</sup> COMPONENTE			3 <sup>a</sup> COMPONENTE			4 <sup>a</sup> COMPONENTE			TOTAL
		110-225	225-400	Vol. neto	110-300	300-400	Vol. neto	110-242	242-400	Vol. neto	Vol. neto
JUN 95-MAY 99	179	-99	118	20	101	-65	36	-39	23	-15	220
MAY 99-NOV 99	-167	146	-185	-40	233	-156	77	173	-101	73	-56
NOV 99-JUN 00	271	53	-74	-21	69	-58	11	145	-88	57	317
JUN 00-NOV 03	-3	187	-237	-50	-14	10	-4	8	-5	2	-55
NOV 03-MAY 06	397	334	-422	-88	-37	23	-14	-57	35	-22	273

### 5.3. Medio plazo (meses)

#### 5.3.1. Introducción

Tras el análisis de los resultados derivados del estudio de la duna a largo plazo y la observación in situ, se planteó la hipótesis de que la evolución morfodinámica del perfil ocurría de manera considerablemente rápida. Asimismo, debido a la existencia de factores externos al ambiente dunar (actuaciones antrópicas llevadas a cabo de forma continua) se hacía más difícil identificar cambios ocurridos en el perfil a menor escala temporal, de modo que posiblemente muchos episodios evolutivos pudieran quedar sin determinar.

Por este motivo, posteriormente al seguimiento de largo plazo, se realizaron dos seguimientos a medio plazo (escala mensual) pero con distintas frecuencias. Durante el primer seguimiento, llevado a cabo de Mayo a Diciembre de 2006, se tomaron levantamientos mensuales de la duna. Por otra parte, durante el segundo seguimiento, dichos levantamientos se realizaron cada dos meses, efectuándose en el periodo de Septiembre de 2008 a Agosto de 2009 (ambos inclusive). A continuación se muestran los levantamientos topográficos realizados en cada seguimiento:

*Tabla 5.5. Fechas de los levantamientos realizados en la campaña de medio plazo*

<b>SEGUIMIENTO A MEDIO PLAZO</b>	
<b>MENSUAL</b>	<b>BIMENSUAL</b>
mayo 2006	septiembre 2008
junio 2006	diciembre 2008
julio 2006	febrero 2008
agosto 2006	abril 2008
septiembre 2006	junio 2008
octubre 2006	agosto 2008
noviembre 2006	
diciembre 2006	

Como observación preliminar derivada del seguimiento dunar a medio plazo, se determinó que el transporte eólico sedimentario enterraba una tablestaca de 1 m de altura cada mes en la zona de la cresta. En términos económicos, esta rápida acreción implica un coste de mantenimiento de las tablestacas de  $0,39 \text{ € m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , que asciende aproximadamente a  $142,35 \text{ € año}^{-1}$  para cada metro lineal de tablestacado. Cabe destacar, que en toda la superficie dunar se suelen ir colocando unos 1.500 metros de tablestacas, entre los cuales, unos 700 metros lineales se ubican en la parte más activa de la duna. Esto significa que el coste total es de unos  $99.645 \text{ € año}^{-1}$  sólo para la zona más activa de la duna (MARM, 2010).

### 5.3.2. Obtención del perfil sin tratamiento estadístico

En general, tanto los seguimientos a medio plazo mensuales (Fig. 5.12) como bimensuales (Fig. 5.13) muestran evoluciones del perfil con comportamientos a primera vista algo distintos. Los levantamientos pertenecientes al seguimiento mensual parecen sufrir fuertes variaciones (sobre todo en la cresta y a sotavento), de forma que se aprecia lo que parece ser la formación de dos acumulaciones en la cresta, aunque se hace difícil evaluar tendencias del perfil entre diferentes levantamientos. En cuanto a la representación de los levantamientos bimensuales, aunque la morfología descrita parece algo más homogénea, resulta casi imposible interpretar la evolución general del perfil de forma clara. Por ello, con el fin de lograr una interpretación más objetiva e intuitiva de esas variaciones, se ha llevado a cabo la reconstrucción de las dos primeras componentes de cada serie de datos, cuya explicación a la varianza de los datos ya alcanza el 99,92% y el 99,98% para la campaña mensual y bimensual, respectivamente, tal como se detalla en el punto 5.3.3.

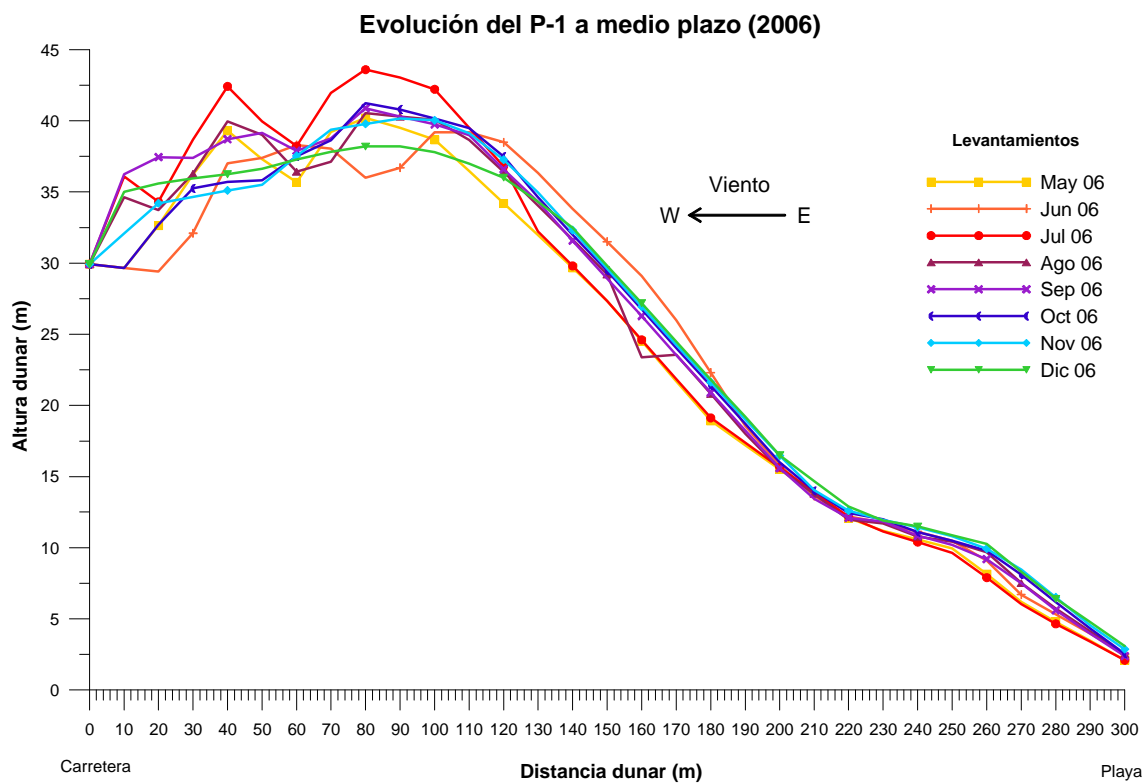


Fig. 5.12. Representación de la evolución del perfil dunar sin tratamiento estadístico durante el seguimiento mensual de Mayo a Diciembre de 2006

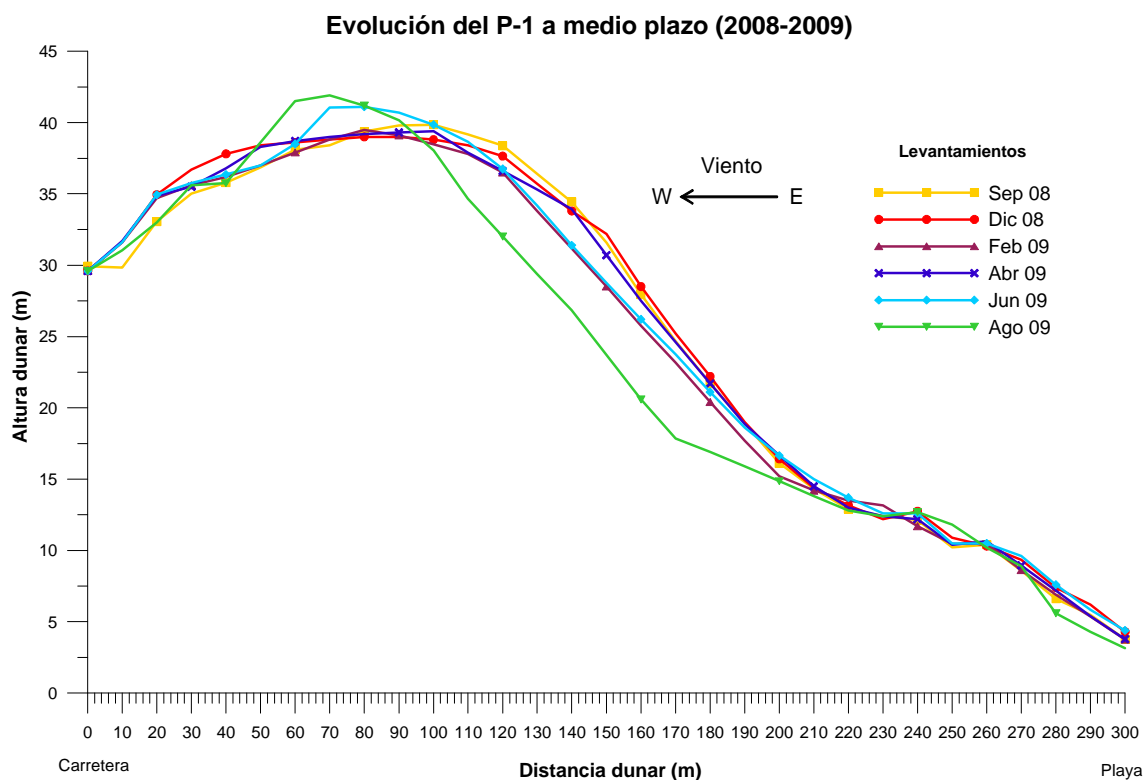


Fig. 5.13. Representación de la evolución del perfil dunar sin tratamiento estadístico durante el seguimiento bimensual de Septiembre de 2008 a Agosto 2009



### 5.3.3. Obtención de las componentes espaciales y temporales del perfil a medio plazo mediante la aplicación de las EOFs

Habiendo demostrado la utilidad de los perfiles reconstruidos, a partir de este momento, se procede a la obtención y análisis de los resultados a partir de la metodología descrita en el ANEXO II.

#### *5.3.3.1. Reconstrucción del perfil medio mensual (May-Dic 2006)*

En general, los perfiles reconstruidos muestran que la duna ha experimentado más variabilidad desde Septiembre de 2008 a Agosto de 2009 que de Mayo a Diciembre de 2006.

El perfil dunar medio desde Mayo a Diciembre de 2006 viene representado por la 1ª componente, con el 99.81% de la variabilidad total de los datos (Fig. 5.14). En este perfil medio, a diferencia del obtenido para el seguimiento bimensual, se identifica un punto de disminución en la altura en torno al p.k. 60, formando una especie de doble cresta. Analizando las variaciones que aparecen entre los diferentes levantamientos de esta campaña mensual se observa que el perfil medio muestra un elevado aumento (de aproximadamente 2,5 metros) durante sólo los primeros dos meses, coincidiendo con una etapa de fuertes vientos de levante, como puede consultarse en la Fig. 6.3. Desde entonces en adelante, éste disminuye su altura alrededor de 1,75 m, probablemente favorecido por la extracción de 30.000 m<sup>3</sup> de arena durante Agosto y Septiembre de 2006 y finalmente, durante los últimos tres meses el perfil medio tiende a un régimen estacionario. Tras comparar los perfiles del primer con el último levantamiento de esta serie mediante Autocad, se obtiene que el perfil ha experimentado una acreción de 219 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> durante estos 6 meses, es decir, una tasa de transporte sedimentario de 36,5 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> mes<sup>-1</sup>.

#### *5.3.3.2. Reconstrucción de la 2ª componente (May- Dic 2006)*

La 2ª componente, con una contribución a la varianza total de los datos del 0,11%, muestra cambios puntuales en la altura de la duna de hasta 3 metros, concretamente durante la primavera, tal como puede verse en la parte inferior de la Fig. 5.14. Esto se traduce en unas diferencias relativas en altura de unos 5 m durante esta estación a lo largo de la cara de barlovento y la cresta dunar. Estos comportamientos basculantes,

separados por puntos pivotantes alrededor del p.k. 60 y 110, conllevan desplazamientos dunares entre campañas, especialmente desde Junio a Julio de 2006 (Fig. 5.14), debido al incremento en la fuerza del viento. Como resultado, la 2ª componente describe variaciones en la morfología de la cresta dunar así como en las pendientes desde la primavera (la arena tiende a formar dos cúmulos) hasta el invierno (tendiendo a adoptar un perfil más homogéneo). Sin embargo, este brusco suavizado de la pendiente parece estar directamente relacionado con las extracciones y movilizaciones de arena llevadas a cabo durante el otoño de 2006.

### *5.3.3.3. Reconstrucción del perfil medio bimensual (Sep 2008-Ago 2009)*

Por otro lado, la 1ª componente reconstruida para la campaña bimensual comprendida de Septiembre de 2008 a Agosto de 2009 (Fig. 5.15), que explica un 99,84% de la variabilidad total de los datos, muestra un perfil medio con una morfología algo más suave que el mensual, con periodos alternativos de aumento y descenso de la altura dunar. La altura máxima de la cresta dunar fue de 41 metros durante Diciembre de 2008. Sin embargo, desde la primera a la última campaña, el perfil medio ha experimentado una pérdida de altura total de 2 metros en el pie de duna, de 2,5 metros en la cara de barlovento y de 3,75 metros en la cresta dunar. En términos volumétricos esto significa que el perfil ha sufrido una erosión neta de  $404,84 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  durante casi un año, es decir, de  $-36,80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  al mes. El episodio más erosivo, con una pérdida volumétrica de  $450,93 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ , se ha identificado de Junio a Agosto de 2009, como resultado de un desplazamiento hacia tierra de 15 a 20 metros, debido a los fuertes vientos de levante y, por otro lado, a las importantes extracciones de arena realizadas a sotavento. Hay que tener en cuenta que  $76 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  de arena (de un total de  $15.200 \text{ m}^3$ ) fueron extraídos del área de estudio antes del levantamiento de Agosto de 2009. En consecuencia, un excedente de  $374,93 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  traspasó la carretera, fuera del área de estudio, en el transcurso de Junio a Agosto de 2009, tal como se observó in situ.

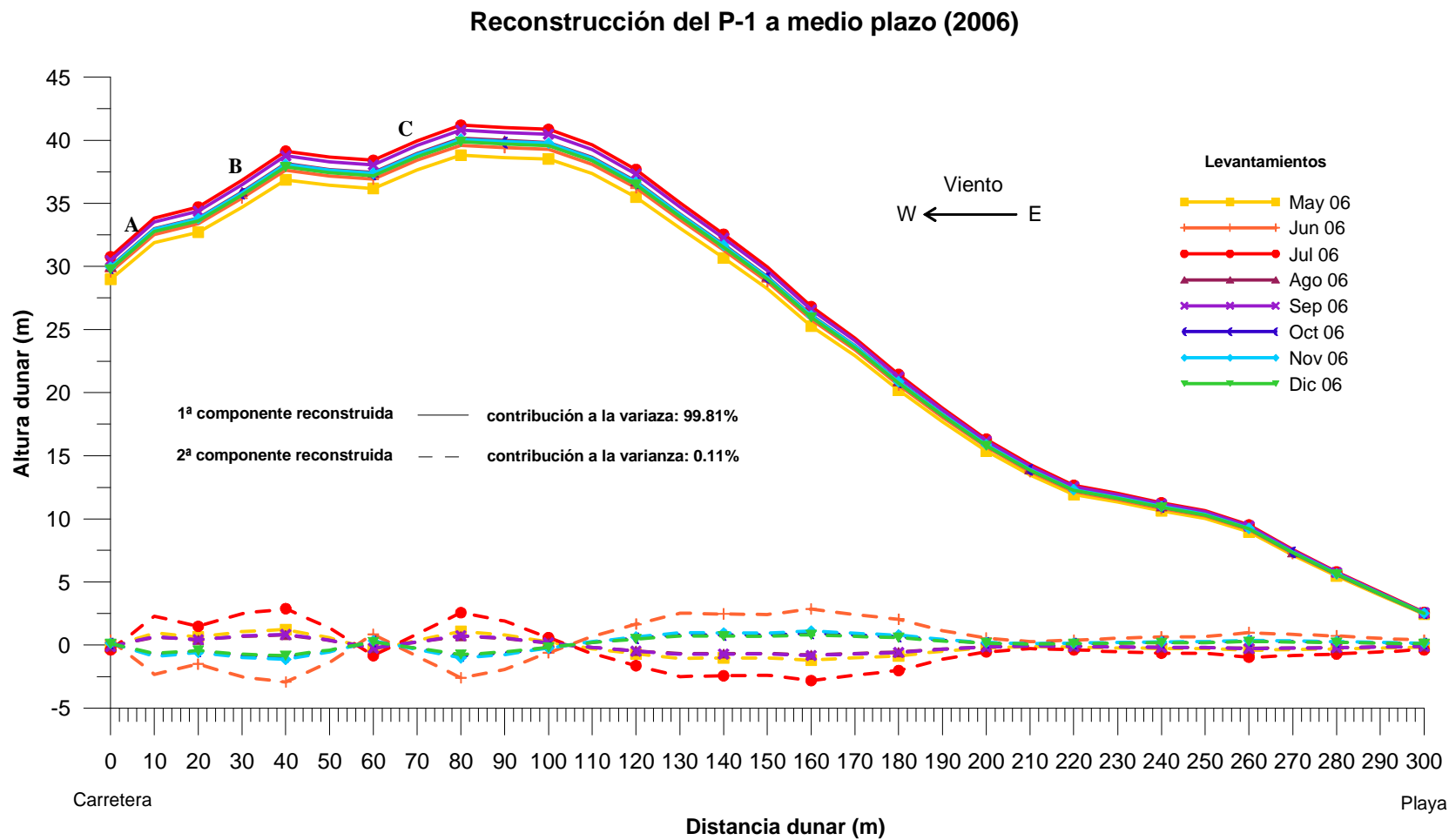


Fig. 5.14. Representación de la reconstrucción del perfil dunar durante el seguimiento mensual (Mayo-Diciembre 2006). La 1ª y 2ª componente se muestran con una línea continua y discontinua, respectivamente. Las letras A, B y C identifican las distintas caras de sotavento del perfil.

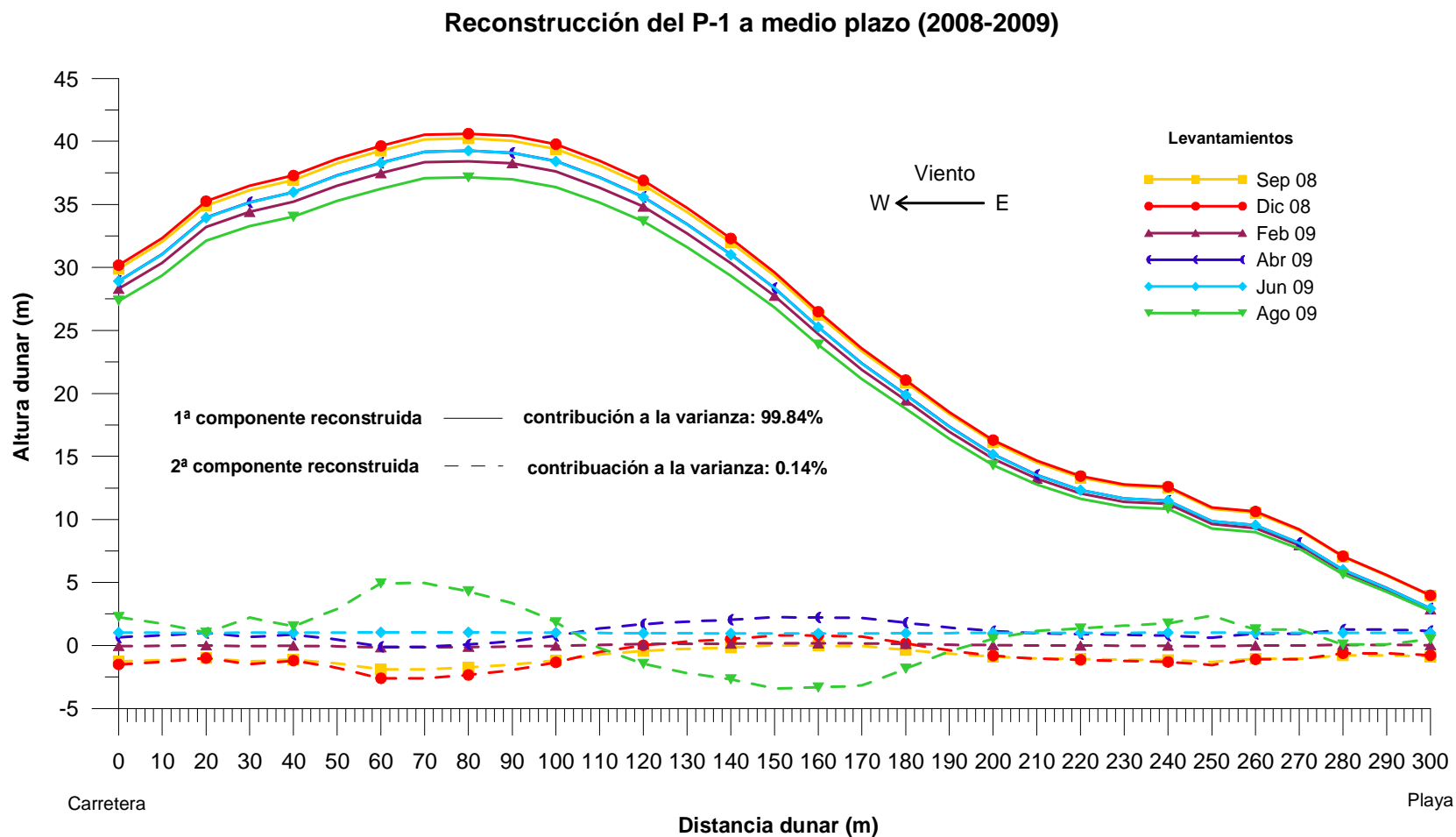


Fig. 5.15. Representación de la reconstrucción del perfil dunar durante el seguimiento bimensual (Septiembre 2008-Agosto 2009). La 1ª y 2ª componente se muestran con una línea continua y discontinua, respectivamente

En resumen, teniendo en cuenta la cantidad total acumulada a lo largo del perfil así como las extracciones llevadas a cabo, la acreción natural de Septiembre de 2008 a Agosto de 2009 fue de  $280 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ , es decir, de  $25,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ .

#### 5.3.3.4. *Reconstrucción de la 2ª componente (Sep 2008-Ago 2009)*

La 2ª componente reconstruida (Fig. 5.15), cuya contribución a la variancia de los datos es del 0,14%, muestra unas diferencias en la altura de aproximadamente 1 metro a lo largo del perfil dunar. No obstante, en el último levantamiento de Agosto de 2009 se identifica un importante comportamiento basculante en el que el sedimento es transportado desde barlovento hacia la cresta, tal como se detecta en el análisis a largo plazo (siguiendo la explicación de la Fig. 5.5). En general, la cara de barlovento ha disminuido en altura a favor de un aumento en la altura de la cresta dunar.

## 5.4. Corto plazo (días)

### 5.4.1. Introducción

Del análisis obtenido a medio plazo es obvio destacar que el perfil experimentaba modificaciones significativas no sólo durante las extracciones de arena sino también durante los episodios de aparición de mayor intensidad de viento. Sin embargo, resulta más difícil diagnosticar en qué medida afecta cada uno de estos factores a dichos cambios. Por ello, se hizo necesario el planteamiento de la realización de un seguimiento a menor plazo que nos aproximara a la escala real en la que suceden dichas variaciones. Debido a que se pretendían analizar los efectos que un temporal de levante ocasionaba a corto plazo sobre el comportamiento del perfil dunar, se planificó una campaña de corto plazo cuya duración iba a estar directamente relacionada con el intervalo de tiempo que durara dicho temporal. Se trataba sin duda, de una investigación novedosa en este campo, ya que en otros sistemas dunares no se suelen realizar este tipo de seguimientos intensivos. De este modo, y previendo la aparición de un inminente temporal de levante en Julio de 2006 se llevó a cabo un primer levantamiento topográfico justo antes de que se advirtiera la presencia de vientos suficientemente intensos como para iniciar el transporte sedimentario. En total, el temporal de viento duró aproximadamente 15 días, tras el cual, se volvió a realizar un levantamiento final.

En la Tabla 5.6 se muestran las fechas en las que se llevaron a cabo los levantamientos sucesivos así como las velocidades medias de levante que soplaron durante los respectivos días. Los levantamientos fueron efectuados cada dos días, teniendo en cuenta que el primer levantamiento fue previo al inicio del temporal.

Tabla 5.6. *Fechas de los levantamientos realizados en la campaña de corto plazo y velocidades medias del viento de levante para cada día*

<b>SEGUIMIENTO A CORTO PLAZO</b>	
<b>Levantamientos</b>	<b>Velocidad media (km h<sup>-1</sup>)</b>
05 julio 2006	17,7
08 julio 2006	42,5
10 julio 2006	36,0
12 julio 2006	44,6
14 julio 2006	43,3
16 julio 2006	39,5
18 julio 2006	33,9
20 julio 2006	19,9
22 julio 2006	13,2

#### 5.4.2. Obtención del perfil sin tratamiento estadístico

Según muestran los datos brutos obtenidos a partir de la campaña de corto plazo (Fig. 5.16), se observa a priori un perfil con ciertas variaciones y lo que parece la formación de dos crestas en la parte más elevada de la duna. Sin embargo, resulta complicado identificar durante qué días el transporte de sedimentos fue más efectivo.

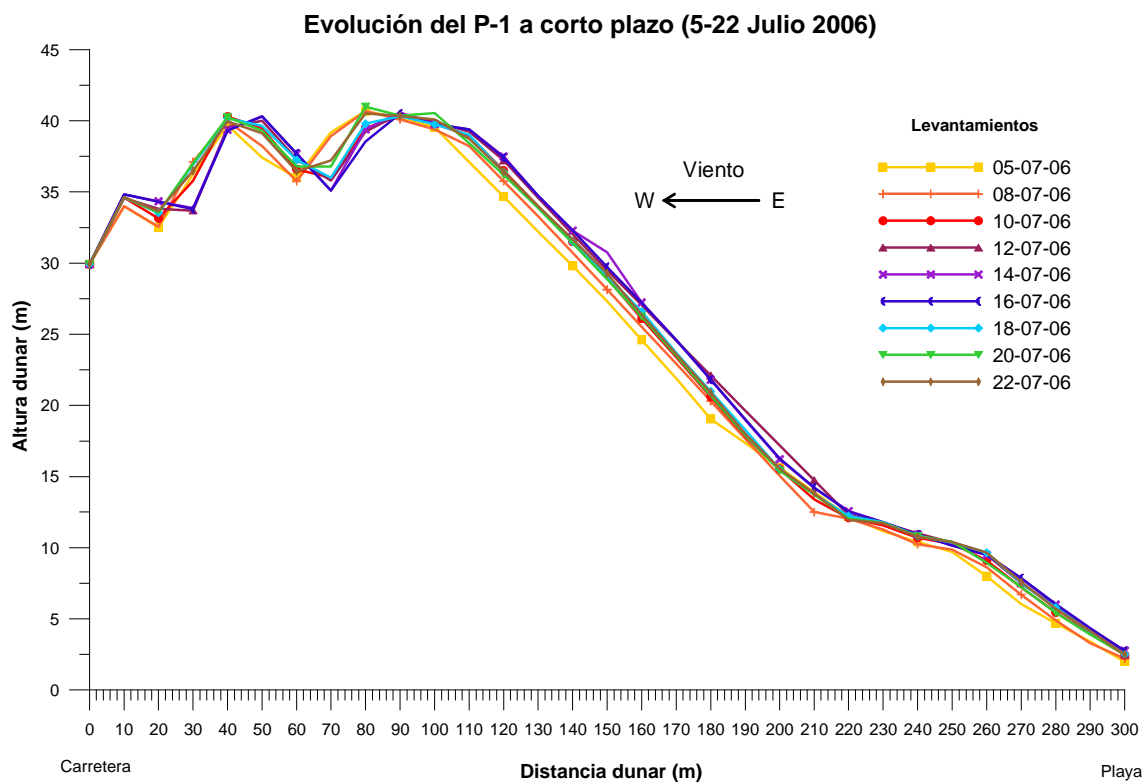


Fig. 5.16. Representación de la evolución del perfil dunar a corto plazo (5-22 Julio de 2006) sin tratamiento estadístico. La campaña fue realizada durante una quincena bajo fuertes vientos de levante.

#### 5.4.3. Obtención de las componentes espaciales y temporales del perfil a corto plazo mediante la aplicación de las EOFs

Para interpretar mejor los cambios acontecidos durante esta campaña, se ha procedido a la extracción de las primeras dos componentes reconstruidas del perfil.

##### 5.4.3.1. Reconstrucción del perfil medio

El perfil medio dunar, está reflejado por la 1ª componente (parte superior de la Fig. 5.17) cuya contribución a la varianza de los datos es del 99,95%. Dicho perfil de equilibrio, muestra que, efectivamente existe una acreción vertical de 1,3 metros entre el primer y el último levantamiento, alcanzando una altura máxima de más de 40 metros aproximadamente 9 días después del inicio de la campaña. De lo que se deduce que, desde ese momento, el perfil reduce relativamente su altura favoreciendo su desplazamiento horizontal. Según Tsoar (1985), la velocidad del viento determina la



tasa volumétrica de arena desplazada y ésta última delimita la tasa de avance dependiendo de la tangente del ángulo de inclinación de la pendiente.

Durante la campaña quincenal (17 días en concreto), el perfil ganó  $244,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ , lo que significa una tasa volumétrica neta de  $14,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ . Llama especialmente la atención el hecho de que la cresta del perfil queda definida por la formación de una bicúspide, que se mantiene al lo largo de todo el seguimiento. Estas formaciones pueden ser debidas a la alteración del perfil natural por la colocación, justo en la zona de la cresta, de series de tablestacas perpendiculares a la dirección del viento (Fig. 5.18), de forma que el sedimento transportado queda retenido delante de las estructuras creando un perfil más abrupto.

Por otra parte, la velocidad del viento durante la campaña quincenal presentó valores máximos superiores a  $40 \text{ km h}^{-1}$  durante el cuarto y el decimotercero día una vez iniciado el temporal, tal como puede consultarse en la Tabla 5.6. Estos datos corresponden aproximadamente al periodo de máxima acreción identificado en el perfil. Según Bagnold (1941), los perfiles asimétricos y convexos caracterizan a los barjanes y a las dunas transversas que están sometidos a una sola dirección predominante.

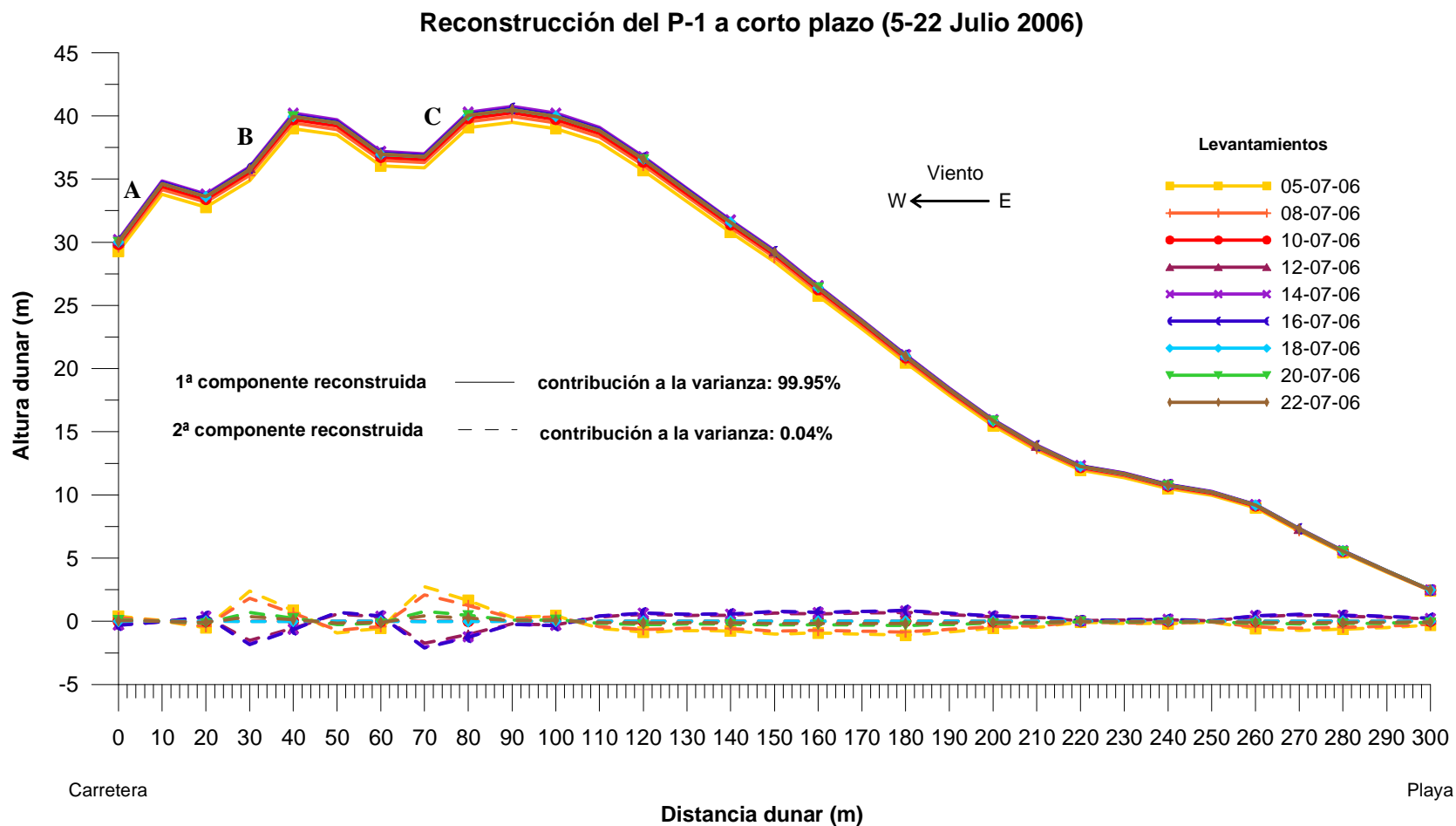


Fig. 5.17. Representación de la reconstrucción del perfil dunar durante el seguimiento a corto plazo La 1ª y 2ª componente se muestran con una línea continua y discontinua, respectivamente. Las letras A, B y C identifican las distintas caras de sotavento del perfil

5.4.3.2. *Reconstrucción de la 2ª componente*

En la parte inferior de la Fig. 5.17 se puede observar la representación de la 2ª componente reconstruida del perfil de corto plazo, tras el análisis estadístico. Esta 2ª componente, que explica un 0,04% de la variabilidad total de los datos topográficos, muestra pequeños comportamientos basculantes entre la cresta dunar y la cara de barlovento, con puntos pivotantes en torno al p.k. 20, 45, 60 y 105. Esto significa que entre dichos puntos, el perfil medio presenta pequeñas variaciones en su altura, suavizando la morfología bicúspide 11 días después del inicio del temporal de levante.



*Fig. 5.18. Vista aérea de la situación de la duna en 2006, donde se aprecia que la arena ya traspasó la línea de la carretera. La instalación de tablestacas se realizó entre 2005 y 2006*

## 5.5. Muy corto plazo (horas)

### 5.5.1. Introducción

Debido a que, tal como veremos en el capítulo 6, pocos sistemas dunares en el mundo pueden contar con las peculiares condiciones eólicas que presenta la duna de Valdevaqueros, apenas existen investigaciones acerca de la morfodinámica dunar a escala horaria. Con este estudio, se pretende una aproximación más realista y precisa de la capacidad migratoria de la duna, más allá de cálculos teóricos de transporte potencial de sedimentos. A pesar de que en la campaña de corto plazo, no hubo factores externos a la dinámica del transporte eólico (como pudieran ser las extracciones, instalación de tablestacas u otras alteraciones antrópicas) las variaciones eran considerables teniendo en cuenta que la escala de tiempo era diaria. Con el fin de identificar la evolución que la duna era capaz de experimentar durante un solo día bajo condiciones de viento de levante de moderadas a severas, se planificó una campaña de 24 horas de duración del 14 al 15 de Agosto de 2009 (Tabla 5.7). Los levantamientos fueron tomados cada hora durante las horas de luz y cada dos horas durante la noche.

*Tabla 5.7. Fecha y hora de los levantamientos realizados en la campaña de muy corto plazo y velocidades medias del viento de levante para cada hora*

<b>SEGUIMIENTO A MUY CORTO PLAZO</b>			
<b>14 de Agosto</b>		<b>15 de Agosto</b>	
<b>Hora</b>	<b>Velocidad media (km h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Hora</b>	<b>Velocidad media (km h<sup>-1</sup>)</b>
15:00	45	2:00	30
16:00	44	4:00	36
17:00	40	6:00	40
18:00	41	8:00	37
19:00	37	9:00	41
20:00	35	10:00	37
21:00	38	11:00	37
22:00	41	12:00	38
0:00	40	13:00	41
		14:00	41
		15:00	40

### 5.5.2. Evolución del perfil a muy corto plazo

#### *5.5.2.1. Análisis de la evolución general del perfil*

Debido a la relativa escasa varianza detectada en los datos del perfil durante esta campaña de muy corto plazo (Fig. 5.19), no ha sido posible aplicar la metodología estadística de las EOF para evaluar el movimiento dunar. Por consiguiente, tras la representación de todos los levantamientos de forma conjunta, se ha identificado que el borde de la cresta dunar y la primera cara de deslizamiento o avalancha situados entre el p.k. 50 a 70, son las zonas que más variabilidad han experimentado, tal como se aprecia en la Fig. 5.19. El borde dunar se limita por un margen brusco que coincide en muchos casos, sobre todo en barjanas, con la cresta dunar (Herrmann et al. 2005) y separa la cara de deslizamiento o avalancha de la cara de barlovento. Como en el caso estudiado por Olivier y Garland (2003), las secciones transversales muestran que los cambios de altura mayores suelen ocurrir justo en el borde de la cresta o cerca de ella. Según Long y Sharp (1964), las dunas con el borde dunar separado de la cresta pueden comportarse de forma distinta de las dunas donde las dos características se unen. En la Fig. 5.20 se muestra una imagen de la abrupta cara de avalancha representada de forma detallada en la Fig. 5.19, situada a unos 52 metros de la carretera.

Teniendo en cuenta que durante este seguimiento de 24 horas la duna sólo ha experimentado cambios volumétricos producidos por la dinámica eólica, se ha calculado que el perfil ha presentado una acreción total de  $22,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ . En el capítulo 6, dedicado al transporte sedimentario, podrán compararse las tasas de transporte reales obtenidas en el presente capítulo con las tasas teóricas calculadas para el perfil para todas las escalas de tiempo analizadas.

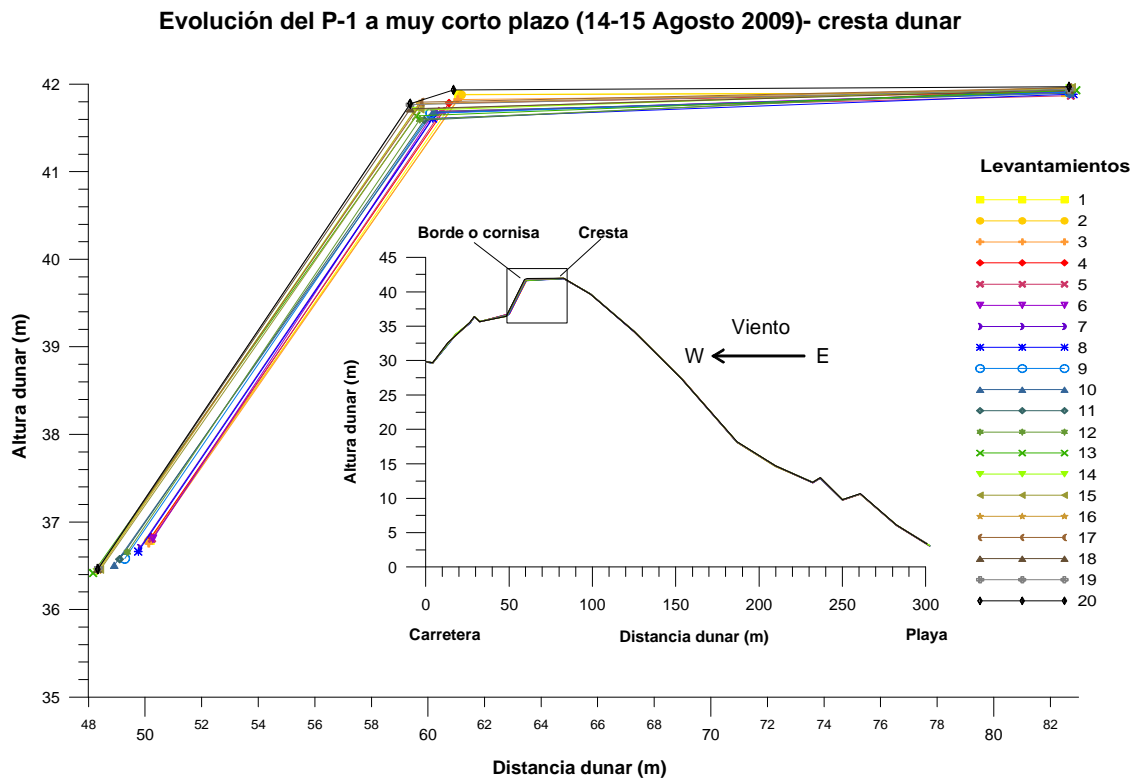


Fig. 5.19. Representación de la evolución del perfil dunar a muy corto plazo (14-15 Agosto 2009) sin tratamiento estadístico. La campaña fue realizada durante 24 h bajo fuertes vientos de levante.



Fig. 5.20. Fotografía de la cara de avalancha con mayor pendiente del perfil durante la toma de datos de muy corto plazo (14-15 Agosto de 2009).

### 5.5.2.2. *Análisis específico del desplazamiento del perfil*

Debido a la dificultad de apreciar y diferenciar visualmente los cambios experimentados por el perfil a tan pequeña escala, se ha procedido a la representación del desplazamiento horizontal y vertical que han sufrido las principales zonas características del perfil dunar. Para ello, se han medido las variaciones en los puntos centrales del pie de duna, cara de barlovento, borde o cornisa de la cresta dunar y la cara de avalancha o de sotavento entre cada levantamiento (véase Fig. 4.4). Tras ello, se han representado los desplazamientos horizontales (Fig. 5.21) y verticales (Fig. 5.23) para cada zona. Dichas distancias han sido determinadas mediante el método euleriano, salvo los desplazamientos de la cresta dunar, que se han calculado mediante el método lagrangiano. Recordemos que la idea básica de la formulación euleriana, cuya metodología es muy popular en la mecánica de fluidos, consiste en examinar partículas de fluido que pasan a través de una región fija del espacio, a medida que el tiempo transcurre. Por otro lado, el punto de vista lagrangiano consiste en seguir las partículas de material del continuo en su movimiento; en nuestro caso, el avance de la cresta.

Según los resultados representados en la Fig. 5.21, el borde de la cresta dunar y la cara de avalancha se han desplazado hacia el interior aproximadamente 1,75 metros tan sólo 24 horas después del inicio de la campaña. Esto significa que la tasa de avance dunar en estos puntos ha sido de  $7,3 \text{ cm h}^{-1}$  durante el temporal de levante. Como resultado del avance de la cresta, se ha obtenido una tasa de transporte de arena de  $10,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$  que se efectuó desde el borde de la cresta dunar a la cara de avalancha o deslizamiento. En la Fig. 5.22 se muestran dos fotografías tomadas durante el seguimiento a muy corto plazo tras la colocación de una estaca de madera en el borde de la cresta dunar. En la primera se aprecia un avance dunar de aproximadamente 20 cm tan sólo 2 horas después y en la segunda de 1 m unas 10 horas después de la fijación del punto de referencia.



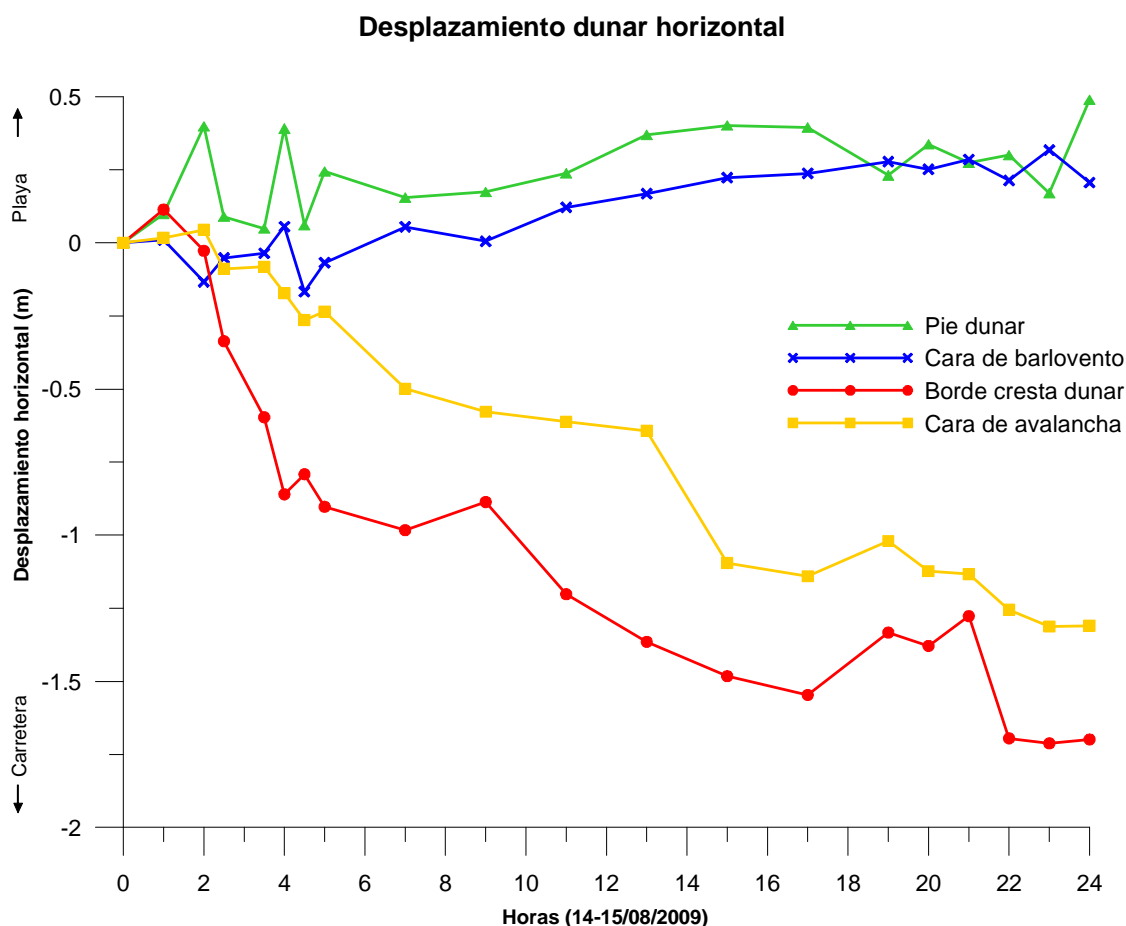


Fig. 5.21. Desplazamiento horizontal en las principales zonas del perfil dunar durante el seguimiento de 24h (véase Fig. 4.4 para la identificación de las zonas)

Por el contrario, el pie de duna y la cara de barlovento han mantenido su posición e incluso han tendido a extenderse algunos pocos centímetros hacia la playa durante todo el seguimiento. Según Tsoar (1985), teniendo en cuenta que la cara de barlovento alcanza un régimen estacionario y que la cara de deslizamiento avanza a un ritmo más elevado, el resultado es de un mayor avance del borde o cornisa en relación al resto de la cresta. De este modo, se identifica con el hecho de que cada duna sujeta a vientos unidireccionales muestra un perfil de régimen estacionario, manteniendo la forma y el tamaño a medida que la duna avanza.

Lamentablemente, no se ha encontrado existencia de investigaciones similares sobre tasas de migración dunar a tan corto plazo, por lo que no es posible comparar estos resultados.



Fig. 5.22. Avance del borde de la cresta dunar tras la colocación de la estaca de madera: a) Transcurridas unas 2 horas; b) Transcurridas 10 horas

Referente al desplazamiento vertical (Fig. 5.23), el pie de duna y la cara de barlovento vuelven a mantener prácticamente su altura, mientras que la cresta dunar se ha reducido 30 cm en altura y la cara de avalancha ha crecido 60 cm. Esto coincide con los resultados del desplazamiento horizontal, ya que la cresta dunar pierde arena en altura para avanzar hacia tierra adentro. De hecho, Watson (1987) señaló que las dunas no pueden aumentar indefinidamente en altura en zonas de vientos unidireccionales, ya que el área de la cresta dunar siempre estará en proceso de erosión. Además, tal como apuntaba Van Dijk et al. (1999) los vientos unidireccionales, (al contrario con lo que sucede si se tratara de vientos con direcciones cambiantes) son más efectivos a la hora de producir un brusco aumento del transporte en la cresta dunar, lo que provoca un descenso relativo de su altura.

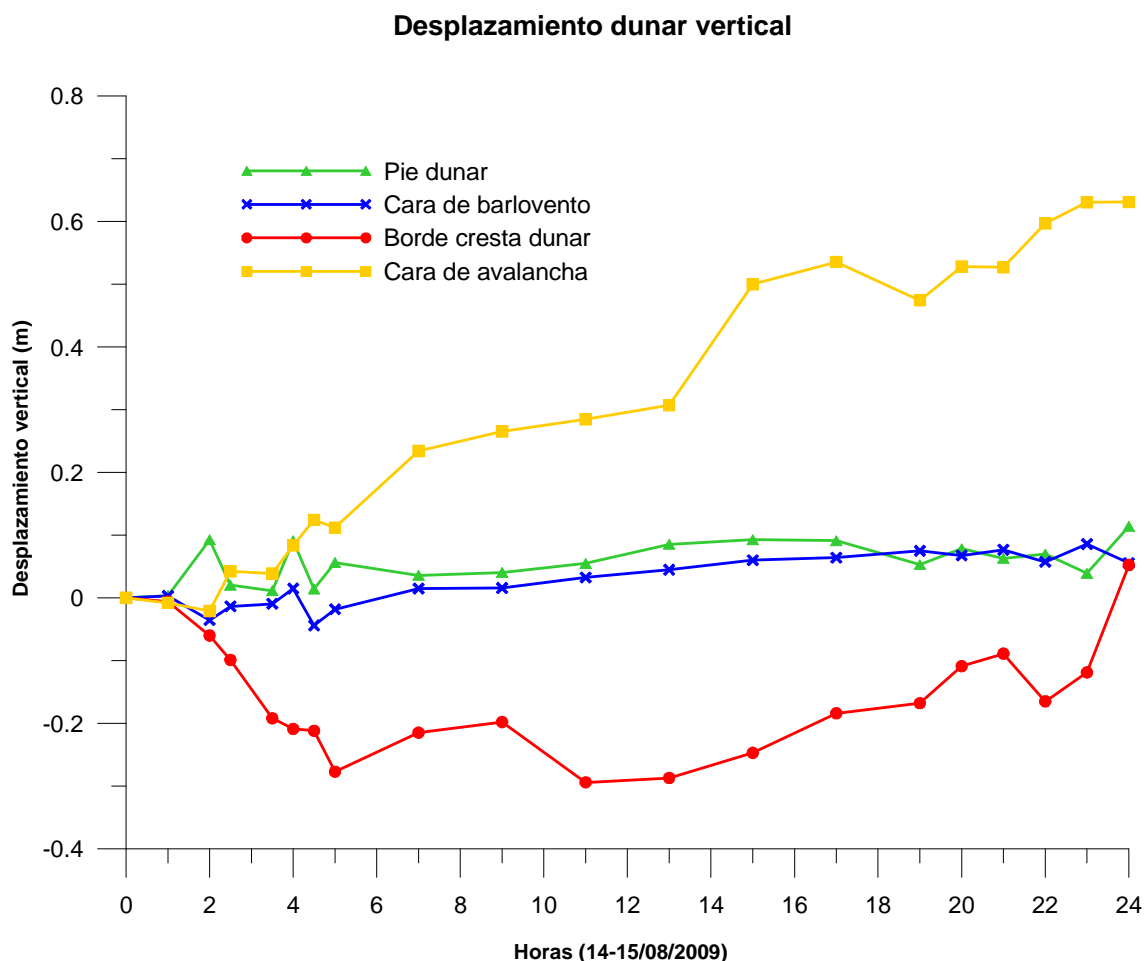


Fig. 5.23. Desplazamiento vertical en las principales zonas del perfil dunar durante el seguimiento de 24h (véase Fig. 4.4 para la identificación de las zonas)

## 5.6. Análisis comparativo de los resultados a distintos plazos

### 5.6.1. Comparación de las pendientes del perfil a diferentes plazos

La mayoría de las superficies existentes en las dunas no son horizontales, por lo que el efecto de la pendiente en las tasas de transporte es potencialmente muy importante. Bagnold (1956) demostró que la tasa de transporte en una superficie inclinada es proporcional a la tasa de transporte sobre una superficie lisa horizontal, al ángulo de la pendiente con la horizontal y al ángulo de rozamiento interno de la arena. Posteriormente, Hardisty and Whitehouse (1988) a través de experimentos de campo, demostraron que las tasas de transporte reales se desviaban bastante de las teóricas dadas por la formulación de Bagnold, sugiriendo que la pendiente jugaba un papel más importante, aumentando la tasa de transporte cuando el viento soplaba pendiente abajo y disminuyéndola cuando el viento circulaba pendiente arriba.

Debido a las constantes alteraciones morfológicas y volumétricas que ha sufrido la duna a lo largo de todos los periodos estudiados, las pendientes del perfil han estado sujetas del mismo modo, a cambios. Por consiguiente, en función del periodo estudiado, la cara de sotavento ha presentado varias pendientes, según se extrae del análisis sobre todo a medio y a corto plazo. En la Fig. 5.24 se representa un pequeño esquema que define las distintas pendientes de sotavento (A, B y C) en función de su posición.

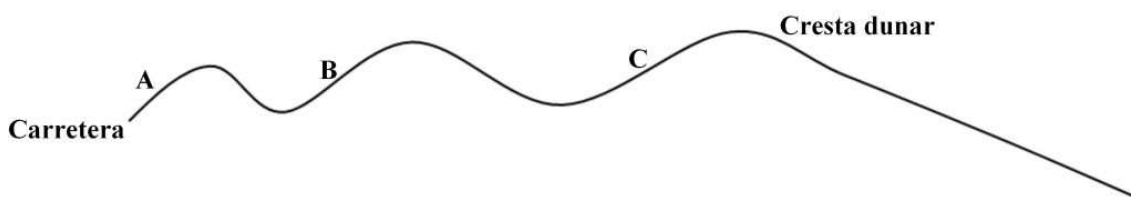
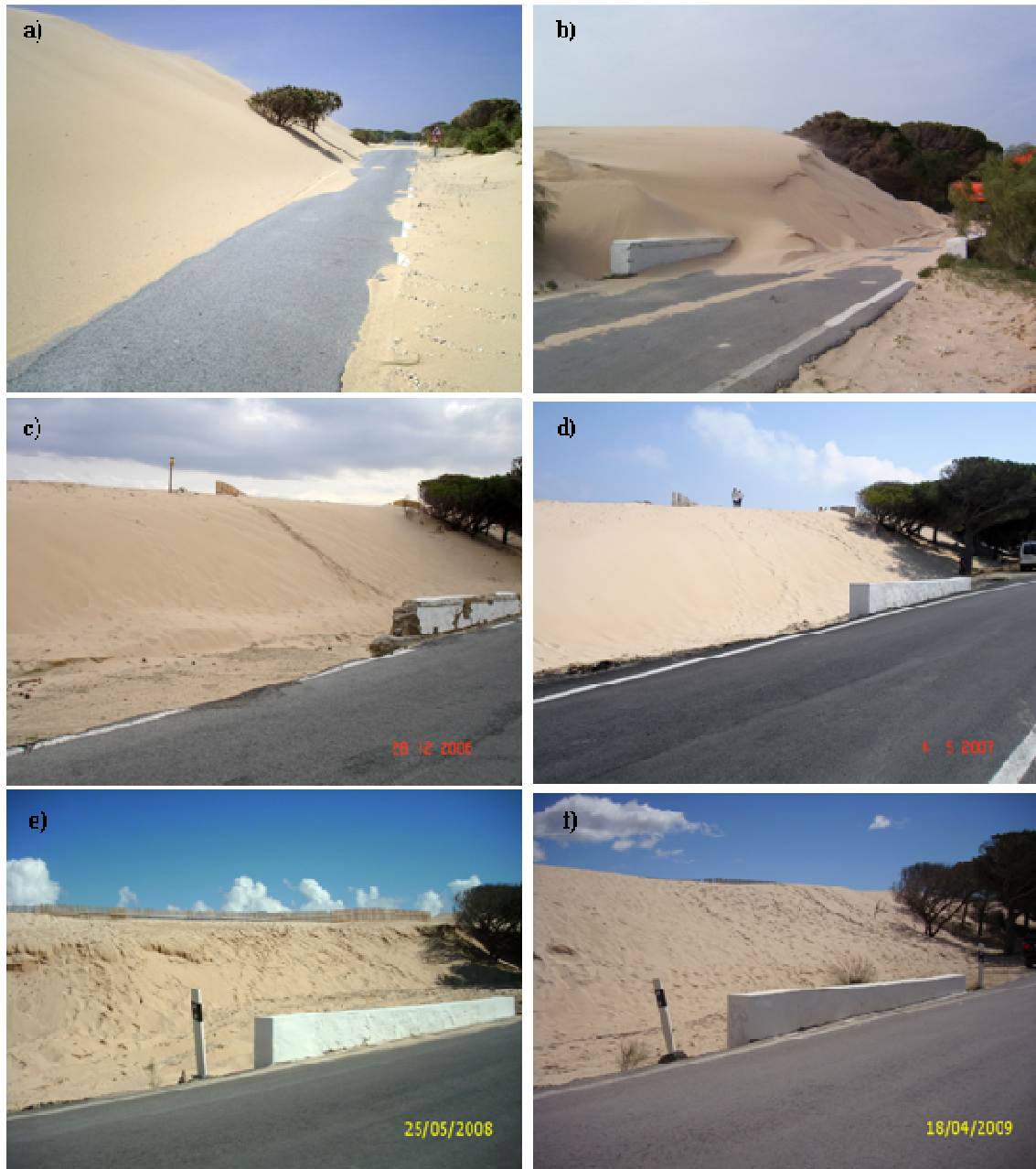


Fig. 5.24. Esquema de la localización de caras de sotavento presentes en el perfil.

La cara de avalancha propiamente dicha (usualmente definida en inglés con el término “*precipitation ridge*” típica de dunas transgresivas con caras de deslizamientos lateralmente muy extensas que desploman sobre terrenos situados hacia tierra) correspondería a la pendiente A, situada junto a la carretera. Esta cara de deslizamiento

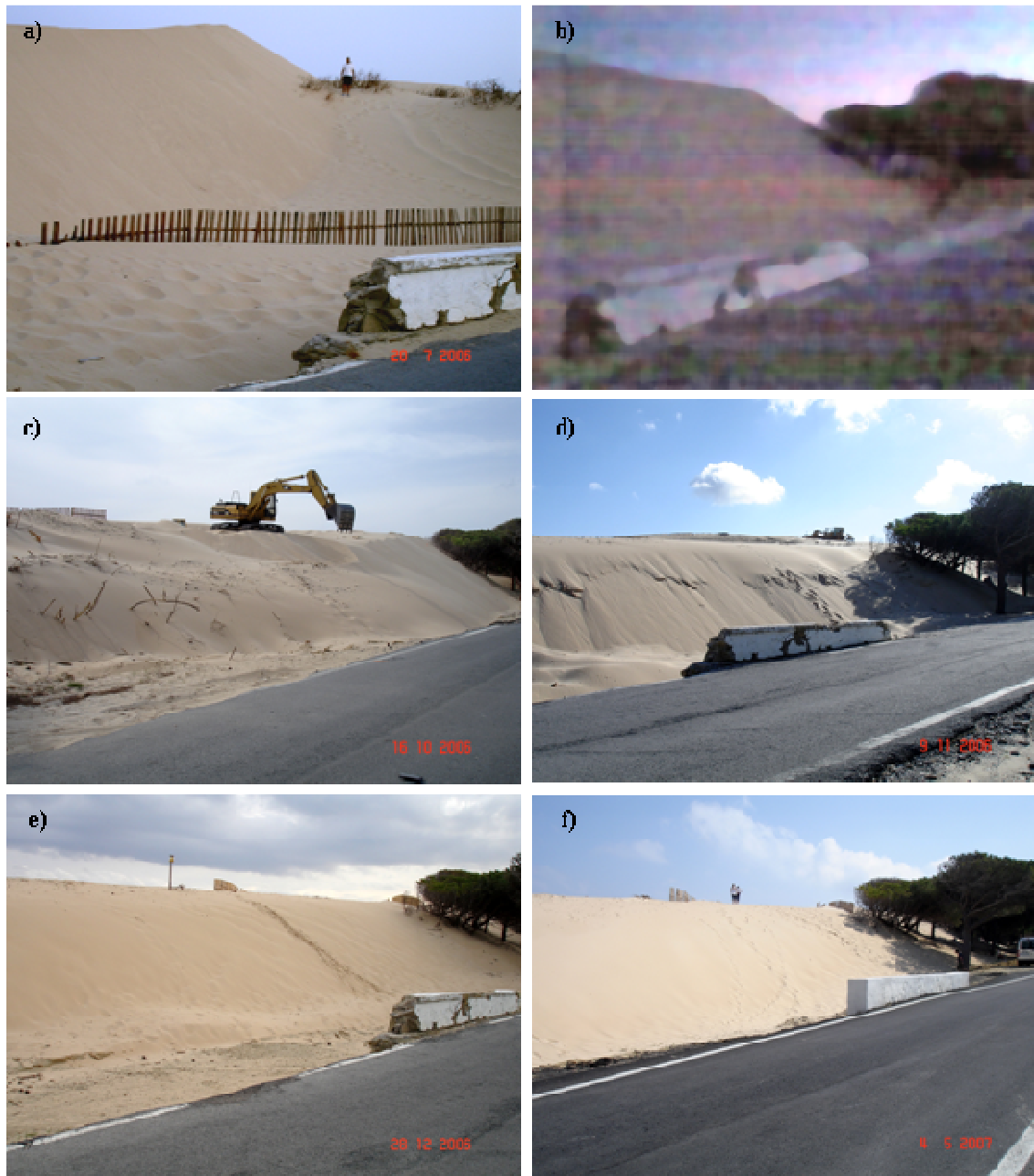
es la que más cambios ha experimentado debido a las múltiples extracciones y movimiento de arenas efectuadas in situ.

Para transmitir una idea de la frecuencia de estos cambios, en la Fig. 5.25 y Fig. 5.26 se muestran una serie de fotografías donde se aprecia la evolución de la pendiente de las caras de avalancha del perfil, según su evolución a largo y medio plazo.



*Fig. 5.25. Varias imágenes de la evolución de la cara de avalancha del perfil a largo plazo: a) 2004; b) 2005; c) 2006; d) 2007; e) 2008; f) 2009.*





*Fig. 5.26. Varias imágenes de la evolución de la cara de avalancha del perfil a medio plazo: a) Julio 2006; b) Septiembre 2006; c) Octubre 2006; d) Noviembre 2006; e) Diciembre 2006; f) Mayo 2007*

En la Tabla 5.8 se muestra un resumen de los valores hallados en las pendientes de barlovento y sotavento para cada plazo de tiempo estudiado. En ella puede observarse como el perfil, tras alcanzar el borde de la carretera, ha ido variando su morfología a sotavento, definiendo nuevas caras de deslizamiento a partir de 2006.

Tabla 5.8. Pendientes medias de barlovento y sotavento para cada periodo de estudio.

CAMPAÑAS	PERIODO		PENDIENTES (°)			
			Barlovento	Sotavento		
				A	B	C
<b>Largo plazo</b>	Jun 95-May 06	Media	10,3	15,7		
		Max	19,1	32,4		
		Desv	1,6	6,8		
<b>Medio plazo</b>	May 06-Dic 06	Media	14,2	23,3	16,8	16,5
		Max	15,5	32,3	22,1	20,5
		Desv	0,8	7,3	3,9	3,9
	Sep 08-Ago 09	Media	12,9	14,0	13,8	
		Max	16,1	15,0	16,0	
		Desv	0,9	1,7	3,3	
<b>Corto plazo</b>	5-22 Jul 06	Media	14,3	24,7	22,7	13,6
		Max	14,6	26,1	30,4	42,0
		Desv	0,2	1,5	5,3	7,1
<b>Muy corto plazo</b>	14-15 Ago 09	Media	13,8	17,3	25,2	
		Max	13,8	17,9	26,1	
		Desv	0,0	0,8	0,4	
<b>Total</b>		Media	13,1	19,0	19,6	15,1
		Desv	1,7	4,7	5,2	2,0

En general, a largo plazo, el perfil ha mostrado pendientes de barlovento con un valor medio aproximado de 13°, mientras que las pendientes de sotavento han sido bastante más variables, presentando valores medios de 19°, 20° y 15° y desviación estándar de 4,7°, 5,2° y 2°, para las caras de deslizamiento A, B y C, respectivamente. Durante los seguimientos de largo plazo (Junio 1995-Mayo 2006) y medio plazo mensual (Mayo-Diciembre 2006) las caras de sotavento experimentaron cambios significativos, con desviaciones estándar bastante elevadas.

Basándose en varias investigaciones en distintos sistemas dunares, Shengyu et al. (2006), afirmaron que las pendientes tenían un ángulo de 10°-20° para barlovento y de 20°-30° para sotavento. Sin embargo, a nivel general y en función del tipo de duna, el ángulo adoptado por el perfil puede variar. Como ejemplo, Tsoar et al. (1996)

encontraron que las dunas remontantes solían tener una altura de unos 20 metros y una pendiente de 20°. En las dunas embrionarias, tal como documentó Hesp (1988), no se suelen encontrar pendientes por encima de los 20°. Por otro lado, la cara de barlovento de un barján típico tiene pendientes entre los 8° y los 20° (Herrmann et al. 2005), aunque lo más común es que el ángulo medio se aproxime a los 12°. Según Van Dijk et al. (1999), las típicas pendientes a sotavento con caras de deslizamiento tienen ángulos que se encuentran próximos a 33°.

De este modo, el hecho de que los resultados de las pendientes a sotavento sean tan dispares y cambien de manera significativa en un intervalo relativamente corto de tiempo, hace suponer que las continuas remodelaciones fisiográficas del perfil llevadas a cabo en momentos puntuales pero de forma continua son las principales responsables de estos cambios. De hecho, el perfil ha llegado a presentar valores máximos cercanos a los 30°-33° en su cara de deslizamiento durante los seguimientos a largo y medio plazo mensual. Al analizar los cambios de las pendientes a muy corto plazo y de un modo más minucioso, se ha observado que el perfil tiende a aumentar progresivamente el ángulo de sus pendientes a sotavento. Concretamente, durante el seguimiento horario, la segunda cara de avalancha situada más cerca de la carretera (A) aumentó su pendiente cerca de 1 grado (aproximadamente de 17° a 18°), mientras que la pendiente a sotavento más abrupta (B) aumentó de 25° a 26° entre el inicio y el fin del seguimiento, es decir en tan sólo 24 horas. Esto demuestra que la evolución natural del perfil es a adoptar pendientes más cercanas al ángulo teórico crítico o de equilibrio y además, que este cambio ocurre con relativa rapidez.

#### 5.6.2. Comparación de las tasas de transporte del perfil a diferentes plazos

A raíz del presente estudio, se han extraído diversas tasas volumétricas del perfil dunar en función de los intervalos de tiempo analizados. En la Tabla 5.9 se sintetizan las tasas medias en diferentes unidades.



Tabla 5.9. Tasas de transporte obtenidas del análisis topográfico de los perfiles a distintos plazos

Campañas	Periodo	Escala	tasa de transporte		
			(m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> )	(m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
<b>Largo plazo</b>	Jun 95-May 06	1 década	1.513	140	0,01
<b>Medio plazo</b>	Sep 08-Ago 09	12 meses	280	306	0,02
	May 06-Dic 06	6 meses	219	438	0,02
<b>Corto plazo</b>	5-22 Jul 06	15 días	244	5.249	0,26
<b>Muy corto plazo</b>	14-15 Ago 09	24 horas	22	8.121	0,41

Los valores extraídos en m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> se agrandan obviamente al aumentar la escala temporal, sin embargo, al representar estas tasas con las mismas unidades (m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> ó kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) se aprecia un aumento considerable del transporte eólico sedimentario sobre todo durante las campañas de corto y muy corto plazo. De este modo, mientras que el transporte sedimentario para la campaña de largo y medio plazo es de 0,01 y 0,02 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>, para las demás campañas de menor intervalo temporal, las tasas resultan alrededor de un orden de magnitud mayor (0,26 y 0,41 kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>). Esto es debido a que dichos seguimientos se realizaron bajo condiciones de levante muy intensas, por lo que estos valores no pueden extrapolarse a largo plazo sin recabar en la frecuencia de aparición de vientos eólicamente capaces de iniciar el movimiento de la arena.

A modo de ejemplo, considerando que el volumen total desplazado por la duna de forma natural es de 304 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (tal como se extrae de la sección 5.2.4.6) y teniendo en cuenta las tasas de transporte diarias calculadas a corto y muy corto plazo, se obtiene que dicho transporte anual puede hacerse efectivo de 2 a 3 semanas si se dan las condiciones eólicas equivalentes a un temporal persistentes de levante con una velocidad media de 32 a 38 km/h.

Estos conceptos están detallados en el capítulo 6, donde se comparan las tasas reales obtenidas de este capítulo con las tasas teóricas calculadas a partir de diferentes métodos.



## **CAPÍTULO SEXTO**



### **ANÁLISIS METEOROLÓGICO, CÁLCULO DE ÍNDICES DE ACTIVIDAD DUNAR Y TRANSPORTE SEDIMENTARIO**



# **CAPÍTULO 6. ANÁLISIS METEOROLÓGICO, CÁLCULO DE ÍNDICES DE ACTIVIDAD DUNAR Y TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS**

## **6.1. Análisis meteorológico**

Las condiciones climáticas y meteorológicas juegan un papel muy importante en el proceso de transporte eólico de sedimentos, teniendo en cuenta las características geológicas de la zona en cuestión. Regnauld y Louboutin (2002) ya comentaron que el comportamiento estacional de un sistema playa-duna, estaba relacionado con las condiciones meteorológicas que afectaban a ese sistema. En nuestro caso, gran parte de las diferencias observadas en cada movimiento del perfil no sólo se han debido a variables meteorológicas (viento, precipitación, temperatura y humedad), condicionadas por la situación geográfica, sino también a factores humanos, como las extracciones de áridos y otras técnicas de gestión dunar como el establecimiento de captadores de arena, llevados a cabo por la Demarcación de Costas.

Además de la dirección y velocidad del viento a distintos plazos, se han analizado otras variables, como la temperatura, la precipitación o la humedad para la estación meteorológica de Tarifa. Estos datos han sido obtenidos a través de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

### 6.1.1. Viento

La energía del viento en lugares costeros es relativamente más elevada que en áreas interiores. El hecho de que la rugosidad superficial sea en general mucho más prominente sobre superficies costeras que sobre el mar produce un fuerte aumento de la tensión de corte superficial cuando el viento cruza la costa. El litoral es también un límite entre dos cuerpos con propiedades térmicas diferentes. Debido a que el albedo

(que relaciona la radiación que cualquier superficie refleja sobre la radiación que incide sobre la misma) en aguas profundas emite una respuesta térmica muy pequeña frente a cambios en la radiación solar, la capacidad térmica de los océanos es considerablemente mayor que en tierra. El tiempo necesario para el calentamiento de la superficie del agua del mar es siempre mayor que el requerido para la superficie terrestre, de igual modo, el proceso de enfriamiento es más rápido en tierra. Este contraste resultante en la temperatura y contenido de humedad del aire entre el mar y la tierra juega un papel esencial en la creación de vientos locales y sistemas meteorológicos (Pye y Tsoar, 1990).

Antes de abordar el análisis de los datos de viento, resulta conveniente definir el marco geográfico-climático en el cual se sitúa la zona de estudio, ya que éste determina, en gran medida, las características del viento resultante.

El Estrecho de Gibraltar es la zona de comunicación entre las aguas del Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo. El efecto que genera la existencia del propio Estrecho se ve reforzado por la existencia de dos cadenas montañosas perfilando dichas costas: el sistema Penibético, que discurre paralelo al litoral más meridional de la Península Ibérica (y describe el límite septentrional del mar de Alborán), desde el cabo de Gata hasta la punta de Tarifa, y al otro lado del Estrecho, las estribaciones de la cordillera del Atlas, que se extiende desde Túnez hasta Melilla, para continuar en forma de arco, hacia el noroeste, configurando las montañas del Rif y terminando en las cercanías de Tánger. Ante esta verdadera "barrera topográfica", las masas de aire que se aproximan al Estrecho, se ven forzadas a discurrir siguiendo aproximadamente la dirección de su eje, orientado de oeste a este. De esta forma, los vientos que inicialmente provengan del sector norte o sur se verán modificados hasta alcanzar una dirección más zonal en sentido este (SE-E-NE) u oeste (SW-W-NW). Los vientos del este y del oeste se verán reforzados a su paso por el Estrecho, como si se tratara de un gigantesco "tubo de Venturi". El estrechamiento induce una disminución de presión a sotavento y una sobrepresión a barlovento, con la consiguiente aceleración del viento (Palomares Losada, 2002).

En el caso de vientos del oeste, a gran escala (escala sinóptica o ciclónica) la orografía induce a la canalización del viento en el mismo estrecho y no antes, razón por la cual la frecuencia del viento de poniente se reparte en un sector más amplio (SW-W-NW), cuya importancia relativa varía a lo largo del año. Por este motivo, las

velocidades no serán tan reforzadas a su paso por el Estrecho, como en el caso de vientos del este. Los sectores de poniente cobran mayor importancia sobre todo en primavera e invierno, cuando existe una mayor dispersión sectorial, influenciada fundamentalmente por el paso de sistemas frontales sobre el Estrecho, lo cual no ocurre en verano. En la Fig. 6.1 se puede identificar el típico carácter estacional de los vientos en el estrecho.

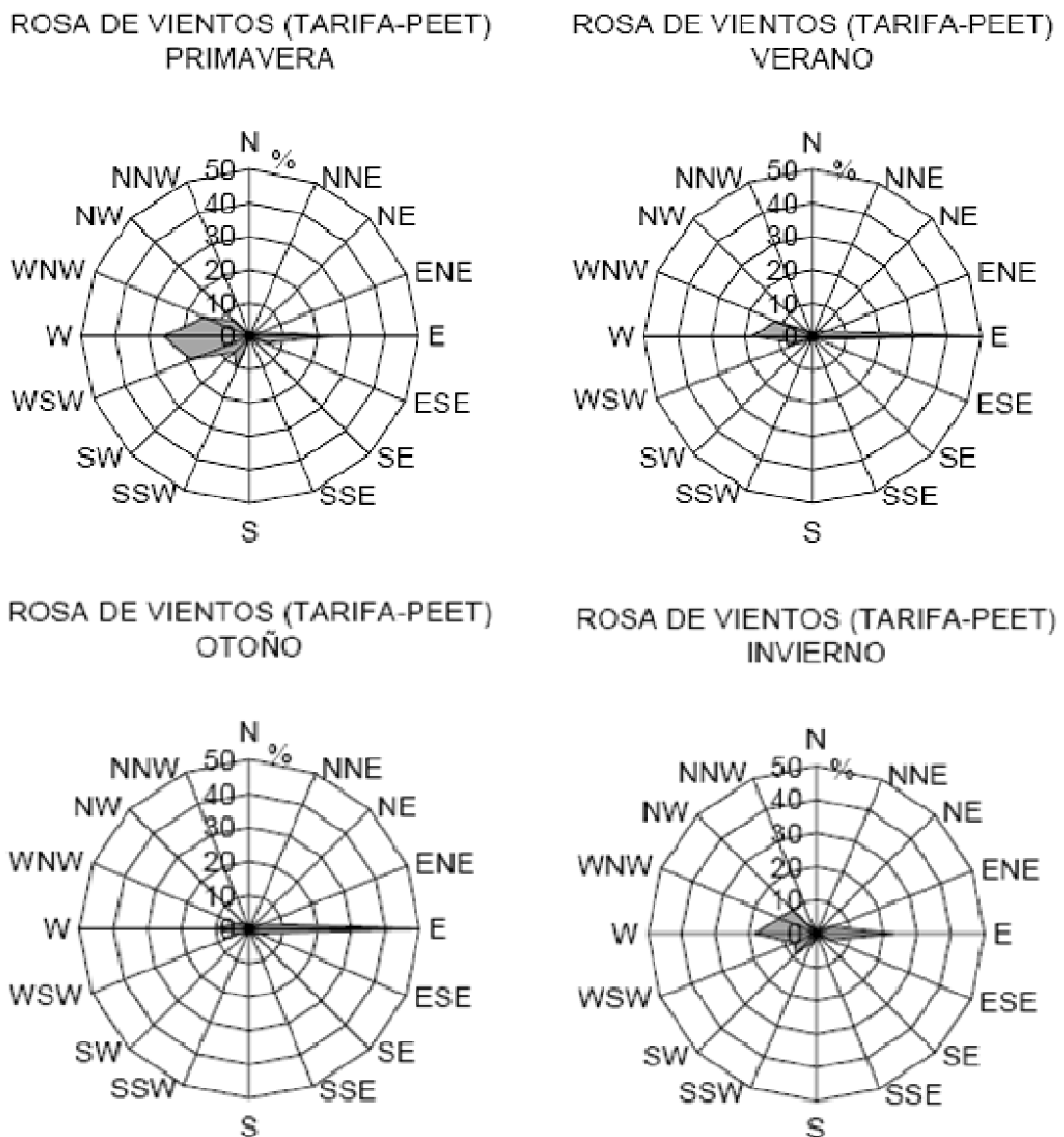


Fig. 6.1. Rosa de frecuencias de la dirección de vientos para la Estación Meteorológica de Tarifa, en primavera, invierno, otoño y verano de 1988 (Fuente: Palomares Losada, 2002)



En cuanto al viento que procede del Mediterráneo (vientos de levante), el aire que converge hacia el Estrecho sigue las líneas de corriente, tras cuyo paso sale como un chorro ("jet") de gran fuerza, acompañado de grandes remolinos que se pueden observar en los mapas isobáricos superficiales o pequeños torbellinos móviles a ambos lados del "chorro", en los cuales existe una gran variabilidad en el viento (Scorer, 1952). Esta canalización de los vientos de levante ocasiona en general velocidades mucho mayores que en el caso de los de poniente. En lo relativo a la persistencia del viento, una vez que el levante aparece, hay una probabilidad superior al 75% de que se mantenga durante un período de al menos tres días y un 50% para los siete días (Román Lozano, 2008).

Los datos registrados en la estación meteorológica de Tarifa han permitido la elaboración de una rosa de vientos para todo el periodo de estudio, que abarca de 1995 a 2009 (Fig. 6.2).

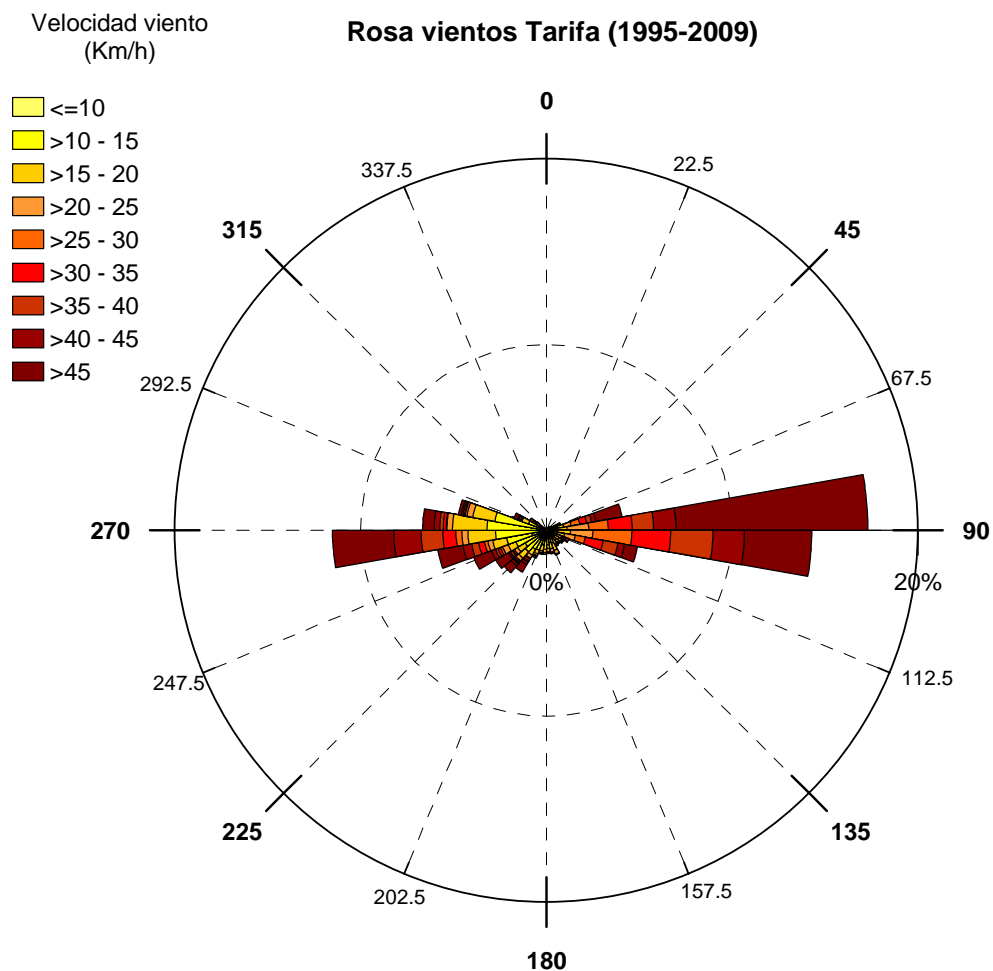


Fig. 6.2. Rosa de vientos para todo el periodo estudiado, comprendido entre 1995 y 2009

Estos resultados demuestran, efectivamente, que la zona se encuentra sujeta a un régimen de vientos bidireccional, aunque ha de tenerse en cuenta que debido a la orientación geográfica de la duna de Valdevaqueros y la orografía existente a poniente de la ensenada, ésta se encuentra afectada localmente por un régimen quasi unidireccional (por el contrario, los vientos bidireccionales suelen producir dunas en “seif”, caracterizadas por una estructura interna de láminas cruzadas, derivada del efecto acumulativo de vientos de distinta dirección). Este régimen está generado por vientos dominantes de levante que son los que producen movimiento efectivo del sedimento en la duna, tanto por su frecuencia como por su intensidad.

Aunque menos fuertes y frecuentes, también aparecen vientos de poniente, según podemos ver en la rosa de vientos (Fig. 6.2). Estos vientos de poniente suelen soplar con un abanico de direcciones algo mayor ( $225^{\circ}$ - $292,5^{\circ}$ ) que los de levante ( $78,75^{\circ}$ - $100^{\circ}$ ). Teniendo en cuenta esto, los porcentajes de vientos de poniente y de levante han sido prácticamente del 100% para todos los periodos de estudio llevados a cabo; es decir, el aporte de vientos procedentes de otras direcciones que no sean las netas de este y oeste es poco frecuente.

Para evaluar el efecto de estos vientos entre los levantamientos definidos a largo plazo, se ha analizado la frecuencia de aparición de los vientos de levante y poniente así como la media de sus velocidades durante el mes y los 6 meses previos a cada levantamiento a largo plazo (Tabla 6.1). Tras analizar los resultados, se ha comprobado que los vientos de levante han sido relativamente más frecuentes que los de poniente (48,98 vs. 44,05%) así como algo más intensos (17,51 vs. 12,60 m/s). En la Tabla 6.1, se observa que los vientos de levante más intensos (que son los que han afectado directamente al desarrollo dunar) llegan a superar velocidades medias de 75 km/h, como los que soplaron durante el mes anterior (21,89 m/s) y los 6 meses previos (20,57 m/s) a la campaña de junio de 1995.

La acción eólica es, por lo tanto, muy efectiva en el transporte eólico directo de sedimentos, produciendo una migración libre de las dunas (Maia et al. 2005). Aunque las acumulaciones dunares se han asociado a menudo con la aridez, se ha demostrado que vientos fuertes pueden provocar movimientos activos de arena incluso bajo condiciones de precipitación (Talbot, 1984). De hecho, las lluvias variaron a lo largo de todo el periodo de estudio, si bien fueron abundantes durante el mes anterior al tercer, quinto y sexto levantamiento. Estos resultados pueden haber afectado al

comportamiento de la duna de forma más directa durante un periodo de corto plazo, mientras que los resultados obtenidos durante los 6 meses previos han mostrado un régimen estacionario razonable a medio plazo.

Tabla 6.1. Valores de dirección e intensidad de viento, humedad relativa media y precipitación total para los meses anteriores a los levantamientos de largo plazo

6 MESES ANTERIORES						
Fecha	Media vientos				Humedad rel. media (%)	Precipitación total (mm)
	Dirección (°)		Velocidad (m/s)			
	Levantes (%)	Ponientes (%)	Levantes (%)	Ponientes (%)		
jun-95	50,58	45,35	20,57	13,48	72,51	122,00
may-99	43,13	53,13	17,54	13,87	70,58	179,10
nov-99	45,68	53,70	18,95	12,63	81,17	167,10
jun-00	50,51	32,32	16,04	13,43	72,75	61,40
nov-03	52,17	41,85	16,48	10,44	-	283,00
may-06	51,81	37,95	15,49	11,78	76,54	447,80

MES ANTERIOR						
Fecha	Media vientos				Humedad rel. media (%)	Precipitación total (mm)
	Dirección (°)		Velocidad (m/s)			
	Levantes (%)	Ponientes (%)	Levantes (%)	Ponientes (%)		
jun-95	61,29	38,71	21,89	14,81	77,90	1,80
may-99	39,29	57,14	18,43	12,91	73,67	18,50
nov-99	61,29	35,48	17,30	19,07	79,58	121,60
jun-00	56,67	30,00	13,61	12,69	-	31,60
nov-03	29,03	35,48	12,47	11,29	-	231,90
may-06	56,00	40,00	13,41	10,17	75,22	61,70

Por tanto, debido a la dificultad de asociar comportamientos dunares a largo plazo con fenómenos físicos a corto plazo, también se han analizado los vientos a medio, corto y muy corto plazo (Fig. 6.3), para comprobar hasta qué nivel los cambios reflejados en las autofunciones son producidos por dichas variaciones meteorológicas. Asimismo, todos estos datos obtenidos han sido procesados y analizados con el fin de obtener índices de transporte eólicos que sirvan para obtener una visión más aproximada del efecto de dichos vientos sobre el comportamiento dunar.

Tal como se deduce de todas las rosas de vientos contenidas en la Fig. 6.3, los vientos más frecuentes e intensos detectados durante los diferentes intervalos de seguimiento de la duna fueron los de levante (estando su dirección comprendida siempre entre los 70° y los 90°), con velocidades medias que superaron fácilmente los

30-35 km/h a medio plazo (Fig. 6.3a y b) y los 40-45 km/h durante temporales de levante, detectados a menor plazo (Fig. 6.3c y d).

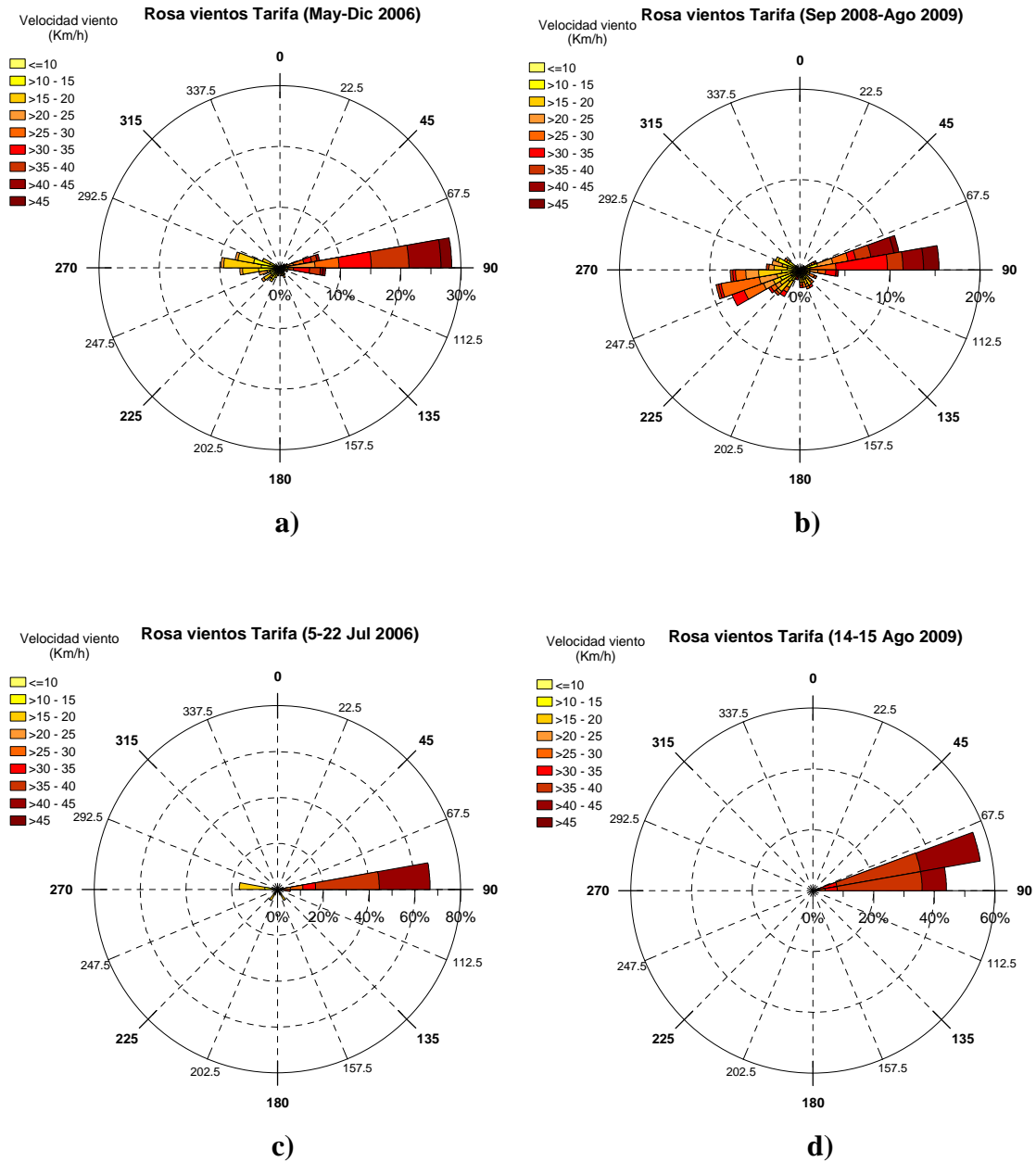


Fig. 6.3. Rosas de viento obtenidas para los periodos estudiados: a) Medio plazo mensual (May-Dic06; b) Medio plazo bimensual (Sep08-Ago09); c) Corto plazo (5-22 Jul06); d) Muy corto plazo (14-15 Ago09)

### 6.1.1. Humedad

Al tratarse de una duna costera, además del efecto del viento, el factor más persistente es sin duda la humedad relativa presente en el aire. La humedad afecta la cascada de saltación reduciendo el número de granos expulsados por la tensión del viento, así como el número de granos desalojados por el impacto de saltación de otros granos (Aagaard et al. 2004). Esto puede afectar la capacidad del movimiento de las partículas de arena en sentido negativo. Basándose en experiencias de campo y de laboratorio (mediante túneles de viento) Bagnold (1941) utilizó una ecuación empírica para determinar la velocidad umbral para sedimentos secos o no cohesionados (tal como veremos más adelante), considerando sólo el efecto del arrastre aerodinámico y de la gravedad. Más tarde, Belly (1964) utilizó una fórmula para calcular la velocidad umbral considerando una corrección por humedad:

$$u_{*tw} = u_{*t} \cdot (1,8 + 0,6 \cdot \log_{10} w)$$

Donde  $u_{*t}$  es la velocidad umbral de inicio de movimiento de los granos,  $u_{*tw}$  es la velocidad umbral bajo el efecto de la humedad contenida y  $w$  es el porcentaje de contenido de humedad.

El efecto producido por el contenido de humedad en el sedimento derivado de la humedad del aire, provoca que las fuerzas capilares entre los contactos de los granos húmedos aumenten la cohesión de la arena y de este modo, la velocidad de fricción de inicio del movimiento. Según Belly (1964), la arena seca suele contener entre el 0,2% y el 0,6% de humedad generada por la propia humedad atmosférica. Normalmente, para un coeficiente de humedad del 0,6%, la velocidad de umbral de fricción es dos veces la velocidad umbral que tendrían las arenas no cohesionadas de tamaño medio. Para coeficientes de humedad mayores al 5%, la arena se considera inamovible por la mayoría de los vientos naturales.

En este caso se han podido analizar los datos de humedad contenida en el aire desde 1995 hasta el año 1999, para la estación meteorológica de Tarifa. En la Tabla 6.4 y Fig. 6.5 puede observarse la humedad relativa analizada por años y por meses, respectivamente. Según los resultados, la humedad relativa media anual ha oscilado entre aproximadamente el 75% y el 80%, mientras que si analizamos los datos de forma mensual, vemos que a largo plazo la humedad se mantiene relativamente constante. Según los valores climatológicos normales obtenidos por la AEMET (Tabla 6.5), los

meses más húmedos suelen corresponder a Julio, Agosto, Septiembre y Octubre, con humedades relativas medias cercanas al 82%, mientras que los más secos se registran durante los meses invernales, con valores medios del 77% de humedad relativa media del aire desde 1972 a 1999.

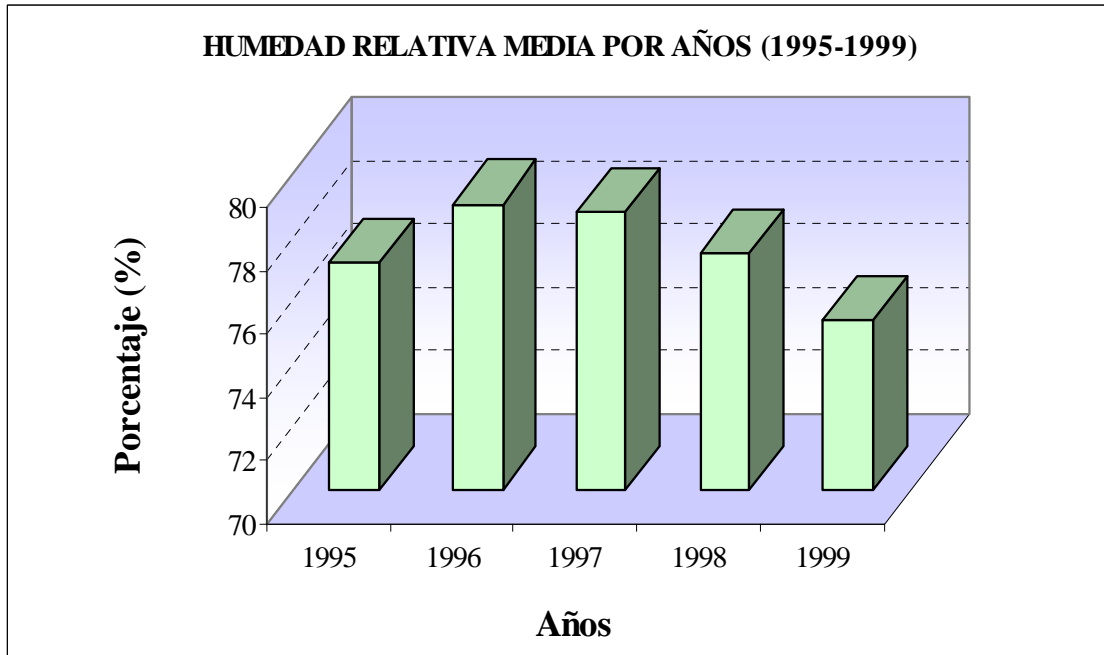


Fig. 6.4. Histograma de humedad relativa media por años desde 1995 a 1999

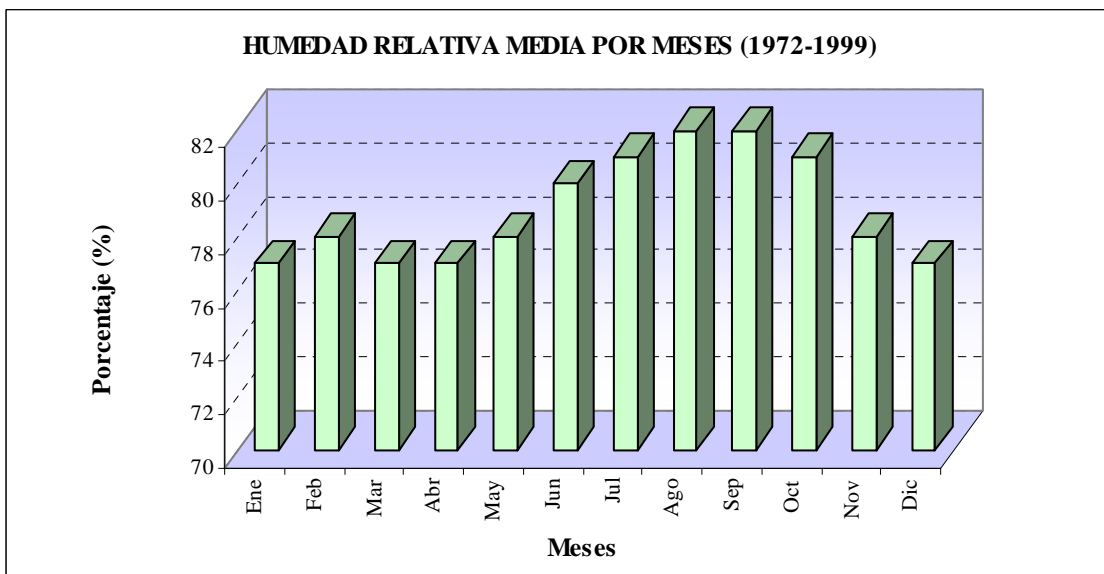


Fig. 6.5. Histograma de valores normales de humedad relativa media por meses, desde 1972 a 1999 (Fuente: AEMET; [www.aemet.es](http://www.aemet.es))

Además de estos resultados generales, se ha analizado el efecto de la humedad relativa para los 6 meses previos (el periodo mínimo común para todos los levantamientos a largo plazo) así como para el mes anterior a cada toma de datos, tal como se muestra en la Tabla 6.1.

En este caso, los valores medios de humedad relativa del aire son bastante constantes, oscilando entre el 71% y el 81% durante los seis meses previos y entre el 74% y el 80% durante el mes previo a cada campaña. A pesar del hecho de que durante los periodos más ventosos la influencia de la humedad en la migración de la arena se vuelve teóricamente más importante, no se ha detectado ninguna disminución importante de la humedad relativa durante los meses anteriores al último episodio de crecimiento (Mayo 2006), por lo que los valores de humedad del aire no se consideran muy alejados de los valores normales para esta zona. Por este motivo, no se han identificado cambios relativos en el comportamiento dunar ligados a esta variable.

### 6.1.2. Precipitación

De forma similar, la precipitación puede ser significativa, ya que también influye en la cohesión entre los granos de arena. Durante el periodo más lluvioso, las altas precipitaciones reducen las tasas de transporte eólico debido a un aumento en la humedad interna del sedimento (Sherman, 1990), mientras que durante la estación más seca, hay una disminución brusca de dicha humedad debido a la falta de lluvias junto con los efectos de la evaporación. Sin embargo, Tsoar (2005) afirmó que la singularidad de la arena dunar puede explicar porqué la lluvia o la eficiencia de precipitación no es un factor decisivo en la estabilización y movilización dunar, tal como se ha creído normalmente. La permeabilidad de la arena dunar es 2.500 veces mayor que la de un suelo compuesto por partículas más pequeñas de limo y arcilla. De este modo, la mayor parte de la lluvia en zonas húmedas se infiltra hacia aguas subterráneas y la humedad disponible se encuentra cercana a la baja capacidad del campo para retener dicha humedad.

Los datos de precipitación de los que se dispone, han sido registrados en la estación meteorológica de Tarifa entre los años 1995 y 2005. Tal como puede consultarse en la Fig. 6.6, el año más lluvioso correspondió al 2003, con cerca de 1000 mm, seguido por 1996 con una precipitación superior a 750 mm. Curiosamente, sólo durante el mes

previo a la campaña de Noviembre 2003, se registró una precipitación de más de 230 mm, tal como puede observarse en la Tabla 6.1. El año menos lluvioso se registró en 1998 con cerca de 300 mm.

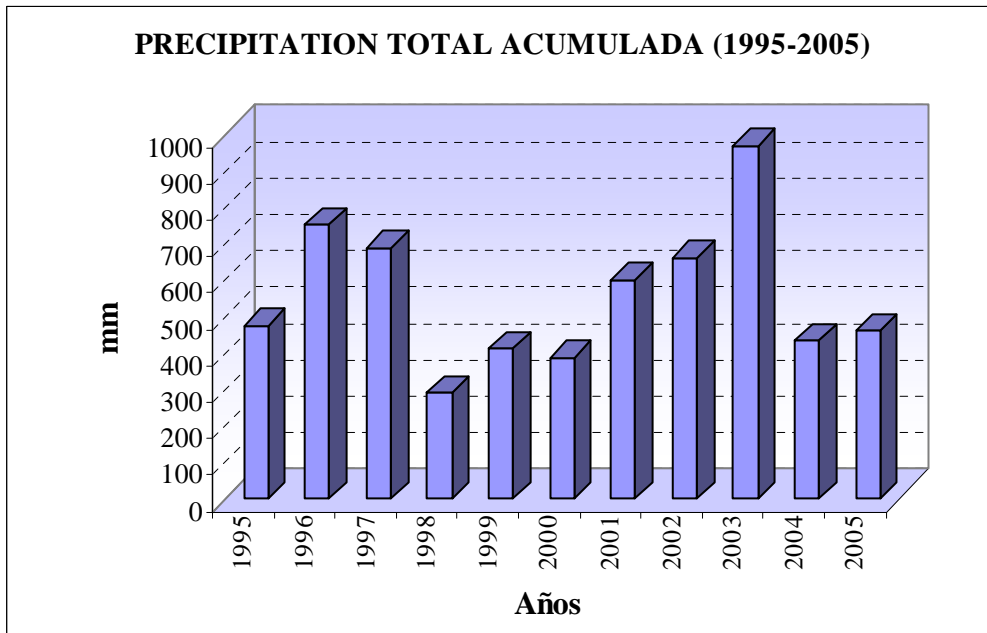


Fig. 6.6. Histograma de precipitación total para la Estación de Tarifa de 1995 a 2005

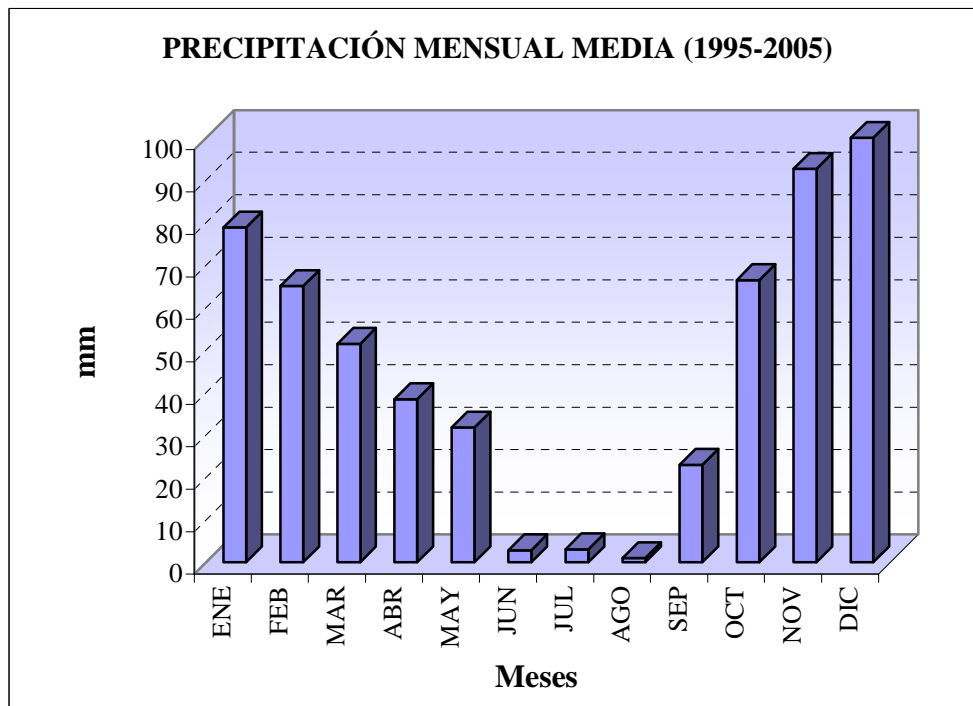


Fig. 6.7. Histograma de precipitación mensual media para la Estación de Tarifa (1995- 2005)



En cuanto a la tasa de precipitación mensual (Fig. 6.7), se comprueba que los meses menos lluviosos coinciden con la época estival (Junio, Julio y Agosto), con tasas medias inferiores a los 3 mm, mientras que los más lluviosos corresponden a Noviembre y Diciembre, con tasas cercanas a los 125 mm. De hecho, estas cantidades mensuales de lluvia se ajustan muy estrechamente a los valores medios mensuales recogidos por meses durante el periodo de 1972 a 1999. También es posible consultar en la Tabla 6.1 los valores de precipitación ocurrida durante los meses previos a la toma de datos de cada levantamiento. Se han identificado periodos de lluvias intensas durante una de las fases de mayor acreción durante el desarrollo dunar (Nov '03-May '06), con un total de 447,8 mm registrados durante los 6 meses anteriores y 61,7 mm durante el mes anterior al último levantamiento, lo que nos lleva a pensar en que el transporte de arena está estrechamente ligado a las condiciones eólicas más que a las de humedad o precipitación.

### 6.1.3. Temperatura

Por otra parte, también se han reflejado los datos de temperatura medios, máximos y mínimos, registrados por la estación meteorológica de Tarifa a largo plazo (desde 1995 a 2010), tal como puede verse en la Fig. 6.8, así como durante un ciclo anual de Septiembre 2008-Agosto 2009 (Fig. 6.9), coincidiendo con la campaña de medio plazo.

Los datos registrados a largo plazo (Fig. 6.8) muestran temperaturas medias muy similares a lo largo de 15 años (entorno a los 13°C de mínima y 23° de máxima), mientras que los valores máximos y mínimos parecen haber presentado valores algo más extremos a partir del año 2000, alcanzándose máximos y mínimos extremos muy puntuales de 35°C y -4°C, respectivamente, aunque de forma muy esporádica.

En la Fig. 6.9 se comprueba que la temperatura alcanza mínimos de 3°C de forma ocasional entre Diciembre y Enero de 2009 y los máximos, que aparecen entre Julio y Agosto, rondan los 30°C. El rango de temperatura media oscila entre los 7° en invierno y los 25°C en verano.

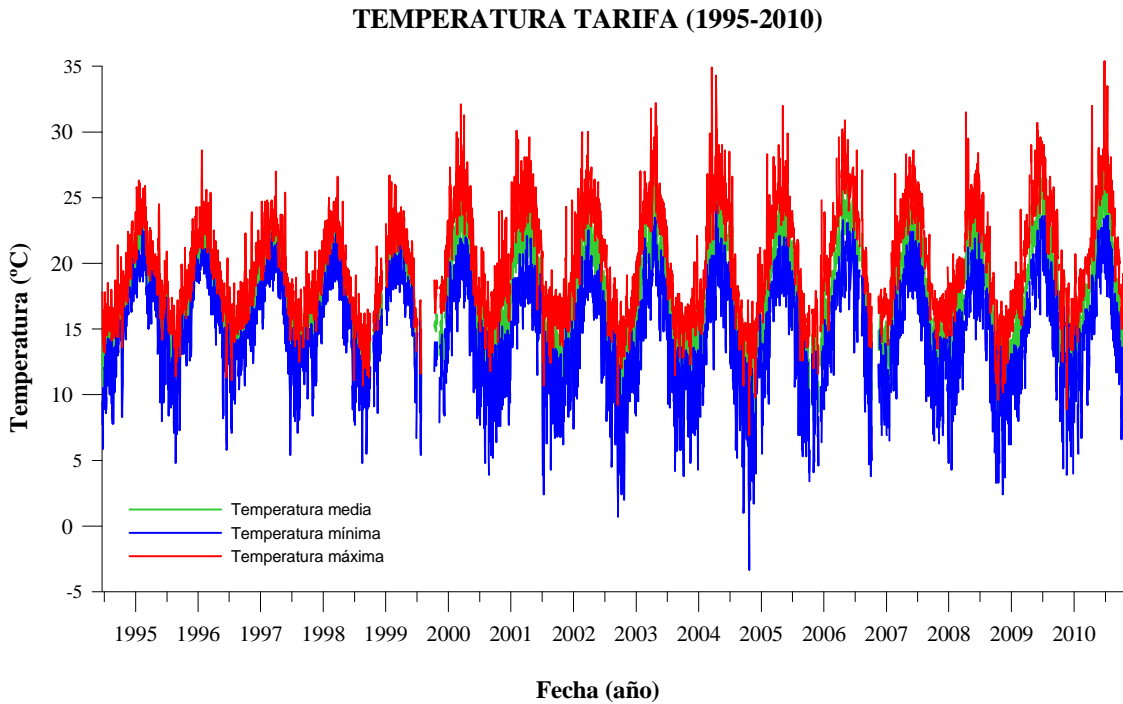


Fig. 6.8. Representación de la temperatura media, máxima y mínima para la estación meteorológica de Tarifa de 1995 a 2010. Los espacios en blanco corresponden a la falta de datos registrados.

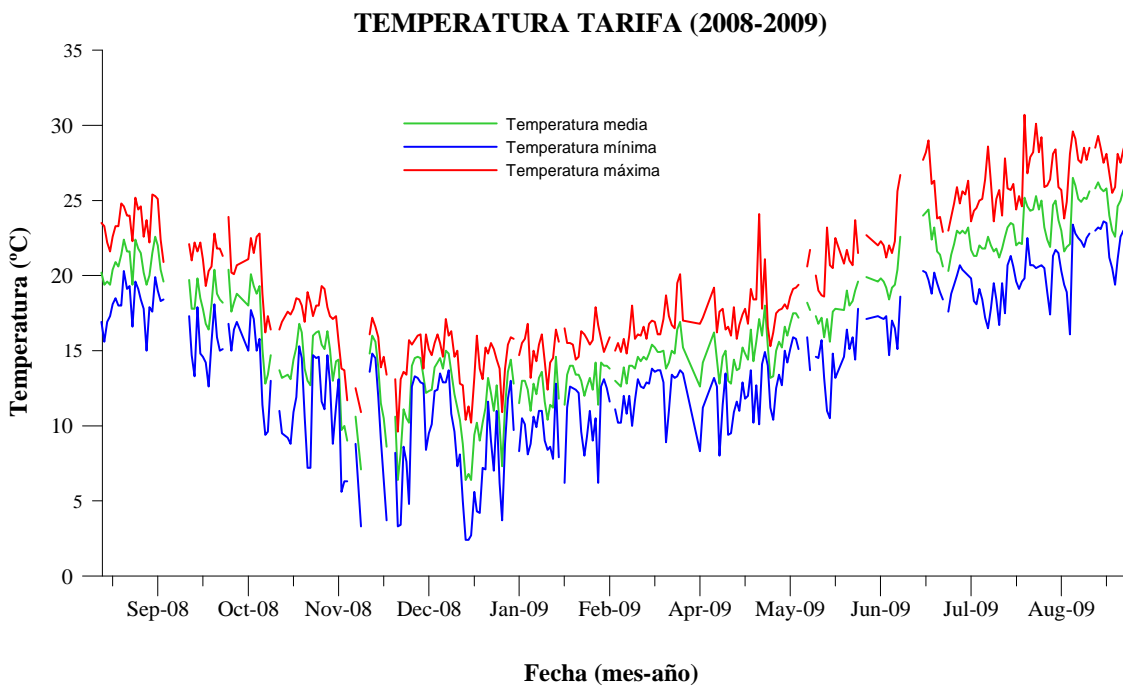


Fig. 6.9. Representación de la temperatura media, máxima y mínima para la estación meteorológica de Tarifa durante un ciclo anual (Septiembre 2008-Agosto 2009). Los espacios en blanco corresponden a la falta de datos registrados

## 6.2. Índices de actividad dunar

### 6.2.1. Transporte teórico de sedimentos

#### 6.2.1.1. Concepto de velocidad umbral y tasa de transporte de sedimentos

Si la evolución dunar se analiza en días secos o húmedos con altas temperaturas, está claro que el viento es el factor clave en el movimiento dunar. Cuando el aire sopla a través de una superficie de arena seca y libre, se necesita alcanzar una velocidad de fricción crítica umbral ( $u_{*r}$ ) para iniciar el movimiento de los granos. Sin embargo, como la mayoría de los sedimentos naturales contienen un rango de tamaños de grano, la velocidad umbral para cualquier sedimento no puede definirse por un valor finito, sino que debería reflejarse como un rango umbral en función del tamaño, forma, clasificación y compactación del sedimento superficial (Nickling, 1988). La circulación del aire es casi siempre turbulenta y consiste en remolinos de diferentes escalas que se mueven con diferentes velocidades y direcciones. Dichos remolinos turbulentos transfieren cantidad de movimiento por medio de procesos de mezcla turbulenta entre las diferentes capas del fluido, de manera que cada capa tiene diferente dirección y velocidad media. Debido a la fricción con la superficie, la velocidad en las proximidades de ésta disminuye creando un régimen laminar y anulándose justo en la superficie. Así, el perfil de velocidad del viento aumenta exponencialmente con la altura hasta traspasar la capa límite atmosférica, a partir de la cual la distribución de velocidad se vuelve asintótica (Fig. 6.10).

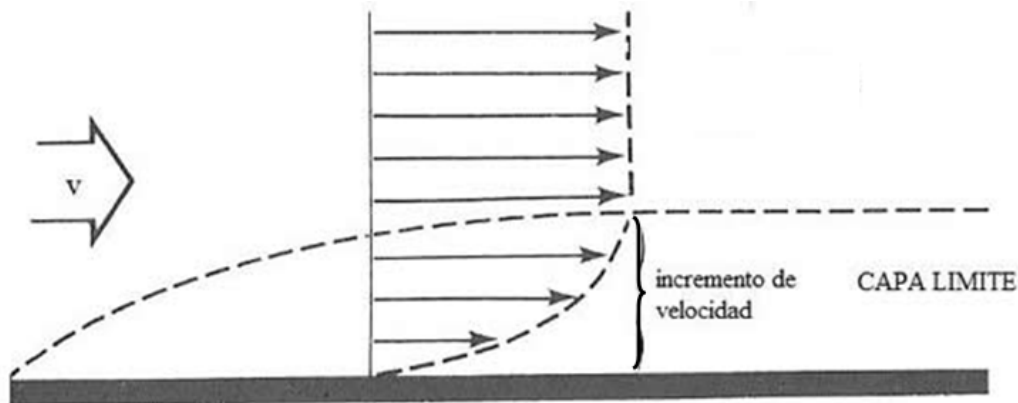


Fig. 6.10. Perfil vertical de velocidad del viento alrededor de la capa límite.

Según Van Dijk et al. (1999) la velocidad de fricción superficial ( $u^*$ ) depende de:

- a) La topografía, que puede acelerar o frenar el flujo de aire
- b) La rugosidad superficial debida a los micro-relieves y a la vegetación
- c) La velocidad de fricción que ejerce el aire hacia arriba (*upstream friction velocity*).

Cuando las partículas o las formas de la superficie tienen una rugosidad superior a 80  $\mu\text{m}$  la superficie se considera aerodinámicamente rugosa. En condiciones de estabilidad atmosférica, el perfil de velocidad por encima de la subcapa viscosa de las superficies aerodinámicamente rugosas viene dado por la ecuación logarítmica de Prandtl-von Karman, también denominada ley de la pared o muro (*law of the wall*), en la que puede obtenerse la velocidad media del viento ( $u_z$ ) a una determinada altura  $z$ :

$$\frac{u_z}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \forall z > z_0 \quad [6.1]$$

Donde  $u_*$  es la velocidad de fricción,  $k$  es la constante universal de Von Karman que define la capa límite turbulenta ( $k=0,40$ ),  $z$  es la altura por encima de la superficie y  $z_0$  es la longitud de rugosidad aerodinámica ( $z_0=d/30$ ). Esto significa que si se incrementa la velocidad del viento a una determinada altura  $z$ , la velocidad de fricción también aumenta. En la Fig. 6.11 se observa que la relación entre la velocidad del viento a 2 metros de la superficie y la velocidad de fricción es lineal, descrita a través de una doble escala logarítmica.

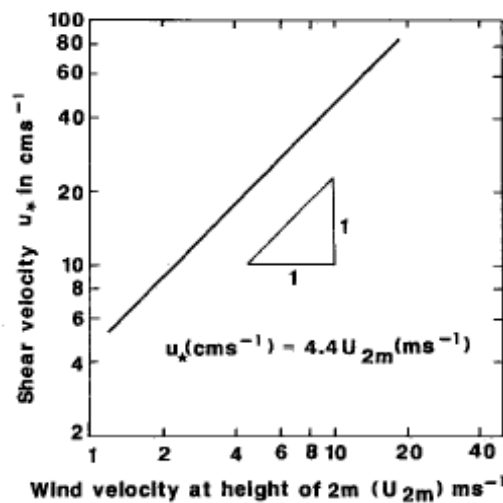


Fig. 6.11. Relación entre la velocidad de fricción y la velocidad del viento a una altura de 2 metros, basada en datos de diferentes partes del mundo (Fuente: Pye y Tsoar, 1990)

En condiciones atmosféricas neutras<sup>4</sup>, la velocidad de fricción  $u_*$  es proporcional a la pendiente del perfil vertical de velocidades en una escala logarítmica estando relacionada con la tensión de corte o fricción en la superficie y con la densidad del aire, mediante la expresión:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \quad [6.2]$$

De modo que asumiendo una estabilidad atmosférica neutral cerca de la superficie,  $u_*$  es constante a diferentes alturas.

La velocidad de fricción umbral ( $u_{*t}$ ), que es la velocidad requerida para iniciar el transporte eólico de sedimentos, se determina estableciendo el equilibrio entre el esfuerzo o tensión tangencial del viento y las fuerzas estabilizadores que actúan sobre los granos de arena. Así, la velocidad de fricción umbral depende de:

- a) Las características del sedimento, como la distribución del tamaño de arena, la forma y densidad de los granos (que a su vez depende de la naturaleza del sedimento)
- b) El ángulo de la pendiente local
- c) Las fuerzas cohesivas entre los granos, que incluyen fuerzas de Van der Waals, cargas electrostáticas y tensión superficial transmitida por películas de humedad.

Los granos empiezan a moverse y el sedimento es arrastrado por el viento cuando las fuerzas del fluido (sustentación, arrastre y cantidad de movimiento) exceden los efectos que el peso de la partícula ejerce y cualquier cohesión entre las partículas adyacentes, como resultado de la humedad, sales y costras del suelo. Las fuerzas que un flujo puramente turbulento ejerce sobre cada grano de la superficie de forma individual dependen de la naturaleza de ese flujo a pequeña escala, lo cual viene determinado por el número de Reynolds de las partículas ( $Re_*$ ). Cuando  $Re_* > 3,5$ , el grano actúa como un único obstáculo en el camino del flujo y la superficie puede ser considerada como

---

<sup>4</sup> Si la atmósfera es inestable, el gradiente vertical de velocidad varía ligeramente con la altura, por lo que se incrementa la tensión de corte en la superficie. En condiciones estables, la tensión de corte en la superficie disminuye. Las variaciones topográficas también producen efectos importantes en los perfiles de velocidad del viento, debido a la convergencia y divergencia de las líneas de corriente, de manera que la variación topográfica debida a la existencia de las dunas modifica el perfil del viento, por lo que los modelos anteriores no pueden ser aplicados en dichas situaciones al dejar de ser log-lineales los perfiles.

aerodinámicamente “rugosa” (Bagnold, 1941). Si por el contrario,  $Re_* < 3,5$ , se considera que la superficie es aerodinámicamente “lisa” y el arrastre se distribuye uniformemente sobre toda la superficie.

Por otro lado, a partir de experimentos con túneles de viento de baja presión que permitían la separación del efecto del número de Reynolds y las fuerzas cohesivas, Irvensen y White (1982) demostraron que éstas últimas jugaban un papel mucho más importante en el control de la velocidad umbral para pequeños granos de arena.

Según Bagnold (1941), la velocidad de inicio del movimiento o velocidad de fricción umbral ( $u_{*t}$ ) para sedimentos no cohesionados en una superficie horizontal puede describirse por:

$$u_{*t} = A \cdot \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} \cdot g \cdot d} \quad [6.3]$$

Donde  $d$  es el diámetro medio de las partículas (en metros),  $g$  es la aceleración debido a la gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ),  $\rho_s$  es la densidad de los granos (equivalente a  $2.650 \text{ kg/m}^3$ ),  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $1,23 \text{ kg/m}^3$ ) y  $A$  es un coeficiente igual a  $0,1$  (Bagnold, 1954; Pye y Tsoar, 1990) para tamaños de grano mayor que  $0.1 \text{ mm}$ .

Una vez que los granos son levantados, siguen una trayectoria parabólica durante la cual son acelerados horizontalmente absorbiendo cantidad de movimiento del viento hasta que vuelven a impactar sobre la superficie. En el impacto, transmiten su cantidad de movimiento a otros granos, que a su vez pueden salir despedidos al aire aunque en dichos granos no se haya alcanzado la velocidad de fricción crítica. De este modo, las partículas pueden sostenerse con una velocidad menor de viento (Pye and Tsoar, 1990) llamada velocidad umbral de impacto. Esto significa que, una vez iniciado el movimiento, el umbral de velocidad crítica de inicio del movimiento disminuye, correspondiéndole al coeficiente  $A$  (Ec. 6.3) un valor de  $0,08$  para granos mayores a  $0.25 \text{ mm}$ . Esto produce un efecto cascada, de forma que el número de granos en movimiento aumenta exponencialmente, alcanzando un equilibrio dinámico pasados  $1$  ó  $2$  segundos (Lancaster, 2005).

La cantidad de transporte eólico está relacionada con la fuerza del viento y el tamaño medio del sedimento nativo, de manera que a medida que aumenta el tamaño de grano, también lo hace la velocidad umbral, describiendo una curva parabólica, tal como puede verse en la Fig. 6.12., en la que se muestran diversas curvas de acuerdo con

varios autores. Según la distribución de Bagnold (que es la que se tendrá más en cuenta en adelante), para un diámetro de grano de 0,30 mm, la velocidad de fricción umbral es de unos  $25 \text{ cm s}^{-1}$ , o lo que es lo mismo, de  $0,25 \text{ m s}^{-1}$ .

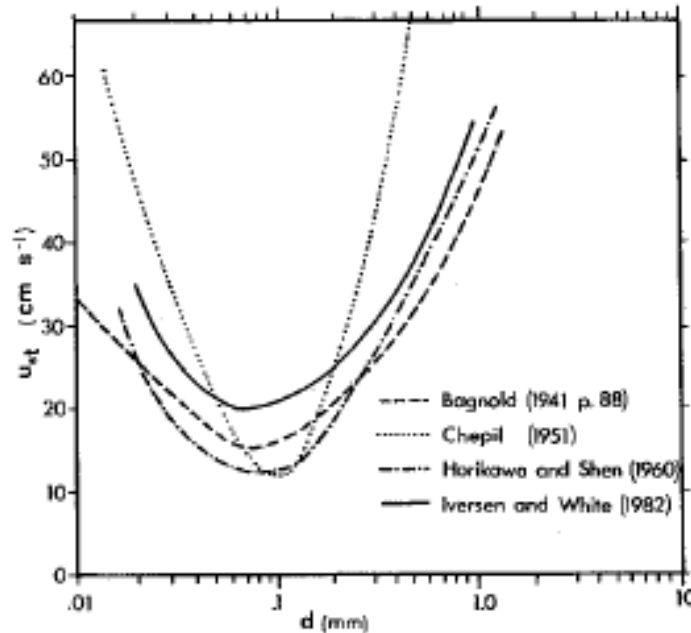


Fig. 6.12. Curvas de velocidad de fricción umbral ( $u^*_t$ ) en función del tamaño de granos de cuarzo ( $d$ ) según diferentes autores. A diferencia de la de Bagnold (1941), la fórmula de Chepil (1951) contempla un diámetro equivalente de un sólido que contiene una mezcla de diferentes fracciones de tamaño, mientras que la curva de Iversen y White (1982) tiene en cuenta las variaciones en el número de Reynolds y las fuerzas cohesivas (Fuente: Pye y Tsoar, 1990).

La tasa de transporte de arena ( $q$ ) muestra que el factor de control principal del movimiento de arena es el freno que la superficie arenosa ejerce sobre el flujo de aire (Tsoar, 1985).

Observaciones llevadas a cabo por Bagnold (1954) demostraron que la tasa de transporte depende del tamaño de grano ( $d$ ) relativa al diámetro de referencia de 0.25 mm ( $D$ ) y el cubo de la velocidad de fricción del viento ( $u_*$ ):

$$q_B = C \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3 \quad [6.4]$$

Correspondiendo la constante  $C$  a 1,5 para arenas uniformes, 1,8 para arenas naturales de dunas, 2,8 para arenas pobremente clasificadas y 3,5 para gravas. Esta variación en el coeficiente  $C$  indica que la tasa de transporte sedimentario es mayor sobre una superficie de arenas mal clasificadas o de gravas que sobre una de arenas

uniformes, debido a que la saltación ocurre más fácilmente sobre superficies duras o que contienen partículas más grandes.

Otros investigadores, basándose muchos de ellos en la formulación de Bagnold, desarrollaron nuevas ecuaciones para el cálculo de la tasa de transporte eólico. Zingg (1953) propuso una ecuación similar, sustituyendo  $C$  por  $0,83$  y elevando el término  $d/D$  de Bagnold a  $3/4$  en lugar de  $1/2$ , de modo que la fórmula resulta más adecuada para un rango de tamaño de grano más amplio:

$$q_z = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{3/4} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3 \quad [6.5]$$

Kawamura (1964) también desarrolló una ecuación de transporte teniendo en cuenta la velocidad umbral:

$$q_K = K \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot (u_* - u_{*t}) \cdot (u_* + u_{*t})^2 \quad [6.6]$$

Donde  $K$  es una constante de valor  $2,78$ . En posteriores investigaciones, Horikawa et al. (1986) demostró que dicha constante oscilaba entre  $2,3$  y  $3,1$  para arenas de playa de diámetro medio de  $0,3$  mm.

Lettau y Lettau (1978) perfeccionaron la ecuación de Kawamura, donde  $C_1$  es igual a  $4,2$ :

$$q_L = C_1 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^2 \cdot (u_* - u_{*t}) \quad [6.7]$$

En todas estas ecuaciones, la tasa de transporte eólico sedimentario se representa por la letra  $q$ , cuyas unidades vienen dadas en  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ .

#### 6.2.1.2. Cálculo del transporte teórico mediante los modelos clásicos

El cálculo de las velocidades umbral y la tasa de transporte de sedimentos teórico se ha llevado a cabo utilizando las fórmulas anteriormente descritas, para 6 zonas del perfil playa-duna situado en Valdevaqueros susceptibles de ser afectadas por dicho transporte eólico, según su situación y granulometría: Playa Media (PM), situada en la zona intermareal, Playa Alta (PA) situada en la zona emergida de la playa, Pie de Duna (PD), Barlovento de la Duna (BD), Cresta de la Duna (CD) y Sotavento de la Duna (SD),



localizado en la cara de avalancha. También se ha extraído el  $D_{50}$  para una Muestra Compuesta (MC). El análisis granulométrico se ha realizado a través de 8 tamices con diferentes luces de malla: 1,0; 0,71; 0,5; 0,35; 0,25; 0,18; 0,125 y 0,075 mm. El sedimento de la duna de Valdevaqueros está compuesto por arenas de naturaleza cuarcítica, de granulometría media ( $D_{50}$ ) de aproximadamente 0,30 mm y desviación estándar de 0,05 mm, lo que muestra que se trata de materiales bien clasificados. En el ANEXO III se muestran las hojas granulométricas extraídas de cada una de estas muestras tipo, con parámetros estadísticos como la media, desviación estándar, clasificación (*sorting*), asimetría (*skewness*), achatamiento (*kurtosis*), moda, percentiles, etc.

Aplicando las ecuaciones 6.3 y 6.1 se han extraído las velocidades de fricción umbral y las velocidades medias umbral a una altura de 1,5 metros por encima de la superficie para las diferentes muestras del perfil, según sus resultados granulométricos (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Velocidades de fricción umbral del viento ( $u_{*t}$ ) y velocidades medias umbral a 1,5 metros sobre la superficie ( $u_{t,1.5}$ ) para las diferentes zonas del perfil susceptibles de actividad eólica: Playa Media (PM), Playa Alta (PA), Pie Duna (PD), Barlovento Duna (BD), Cresta Duna (CR), Sotavento Duna (SD) y Muestra Compuesta (MC), siendo  $d$  el diámetro medio de grano.

Muestra	$d$ (mm)	$u_{*t}$ ( $m s^{-1}$ )	$u_{t,1.5}$ ( $m s^{-1}$ )	$u_{t,1.5}$ ( $km h^{-1}$ )
PM	0,36	0,28	8,22	29,60
PA	0,33	0,26	7,69	27,68
PD	0,33	0,26	7,69	27,68
BD	0,30	0,25	7,45	26,82
CD	0,28	0,24	7,19	25,88
SD	0,33	0,26	7,69	27,68
MC	0,31	0,26	7,73	27,83

Como puede observarse, la velocidad umbral de inicio de movimiento ( $u_{*t}$ ) para la muestra compuesta es de  $0,26 m s^{-1}$ , es decir, de tan sólo  $0,92 km h^{-1}$ . La velocidad media umbral para la misma muestra es de  $7,73 m s^{-1}$  o  $27,83 km h^{-1}$  para una altura de 1,5 metros sobre la superficie.

Según la rosa de vientos de todo el periodo estudiado, representada en la Fig. 6.2, los vientos de levante no muestran gran diversificación de direcciones, estando comprendidos todos ellos en el rango de direcciones de  $90^\circ \pm 22.5^\circ$ . De este modo, para cada zona de muestreo se han calculado las velocidades de fricción a partir de las velocidades medias horarias del viento de levante durante dicho periodo. Las tasas teóricas de transporte sedimentario han sido calculadas según las formulaciones de Bagnold (Ec. 6.4) y Zingg (Ec. 6.5), tal como se muestra en la Tabla 6.3. Ambas ecuaciones predicen el transporte eólico en  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ , de modo que para transformar dichas unidades a  $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$  se ha aplicado un factor de conversión teniendo en cuenta la densidad de los granos de cuarzo ( $2.650 \text{ kg m}^{-3}$ ) así como la porosidad del sedimento (un volumen de  $0,6 \text{ m}^3$  de granos por cada  $\text{m}^3$  de arena).

Tabla 6.3. Tasas de transporte de sedimento a largo plazo según las ecuaciones de Bagnold ( $q_B$ ) y de Zingg ( $q_Z$ ), para las diferentes zonas del perfil susceptibles de actividad eólica: Playa Media (PM), Playa Alta (PA), Pie Duna (PD), Barlovento Duna (BD), Cresta Duna (CR), Sotavento Duna (SD) y Muestra Compuesta (MC), siendo  $d$  el diámetro medio de grano.

Muestra	$d$ (mm)	$q_B$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	$q_B$ ( $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$ )	$q_Z$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	$q_Z$ ( $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$ )
PM	0,36	8,70E-04	17,26	4,40E-04	8,72
PA	0,33	8,20E-04	16,26	4,05E-04	8,04
PD	0,33	8,20E-04	16,26	4,05E-04	8,04
BD	0,30	7,67E-04	15,20	3,70E-04	7,34
CD	0,28	7,26E-04	14,40	3,44E-04	6,83
SD	0,33	8,20E-04	16,26	4,05E-04	8,04
MC	0,31	7,84E-04	15,54	3,81E-04	7,56

Las tasas teóricas de transporte obtenidas a largo plazo son del orden de  $10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$  para ambas formulaciones, sin embargo el transporte es claramente superior para el caso de la ecuación de Bagnold. Si tomamos como referencia la muestra compuesta, la tasa de transporte calculada a partir de las fórmulas de Bagnold y Zingg viene a ser de  $15,54 \text{ m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$  y de  $7,56 \text{ m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}$ , respectivamente.

En la Tabla 6.4 se resumen las tasas teóricas de transporte de sedimentos calculadas mediante las formulaciones de Bagnold para los distintos periodos de tiempo

pertencientes a las campañas llevadas a cabo. Para el cálculo de la velocidad crítica se ha tenido en cuenta la granulometría de la muestra compuesta ( $d=0,31$  mm).

Tabla 6.4. Tasas teóricas de transporte de sedimentos para los diferentes periodos de las campañas realizadas

<b>Campañas</b>	<b>Periodo</b>	<b>Escala</b>	<b><math>q_B</math> (<math>\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}</math>)</b>	<b><math>q_B</math> (<math>\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{año}^{-1}</math>)</b>
<b>Largo plazo</b>	Jun 95-May 06	1 década	7,84E-04	15,54
<b>Medio plazo</b>	Sep 08-Ago 09	12 meses	8,57E-04	17,00
	May 06-Dic 06	6 meses	8,02E-04	15,90
<b>Corto plazo</b>	5-22 Jul 06	15 días	6,21E-03	123,20
<b>Muy corto plazo</b>	14-15 Ago 09	24 horas	6,65E-03	131,88

Según puede observarse en la Tabla 6.4, las tasas de transporte eólico potencial determinadas para las campañas de largo y medio plazo son similares, ya que la distribución de vientos fue más heterogénea (Fig. 6.3a y Fig. 6.3b) que durante los demás periodos a menor plazo. Por el contrario, estas últimas campañas se realizaron bajo fuertes vientos de levante, produciendo un transporte potencial cercano a un orden de magnitud mayor.

Para el caso de un temporal típico de levante, como el ocurrido durante una quincena en Agosto de 2006 (véase histograma en la Fig. 6.13), la velocidad del viento registrada supera siempre dicha velocidad umbral, por lo que los granos no cohesionados son siempre susceptibles al movimiento. Durante dicho periodo, el viento fue prácticamente unidireccional, siendo la velocidad media del levante de  $31,4 \text{ km h}^{-1}$ , con valores mínimos de  $13,2 \text{ km h}^{-1}$  y máximos de  $44,6 \text{ km h}^{-1}$ . Los cálculos muestran que la tasa de transporte teórica para el sistema playa-duna de Valdevaqueros durante ese periodo quincenal fue de  $123,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , es decir, de  $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ .

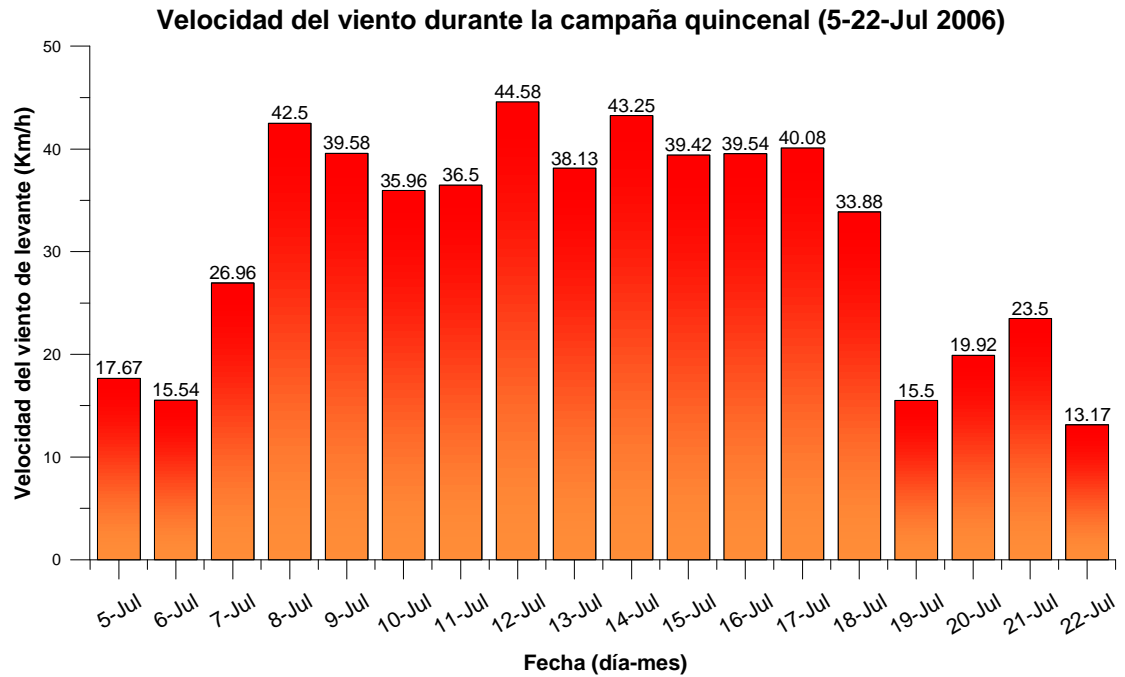


Fig. 6.13. Histograma de velocidades de viento medias registradas durante los días de la campaña de corto plazo (5-22 Julio 2006).

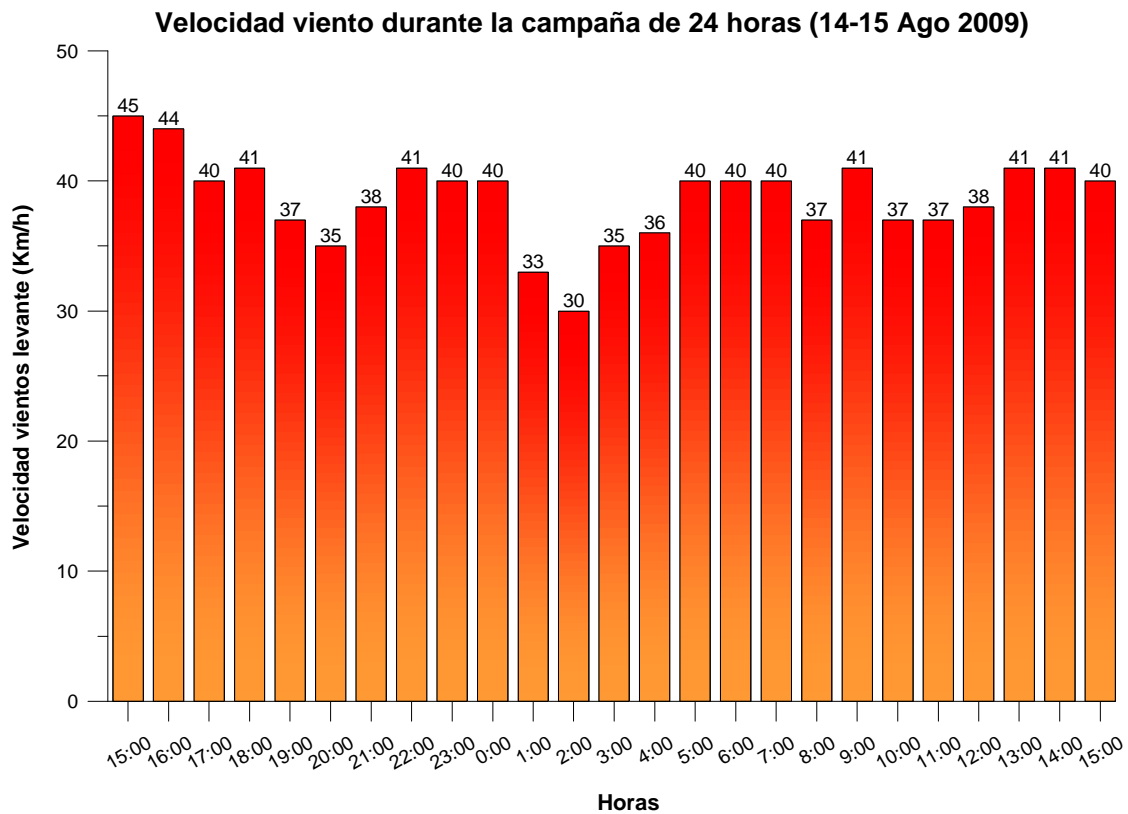


Fig. 6.14. Histograma de velocidades de viento medias horarias registradas durante la campaña de muy corto plazo (14-15 Agosto 2009).

En cuanto al análisis del transporte potencial de arena durante la campaña de muy corto plazo, el viento registrado fue siempre de componente Este durante las 24 horas que duró la campaña. Los datos horarios reflejan que el viento sopló con una media de  $38,7 \text{ km h}^{-1}$ , con un mínimo de  $30 \text{ km h}^{-1}$  y un máximo de  $45 \text{ km h}^{-1}$ , tal como puede observarse en la Fig. 6.14.

### 6.2.1.3. Transporte eólico potencial: El método de Fryberger

A la hora de estudiar la actividad de transporte eólico en sistemas dunares, se han aplicado diversos índices sobre erosión eólica y movilidad de arena a nivel mundial, como los desarrollados por Chepil et al. (1963), Ash y Wasson (1983), etc. Todos ellos están basados en dos factores: el grado de intensidad eólica (relacionado con el porcentaje anual de días que experimentan vientos por encima de la velocidad umbral de movimiento) y la eficiencia de lluvia (la relación entre la precipitación media y la evaporación potencial anuales). Sin embargo, debido a la singularidad de las partículas de arena, las dunas costeras tienen una elevada tasa de infiltración del agua. Como resultado, las partículas de arena apenas experimentan cohesión, lo que explica porqué la lluvia o la eficiencia de lluvia no representan un factor decisivo en la estabilización y movilización dunar. Por ello, el viento es el factor limitante para la vegetación de las dunas cuando no existe presión humana sobre ellas. Además, a pesar de que estos índices consideran el grado de intensidad eólica, no hacen referencia ni a la magnitud del viento ni a su direccionalidad (Tsoar, 2005).

Estas anteriores características sí se reflejan en cambio en el potencial de deriva o transporte del sedimento o *Drift Potential (DP)*, parámetro que define la cantidad máxima potencial de arena que puede ser erosionada o movilizada por el viento durante un año para todas las direcciones del viento. De este modo, el *DP* es una medida de la fuerza potencial del viento en una zona arenosa (Tsoar, 2005). En esos términos, siguiendo el método utilizado por Fryberger (1979), el índice de potencial de deriva (*DP*) del sedimento puede calcularse para una dirección de viento determinada, según:

$$DP = q = \frac{u^2(u - u_t)}{100} \cdot t \quad [6.8]$$

Donde  $u$  es la velocidad media del viento (en nudos) medida a una altura de 10 metros,  $u_t$  es la velocidad umbral del viento por defecto a esa altura, que equivale a 12 nudos (22,24 km/h) y  $t$  es el porcentaje de tiempo en el que la velocidad del viento ha superado la velocidad umbral para esa determinada dirección. El hecho de que se divida el término por 100 se deriva de la necesidad de reducir el resultado a un número más pequeño. De este modo, se calcula la tasa de transporte de sedimentos ( $q$ ) para cada dirección que experimenta una velocidad del viento superior a la velocidad umbral ( $u_t$ ), y ese valor se muestra como una unidad vectorial. Todas estas unidades vectoriales forman una rosa de transporte potencial de arena.

Según Tsoar (2005), el potencial de deriva resultante o magnitud del transporte resultante ( $RDP$ ) que describe la magnitud del transporte potencial neto de arena (expresado en unidades vector), puede obtenerse tras el cálculo del potencial de deriva ( $DP$ ) para todas las direcciones de viento disponibles. De este modo, la relación  $RDP/DP$  representa un índice de la variabilidad del viento (es decir, relaciona el transporte potencial que posee un viento de dirección determinada con el transporte potencial resultante de todos los vientos registrados). Si el viento proviene equitativamente de todas las direcciones, es decir,  $RDP=0$ , entonces esta relación  $RDP/DP$  sería igual a cero. Por el contrario, si el viento proviene sólo de una dirección, siendo  $RDP=DP$ , entonces  $RDP/DP=1$  (significaría que un viento en concreto tiene el 100% de peso en el cálculo del potencial de transporte resultante) y la dirección de transporte resultante ( $RDD$ ), que indica el sentido del vector de transporte resultante de la suma vectorial de los distintos componentes, (expresado en grados con respecto al norte), coincidiría con la dirección del potencial de deriva resultante ( $RDP$ ). Además, es posible calcular el porcentaje de tiempo ( $t$ ) en el que el viento sopla por encima de la velocidad umbral.

De esta forma, dichos resultados teóricos permiten establecer un criterio objetivo para evaluar la fuerza del viento en la zona de estudio, comparándola con otros ambientes dunares, como haremos más adelante. De hecho, Tsoar (2005) mediante la curva de histéresis (Fig. 6.15) relacionó dicha intensidad de transporte con la cobertura vegetal que puede llegar a desarrollarse en diferentes sistemas dunares de Europa e Israel. En ella se muestra que las dunas pueden desarrollar vegetación cuando la fuerza eólica es suficientemente baja y que una vez establecida la vegetación, se requiere una

tensión eólica mucho mayor para destruir la vegetación y reactivar las dunas. Si el cambio climático se manifiesta en forma de una disminución en la fuerza del viento, la vegetación empieza a cubrir las dunas en mayor cantidad siempre que la fuerza del viento disminuya por debajo de 1.000 DP. Cuando el DP es inferior a 200, este proceso culmina, alcanzando el máximo de cobertura vegetal que la duna de arena puede soportar. Sin embargo, cuando este proceso es inverso, un aumento en la fuerza del viento por encima de 1.000 DP no causará la extinción total de la vegetación sobre dunas con vegetación. Los micrófitos, plantas anuales, arbustos o árboles formarán una barrera efectiva entre el viento y la arena.

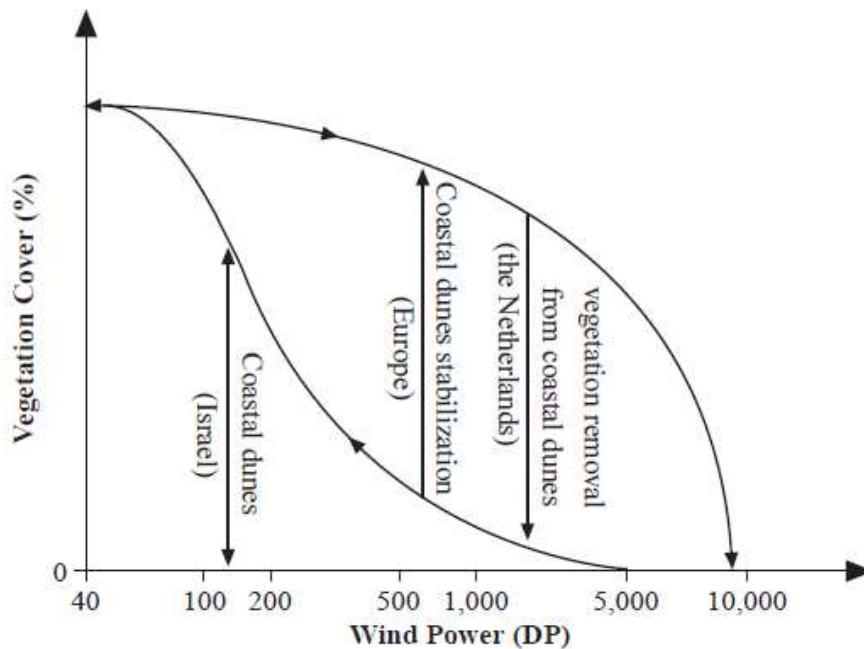


Fig. 6.15. La curva de histéresis relaciona los cambios en la fuerza del viento y la cobertura vegetal. De forma natural, la cobertura vegetal disminuye cuanto mayor es la fuerza del viento. Con fuerzas de viento intermedias, las dunas pueden tener distintos porcentajes de cobertura vegetal en función de la gestión que se establezca en el ecosistema: la estabilización mediante plantación hará aumentar la cobertura vegetal y su eliminación implicará lo contrario, favoreciendo la activación dunar. (Fuente: Tsoar, 2005)

En el ANEXO IV se proporcionan todos los pasos a seguir para el cálculo de dichos índices, siguiendo la metodología de Fryberger (1979).

Siguiendo esta metodología, se ha realizado un estudio paralelo para evaluar la actividad potencial de la duna de Valdevaqueros. Se ha calculado el potencial de deriva (*DP*) mediante datos horarios de viento procedentes de la estación meteorológica de Tarifa desde 2001 a 2008 (Tabla 6.5).

Tabla 6.5. Índices de transporte potencial del viento. *DP*: Potencial de deriva del sedimento; *RDP*: Potencial de deriva resultante; *RDD*: Dirección de deriva resultante; *t*: Porcentaje de tiempo en el que el viento sopla por encima de la velocidad umbral ( $uv$ =unidades vector).

Fuente: Navarro et al. (2011)

<b>Año</b>	<b>DP (uv)</b>	<b>RDP (uv)</b>	<b>RDP/DP</b>	<b>RDD (°)</b>	<b>t (%)</b>
2001	10.487	9.168	0,87	101	61,3
2002	14.609	7.786	0,74	102	69,6
2003	12.639	11.603	0,79	101	70,3
2004	12.639	10.475	0,83	101	71,3
2005	17.272	15.034	0,87	93	76,4
2006	14.244	11.311	0,79	89	74,7
2007	13.878	10.401	0,75	79	73,8
2008	15.524	11.079	0,71	101	73,4
Media	13.912	10.857	0,79	96	71,4

Estos resultados muestran que el potencial de deriva es mayor a 10.000 unidades vector para todos los años estudiados. El potencial de deriva resultante (*RDP*) para todas las direcciones de viento disponibles es del mismo orden de magnitud. La relación *RDP/DP* es alrededor de 0,80, lo que significa que el viento es prácticamente unidireccional, mostrando direcciones de E-W, tal como determina la dirección de deriva resultante.

Siendo consecuente con la idea de Bagnold (1941) de que la tasa de transporte de sedimentos es proporcional al cubo de la velocidad de fricción del viento, se han calculado las diferentes ponderaciones para cada dirección de viento con el fin de obtener una rosa de transporte potencial de arena. La representación de este tipo de rosas resulta el mejor método para describir cómo de potencialmente activa es una duna de arena.



Para tener una idea más general de la potencialidad del transporte en la duna de Valdevaqueros a largo plazo, se han analizado una serie continua de datos horarios de un intervalo de 30 años, desde 1963 hasta 1992, tal como se muestra en la Fig. 6.16. Los resultados muestran que se trata de una zona de especial actividad eólica con un elevado potencial de deriva sedimentaria cercano a 10.000 unidades vector. La dirección de la deriva resultante es de  $92,23^\circ$ , lo que confirma que el viento dominante sigue una dirección Este-Oeste y que el porcentaje de los vientos de levante que superan la velocidad de fricción umbral es de casi el 75%.

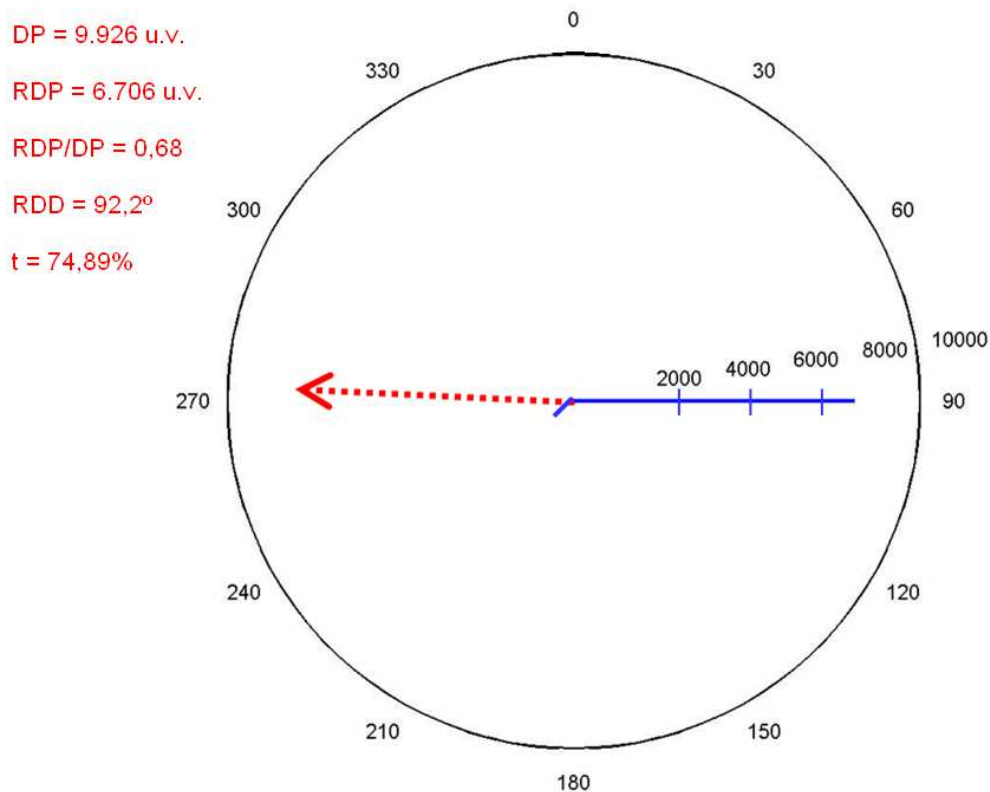


Fig. 6.16. Rosa de transporte eólico potencial para la duna de Valdevaqueros (1963-1992) en unidades vector. La flecha roja muestra la tendencia neta del vector de potencial de deriva (RDP) en la dirección de deriva resultante (RDD), que es prácticamente de este a oeste. (Fuente: Navarro et al. 2011)

Según el modelo de Yizhaq et al. (2007) una fuerza de viento con un  $DP > 2.828$  puede causar la destrucción natural de la vegetación en las dunas costeras produciendo una activación dunar, mientras que con un  $DP < 139$  las dunas siempre están cubiertas por vegetación en zonas con precipitaciones anuales medias por encima de los 100 mm.

Dentro de este último grupo, a nivel mundial podríamos destacar las zonas desérticas de Madagascar, la zona subsahariana, la Patagonia argentina y en España, la zona desértica de Almería.

Aplicando esta teoría a diferentes ambientes dunares costeros, se determinó que el clima subhúmedo de Ashdod (Israel) tenía un potencial de deriva muy bajo, con 147 unidades vector, tal como se encontró en el periodo comprendido entre 1963 y 1992 razón por la cual las dunas se volvían estabilizadas tras eliminar el impacto antrópico (Tsoar y Blumberg, 2002). Por el contrario, en Ijmuiden (Holanda) se calcularon elevados índices de fuerza del viento, con un potencial de deriva de 3.168 unidades vector, lo que contribuye a una activación de la zona tras la eliminación de la vegetación. Por otro lado, los campos dunares transgresivos del sureste de Brasil se están transformando progresivamente en formas parabólicas debido a un importante descenso del potencial de deriva y un aumento en la precipitación a lo largo de un periodo superior a 55 años (Martinho et al., 2010). Estos ejemplos y algunos más, pueden encontrarse en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6. Índices de fuerza eólica para distintos ambientes dunares. DP: Potencial de deriva del sedimento; RDP: Potencial de deriva resultante; RDD: Dirección de deriva resultante; T: Porcentaje de tiempo en el que el viento sopla por encima de la velocidad umbral ( $uv$ =unidades vector). (Fuente: Navarro et al. 2011)

Zona	País	Periodo	DP (uv)	RDP (uv)	RDP/DP	RDD (°)	t (%)
Tarifa	España	1973-1992	9.926	6.706	0,68	92	74,9
Ashdod	Israel	1963-1992	147	104	0,71	271	16,2
Ijmuiden	Holanda	1974-1992	3.168	1.732	0,55	243	69,6
Slowinski	Polonia	1973-1991	1.022	734	0,72	253	41,1
Alexandria	Sudáfrica	1973-1990	1.298	673	0,52	232	44,1
Acarau	Brasil	2003	2.109	1.550	0,99	88	60,71
Veracruz	México	1973-1993	1.406	1.026	0,73	8	23,35
Florence	(Oregón) EEUU	1949-1990	1.187	502	0,42	225	51,46

En la Fig. 6.17 se muestran varias imágenes de las dunas contempladas en la Tabla 6.6.



Fig. 6.17. Imágenes de varios sistemas dunares costeros del mundo (véase Tabla 6.6):  
a) Ashdod (Israel); b) Ijmuiden (Holanda); c) Parque Nacional de Slowinski (Polonia);  
d) Alexandria (Sudáfrica); e y f) Ceará, Acarau (Brasil); g) Chachalacas, Veracruz (México);  
h) Florence, Oregón (EEUU).

A modo de comparación con otros ambientes dunares desérticos continentales, en Kuwait se determinó un potencial de transporte intermedio próximo a las 354 unidades vector (Al-Awadhi et al. 2005). En el campo dunar de Los Algodonales, cerca de la frontera de Estados Unidos con México se calcularon potenciales de deriva resultantes de 50 a 150 u.v. por año (Kasper-Zubillaga y Faustinos-Morales, 2007).

De este modo, tras comparar el potencial de transporte eólico del viento que azota a la duna de Valdevaqueros, puede afirmarse que la zona de Tarifa es uno de los puntos más ventosos de Europa por su persistencia e intensidad.

## 6.2.2. Transporte real de sedimentos

### 6.2.2.1. Cálculo del transporte real a partir de cambios volumétricos del perfil

Tras los sucesivos levantamientos topográficos de la duna a diferentes plazos, se han determinado las diferencias volumétricas por metro lineal entre la primera y la última medición de cada campaña. Teniendo en cuenta cada periodo de tiempo transcurrido entre dichas diferencias, se han obtenido las tasas reales de transporte eólico sedimentario, comparándose con las tasas teóricas o potenciales que corresponderían a cada periodo de tiempo, según se muestra en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Comparación entre las tasas de transporte sedimentario real y teórico para las diferentes campañas estudiadas. \*Los valores superiores e inferiores de medio plazo corresponden al seguimiento bimensual (Sep08-Ago09) y al seguimiento mensual (May06-Dic06), respectivamente.

Plazo	q real	q teórica	q real ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{año}^{-1}$ )	q teórica ( $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{año}^{-1}$ )	qr/qt
<b>Largo</b>	140 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{año}^{-1}$	15,54 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{año}^{-1}$	140	15,54	9,00
<b>Medio*</b>	25,5 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{mes}^{-1}$	1,42 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{mes}^{-1}$	306	17,00	17,96
	36,5 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{mes}^{-1}$	1,32 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{mes}^{-1}$	438	15,90	27,65
<b>Corto</b>	14,38 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{día}^{-1}$	0,338 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{día}^{-1}$	5.249	123,20	42,61
<b>Muy corto</b>	22,25 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{día}^{-1}$	0,361 $\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{día}^{-1}$	8.121	131,88	61,57

Tal como se observa en la Tabla 6.7, la tasa real de transporte de sedimentos es, en muchos casos, de más de un orden de magnitud mayor a la tasa potencial o teórica, calculada a partir de los datos horarios de viento registrados en la estación meteorológica de Tarifa. Los resultados potenciales y reales obtenidos durante las campañas de corto plazo (quincenal) y muy corto plazo (diaria) son muy superiores al resto debido a que los periodos más cortos de seguimiento se realizaron bajo fuertes temporales de levante, que intensificaron dicho transporte. Además, llama especialmente la atención las diferencias detectadas entre la tasa teórica y la tasa de transporte real extraída a partir del análisis de los cambios volumétricos del perfil durante dichas campañas. Estas diferencias son probablemente debidas a que la acción del viento en la duna (local) es significativamente superior al registrado en Tarifa, lo que nos hace reflexionar acerca de la enorme capacidad de transporte eólico real que posee la duna de Valdevaqueros.

A partir de todos los anteriores datos, se ha extraído la relación entre cada tasa real y teórica ( $q_r/q_t$ ), comprobándose que dicho parámetro comparativo aumenta de 9 a 62, a medida que se acorta el periodo de estudio. En la Fig. 6.18 se representa la relación entre los intervalos de medición o periodos de estudio llevados a cabo en la duna y el parámetro  $q_r/q_t$ . Una vez representada la gráfica junto con varias curvas de ajuste (Fig. 6.18a), se comprueba que parece tratarse de una distribución logarítmica decreciente. Para identificarla mejor, la dibujamos en escala semi-logarítmica en el eje de abcisas y lineal en ordenadas, de modo que obtenemos una recta (Fig. 6.18b), por lo que vemos que el ajuste es muy preciso, con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0,98.

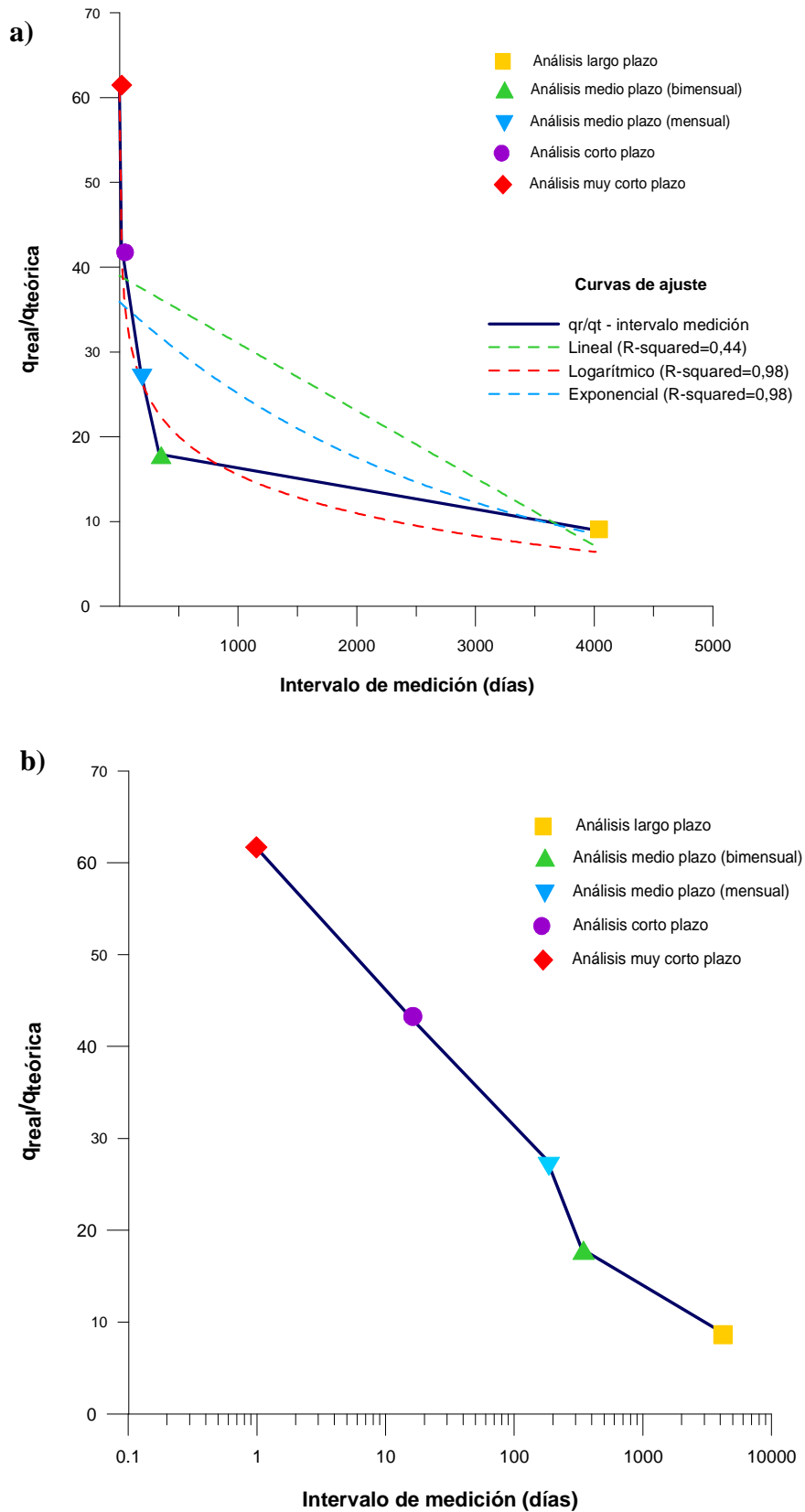


Fig. 6.18. Relación entre la tasa de transporte sedimentario teórica y la real para cada periodo de estudio de la duna: a) Distribución con escala lineal en el eje X; b) Distribución con escala semi-logarítmica en el eje X.

### 6.2.2.2. Medición in situ del transporte real mediante trampa de arena

Una vez determinadas las diferencias existentes entre los valores del transporte potencial en función de la granulometría y de datos registrados de viento, así como el transporte real a partir de datos topográficos, se procedió a analizar el transporte real in situ a partir de la instalación de una trampa de arena en el perfil dunar.

En la Tabla 6.8 se desglosan los pesos de sedimento retenidos por la trampa de arena en 3 diferentes zonas del perfil (pie de duna, cara de barlovento y cresta) a 5 diferentes alturas o niveles (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm y 40-50 cm) y tras 30 minutos de exposición. Asimismo, se ha analizado la granulometría de la arena de cada nivel, tal como se muestra más adelante. Las velocidades medias y máximas del viento se registraron mediante un anemómetro a una altura de 1,5 m sobre de la superficie en las zonas donde se instaló la trampa de arena.

Tras el primer análisis comparativo, se ha comprobado que el volumen de sedimentos retenido en la cresta dunar es prácticamente el doble que el observado en la cara de barlovento y más de 6 veces mayor al retenido en el pie de duna. Además, el diámetro medio de la arena ( $D_{50}$ ) retenida en cada nivel muestra tamaños medios de grano relativamente mayores en el pie de duna que en la cara de barlovento o en la cresta dunar.

Los volúmenes mayores de sedimento han sido transportados en la cresta, seguido por la cara de barlovento y por último el pie de duna, es decir, que a medida que se va ascendiendo por el perfil dunar, el transporte eólico de sedimentos, al igual que la velocidad media y máxima, se hace cada vez mayor. Asimismo, se ha calculado la tasa de transporte sedimentario ( $q$ ) a raíz de la arena retenida en cada nivel en función de la zona de la duna. Los datos muestran que en los primeros 50 cm por encima de la superficie dunar la tasa de transporte ha rondado los  $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$  para la zona del pie de duna,  $0,67 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$  para la cara de barlovento y casi  $1,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$  para la cresta dunar.

Estos resultados, aunque parecidos al transporte potencial (Tabla 6.7) calculado para el mismo periodo de tiempo ( $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) contrastan fuertemente con el transporte extraído a partir del análisis de los cambios volumétricos ( $22,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) del perfil a muy corto plazo.

Tabla 6.8. Cantidades de arena retenidas en peso y transporte sedimentario obtenido para cada nivel de la trampa de arena en el Pie, Barlovento y Cresta de duna durante 30 minutos de exposición.  $D_{50}$ =diámetro medio de grano;  $u_{max}$ =velocidad máxima registrada con anemómetro;  $u$ =velocidad media registrada con anemómetro

PIE DUNA							
Altura	Peso (g)	Peso (%)	D <sub>50</sub>	q (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	q (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	$u_{max}$ (km h <sup>-1</sup> )	u (km h <sup>-1</sup> )
40-50 cm	82,89	6,35	0,29	2,30E-04	0,013		
30-40 cm	152,37	11,67	0,30	4,23E-04	0,023		
20-30 cm	196,26	15,04	0,30	5,45E-04	0,030	31,1	26,1
10-20 cm	273,12	20,92	0,31	7,59E-04	0,041		
0-10 cm	600,60	46,01	0,33	1,67E-03	0,091		
<b>TOTAL</b>	<b>1.305,24</b>	<b>100</b>		<b>3,63E-03</b>	<b>0,197</b>		

CARA BARLOVENTO							
Altura	Peso (g)	Peso (%)	D <sub>50</sub>	q (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	q (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	$u_{max}$ (km h <sup>-1</sup> )	u (km h <sup>-1</sup> )
40-50 cm	214,05	4,83	0,28	5,95E-04	0,032		
30-40 cm	291,69	6,58	0,28	8,10E-04	0,044		
20-30 cm	505,83	11,42	0,29	1,41E-03	0,076	40,7	25,6
10-20 cm	1.047,93	23,66	0,30	2,91E-03	0,158		
0-10 cm	2.370,42	53,51	0,31	6,58E-03	0,358		
<b>TOTAL</b>	<b>4.429,92</b>	<b>100</b>		<b>1,23E-02</b>	<b>0,669</b>		

CRESTA DUNA							
Altura	Peso (g)	Peso (%)	D <sub>50</sub>	q (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	q (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	$u_{max}$ (km h <sup>-1</sup> )	u (km h <sup>-1</sup> )
40-50 cm	580,67	7,34	0,28	1,61E-03	0,088		
30-40 cm	861,35	10,88	0,28	2,39E-03	0,130		
20-30 cm	1.555,98	19,66	0,28	4,32E-03	0,235	61,1	45,3
10-20 cm	1.881,83	23,77	0,28	5,23E-03	0,284		
0-10 cm	3.035,92	38,35	0,29	8,43E-03	0,458		
<b>TOTAL</b>	<b>7.915,75</b>	<b>100</b>		<b>2,20E-02</b>	<b>1,195</b>		

A continuación se han representado con diversos histogramas los pesos de sedimento retenidos por la trampa de arena en 3 zonas distintas del perfil (pie de duna, cara de barlovento y cresta) en función de la altura, así como su clasificación granulométrica.



**Trampa de arena en Pie duna (30 min)**

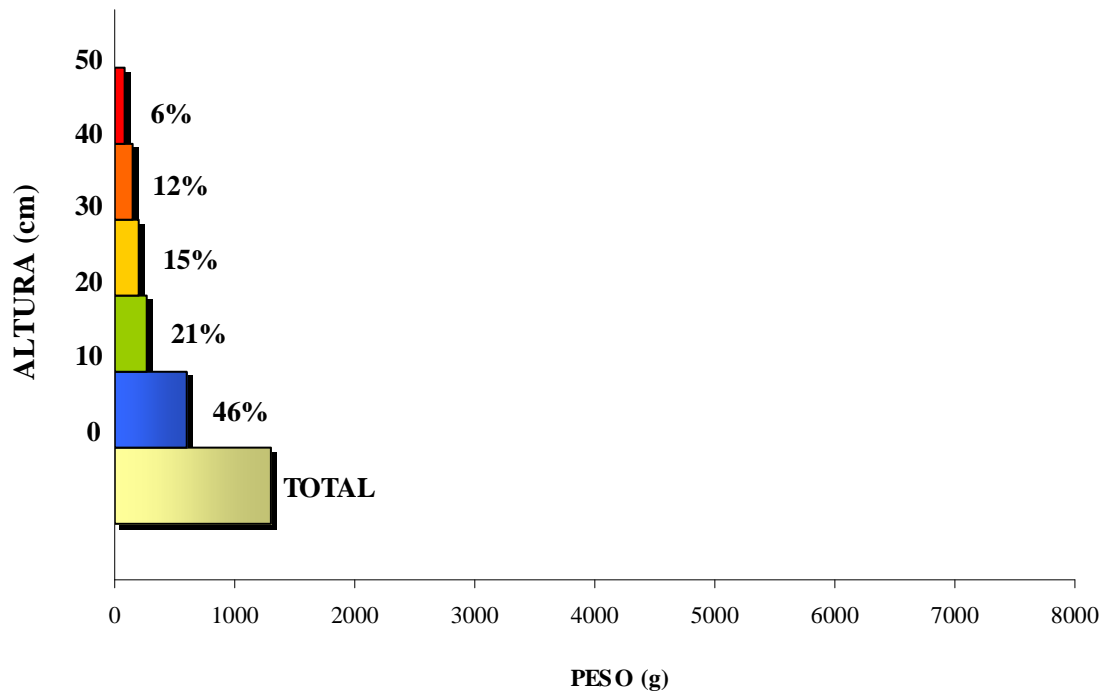


Fig. 6.19. Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en el pie de duna durante 30 minutos.

**Tamaño medio retenido en Pie duna**

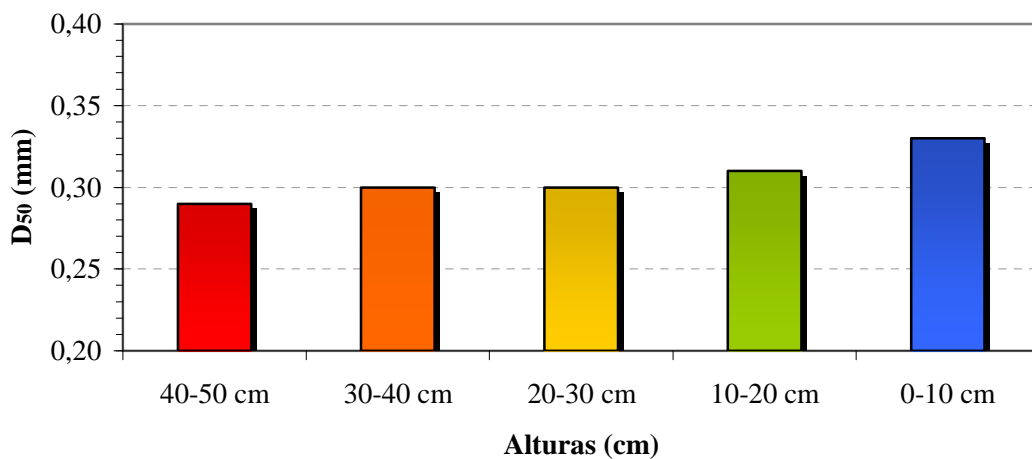


Fig. 6.20. Tamaño medio (D50) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en el pie de duna.

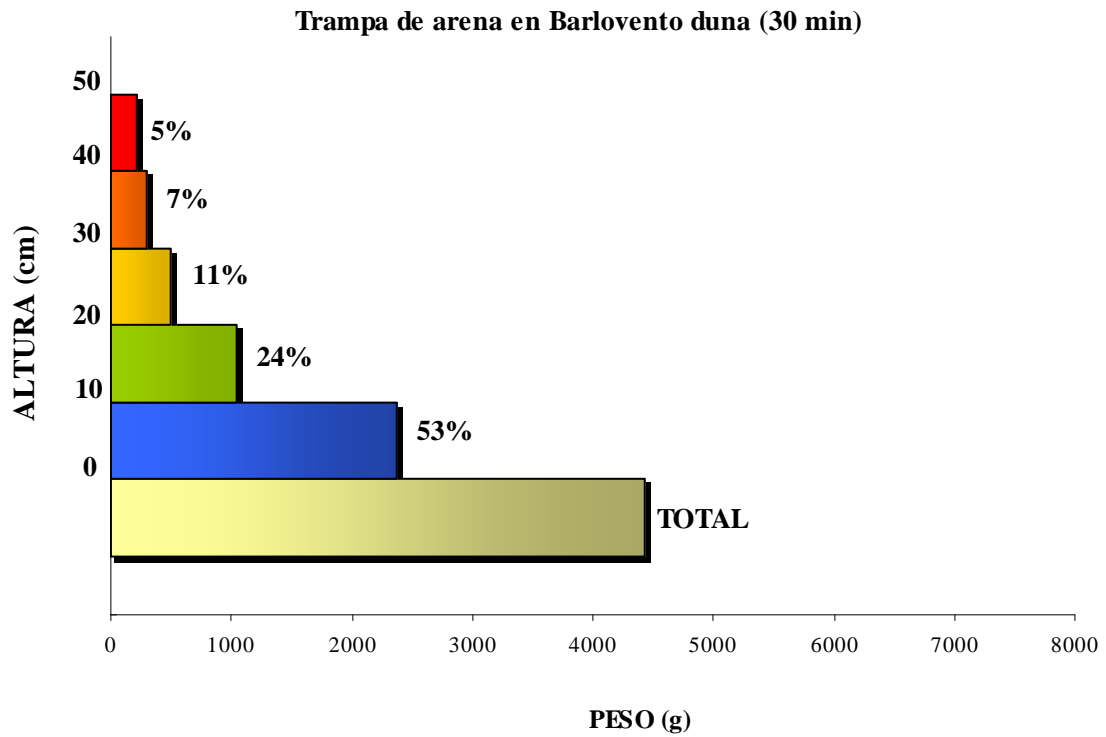


Fig. 6.21. Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en la cara de barlovento durante 30 minutos

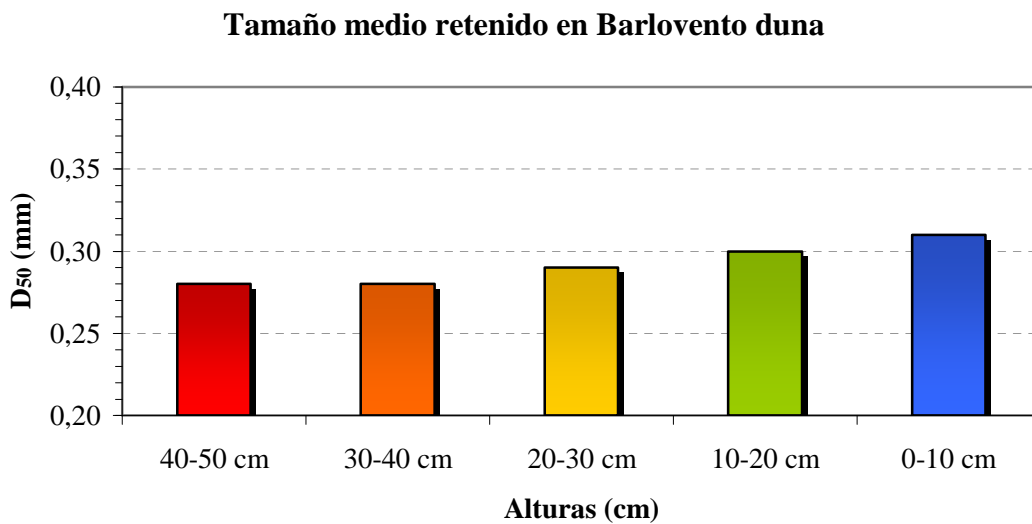


Fig. 6.22. Tamaño medio (D<sub>50</sub>) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en la cara de barlovento

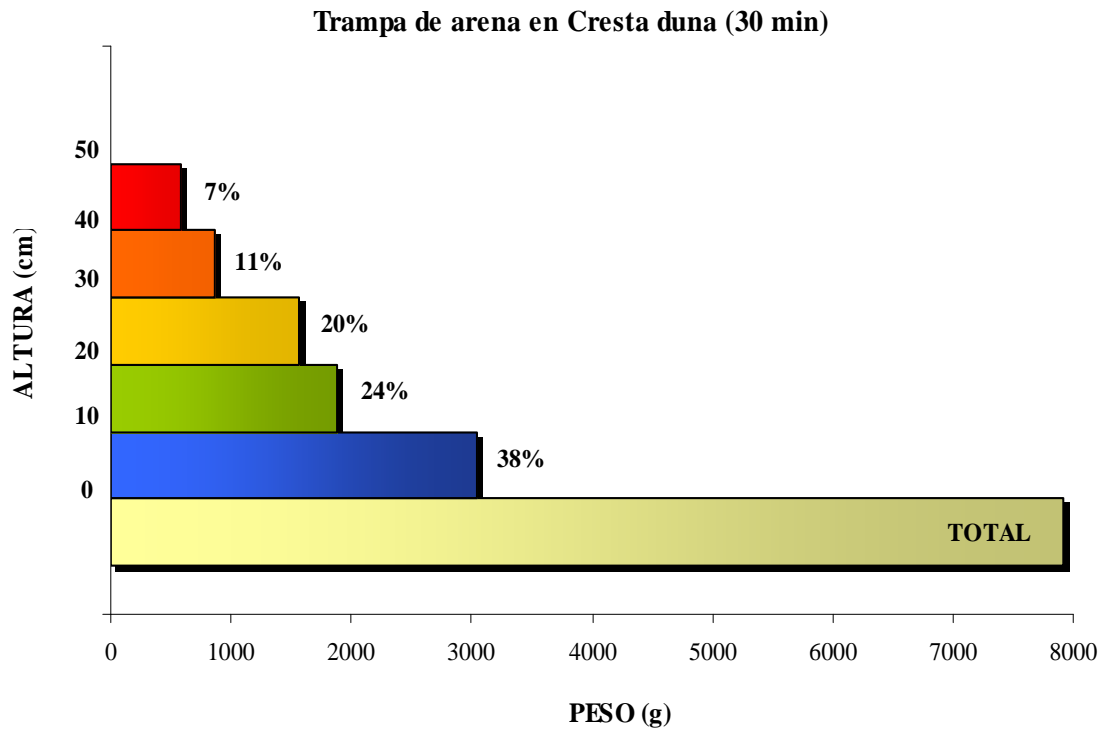


Fig. 6.23. Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en la cresta dunar durante 30 minutos

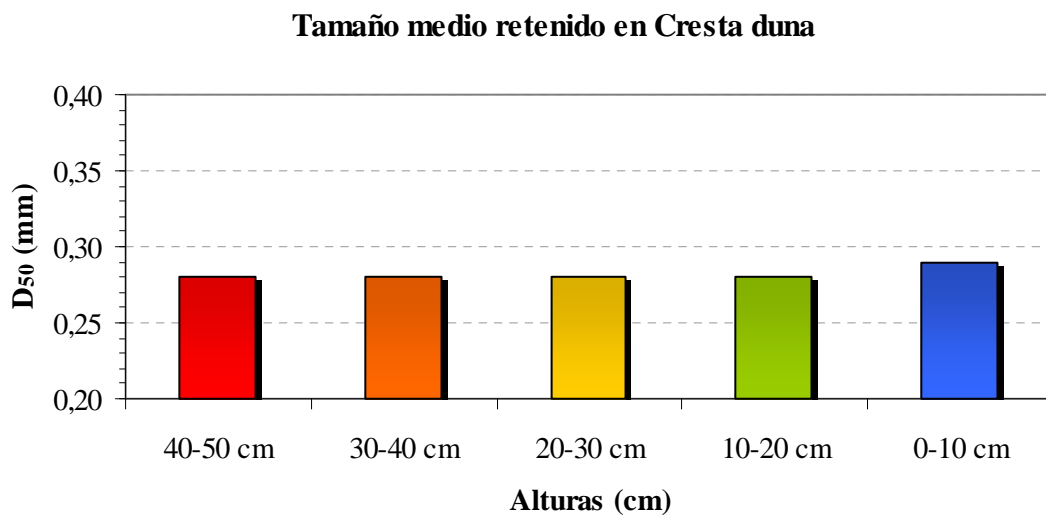


Fig. 6.24. Tamaño medio (D50) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en la cara de barlovento

Tal como se deduce de la Fig. 6.19, de un total de 1,3 kg recogidos por la trampa de arena en el pie de duna durante media hora, casi la mitad han quedado retenidos en los primeros 10 cm por encima de la superficie dunar. El resto ha ido acumulándose de forma exponencialmente negativa con la altura (Fig. 6.20), hasta obtenerse un 6% del total en el último nivel, entre los 40 y 50 cm. La granulometría de la arena recogida en el pie de duna demuestra que el tamaño medio de grano disminuye paulatinamente al aumentar la altura, de modo que se han encontrado valores de  $D_{50}$  de 0,33 mm de los 0 a 10 cm y de 0,29 mm entre los 40 y 50 cm de altura.

En la cara de barlovento el volumen total de sedimento desplazado durante 30 minutos ha sido de 4,43 kg, de los cuales más de la mitad ha sido retenido en los primeros 10 cm y más del 75% del peso total en los primeros 20 cm (Fig. 6.21). En el último nivel (40-50 cm) se ha acumulado el 5%. El tamaño medio de grano ( $D_{50}$ ) ha ido descendiendo progresivamente al aumentar la altura, encontrándose valores de entre 0,28 y 0,31 mm, de modo que los granos más finos han sido transportados por suspensión a mayor altura (Fig. 6.22).

En cuanto a la cresta dunar, se ha llegado a recoger casi 8 kg de arena en tan sólo media hora (Fig. 6.23). La distribución del sedimento en función de la altura ha sido relativamente más homogénea que en el pie o en la cara de barlovento, acumulándose un 38% en los primeros 10 cm (Fig. 6.24). Los porcentajes acumulados en los niveles superiores también han sido mayores que en las otras dos zonas del perfil, lo que demuestra que el transporte en la cresta se produce de forma masiva y a lo largo de un mayor rango de alturas. Los resultados granulométricos de la arena retenida en cada nivel de la trampa situada en la cresta han sido bastante similares, lo que nos da idea de que los materiales que se transportan hasta la cresta están bastante bien clasificados, con un  $D_{50}$  de 0,28 mm en todos los niveles excepto en los primeros 10 cm, donde se ha encontrado arena ligeramente más gruesa (0,29 mm).

Asimismo, también se ha comparado el transporte real por hora con el transporte potencial calculado a partir del viento registrado para cada una de las 3 zonas del perfil donde se instaló la trampa de arena, tal como se muestra en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9. Comparación de las tasas de transporte eólico real obtenido a partir del sedimento retenido en la trampa de arena en las 3 zonas del perfil y las tasas de transporte teórico calculadas mediante la fórmula de Bagnold a partir de datos de viento

Hora	Zona	$q_{\text{real}}$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	$q_{\text{teórica}}$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	$q_{\text{real}}$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ )	$q_{\text{teórica}}$ ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ )	$q_r/q_t$
10:00-10:30	Cresta duna	2,20E-02	4,98E-03	79,16	17,92	4,42
11:00-11:30	Barlovento	1,23E-02	4,98E-03	44,30	17,92	2,47
12:00-12:30	Pie duna	3,63E-03	5,39E-03	13,05	19,41	0,67

Siguiendo la misma metodología llevada a cabo a lo largo de esta tesis, las tasas de transporte sedimentario teórico se han obtenido utilizando las velocidades horarias registradas por la estación meteorológica de Tarifa. De este modo, y teniendo en cuenta el momento en el que se instaló la trampa en cada zona del perfil (según se observa en la Tabla 6.9), se han extraído tres tasas de transporte eólico potencial, determinadas entre las 10 y las 12:30 de la mañana del 15 de Agosto de 2009.

Sin embargo, en este caso, entre las tasas teóricas de las distintas zonas del perfil no se establece mucha diferencia, ya que, según los datos oficiales, de 10 a 12 de la mañana el viento sopló con una velocidad media de  $37 \text{ km h}^{-1}$ , mientras que durante la instalación de la trampa en el pie de duna la velocidad aumentó ligeramente a  $38 \text{ km h}^{-1}$ . Estas tasas teóricas resultan del orden de 2 a 4 veces menores que los valores de las tasas reales obtenidas a partir del sedimento retenido en la trampa en la cara de barlovento y en la cresta. Esto significa que el transporte teórico podría resultar más realista utilizando las velocidades de viento medidas a una escala más local, ya que, tal como se aprecia en la Tabla 6.8, los vientos registrados in situ mediante anemómetro sí que tienden a experimentar grandes variaciones en función de la zona del perfil dunar, sobre todo al tratarse de una duna cuya cresta se sitúa en torno a los 40 metros de altura con respecto al nivel medio del mar.

## **CAPÍTULO SÉPTIMO**



**RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.  
NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**



# **CAPÍTULO 7. RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

## **7.1. Resumen de resultados**

Es evidente el papel crucial que juegan las dunas costeras tanto en el mantenimiento estructural como biológico del litoral, y aún más frente a las amenazas que puede plantear el cambio climático. Además, debido a las necesidades socioeconómicas derivadas del turismo, nuestras costas están sometidas a continuas presiones. Son muchas las dunas costeras que han sido alteradas por la acción antrópica a lo largo de la historia, lo cual ha contribuido a la degradación y destrucción en unos casos y a la desestabilización en otros.

La duna de Valdevaqueros, situada en el término municipal de Tarifa, es uno de los ejemplos más llamativos de duna transgresiva altamente activa, sujeta a vientos de levante de gran intensidad debido a su proximidad con el Estrecho de Gibraltar. Pese a que en los años 30 la duna estaba únicamente constituida por pequeñas acumulaciones de arena en la parte superior, éstas amenazaban con alcanzar la zona militar situada en Punta Paloma. De hecho, a mediados del s. XX se llevaron a cabo diversas actuaciones (entre ellas la plantación del pinar y establecimiento de bloques sólidos de hormigón) que lejos de frenar su avance, agravaron la situación, favoreciendo la desestabilización dunar. Hoy en día, el principal problema radica en la continua invasión de la única carretera que conduce al poblado de Punta Paloma, pese a los continuos esfuerzos de restauración ambiental realizados por la Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico.

Debido al comportamiento cambiante de la duna, la metodología de campo ha consistido en la planificación de diversas campañas a escala anual (largo plazo), mensual (medio plazo), diaria (corto plazo) y horaria (muy corto plazo). En dichos seguimientos se han realizado: levantamientos topográficos del perfil dunar mediante dispositivos de posicionamiento, tales como estación total y GPS diferencial, muestreo



de sedimentos para su posterior análisis granulométrico, establecimiento de una trampa de arena y recopilación de datos meteorológicos. Todo ello con el objetivo de evaluar la movilidad de la duna de Valdevaqueros mediante el cálculo de índices de transporte sedimentario teóricos y reales, así como el análisis de cambios en el perfil dunar mediante la aplicación de Funciones Empíricas Ortogonales (EOF) y su reconstrucción a diferentes plazos.

#### 7.1.1. Evolución a largo plazo

Tras el estudio del comportamiento dunar a largo plazo, que abarca un periodo de 11 años (Junio 1995-Mayo 2006), se ha determinado una tasa de migración media de  $17,5 \text{ m año}^{-1}$ , con valores máximos que han alcanzado los  $38 \text{ m año}^{-1}$  entre ciertos levantamientos. La altura media de la cresta dunar ha sido de 31,3 metros, con una desviación estándar de 5 metros. El análisis de los datos meteorológicos a largo plazo demuestra que el viento de levante es el principal responsable del transporte sedimentario hacia la cresta dunar, con un potencial de deriva (DP) cercano a 10.000 unidades vector y una dirección de deriva resultante de  $92,23^\circ$  (viento del Este). También se ha encontrado que el porcentaje de vientos de levante que superan la velocidad de fricción umbral es de casi el 75%. Por otra parte, existen episodios de abundante precipitación (447,8 mm) que se encuentran paradójicamente ligados a periodos de importante acreción dunar, como de Noviembre de 2003 a Mayo de 2006.

Derivada de la aplicación de las EOF, se ha observado que la 1ª autofunción, cuya contribución a la varianza total de los datos es del 96,17%, presenta un volumen de acreción de  $1.758 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  durante los 11 años del seguimiento. La 2ª componente, que explica el 3,25% de la variabilidad total de los datos, se caracteriza por la localización de un punto pivote situado a mitad de la cara de barlovento que describe un basculamiento del perfil. La 3ª y 4ª componentes describen cambios en la inclinación de las pendientes a barlovento y avances paralelos del perfil dunar con pequeños cambios volumétricos entre intervalos, respectivamente. Por otro lado, el ángulo de la pendiente a sotavento ha sido muy variable (con una media de  $15,7^\circ$  y una desviación de  $6,8^\circ$ ) debido a las variaciones en la altura de la cresta y el borde dunar. De este modo, la superficie dunar ha acumulado un volumen total neto de  $1.513 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  durante estos 11 años, es decir, unos  $138 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , comparable al volumen extraído por año,

exceptuando el último intervalo de estudio (Noviembre 2003- Mayo 2006) donde la acumulación natural superó el extraído artificialmente.

### 7.1.2. Evolución a medio plazo

En el estudio de las componentes reconstruidas a medio plazo en el que la toma de datos fue mensual (Mayo-Diciembre 2006) se observa cómo el perfil medio, representado por la 1ª autofunción (con un 99,81% de la varianza de los datos) presenta una cresta que adopta una forma bicúspide, posiblemente debida a la colocación de tablestacas justo en la zona de la cresta. Además, aparece una elevada acreción del perfil (de aproximadamente 2,5 metros) durante sólo los primeros dos meses. A continuación disminuye su altura alrededor de 1,75 m debido a las extracciones de arena y finalmente tiende a un régimen estacionario. La 2ª autofunción (que representa sólo el 0,11% de la varianza) describe pequeños cambios en la altura del perfil durante los distintos levantamientos. Durante estos 6 meses, el perfil ha experimentado una acreción de 219 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup>, es decir, una tasa de transporte sedimentario de 36,5 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> mes<sup>-1</sup>. Además se han registrado unas pendientes medias de barlovento y sotavento de 14,2° y 19,6°, respectivamente.

En cuanto al análisis de los datos bimensuales (Septiembre 2008-Agosto 2009), la 1ª componente reconstruida (que engloba el 99,84% de la varianza total de los datos) muestra un perfil medio con una morfología más suave que durante el seguimiento mensual, con periodos alternativos de aumento y descenso de la altura dunar, presentando una acreción neta (teniendo en cuenta las operaciones de extracción de áridos) de 280 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> durante dicho periodo, es decir, de 25,5 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> mes<sup>-1</sup>. La 2ª componente reconstruida, con sólo el 0,14% de la varianza contenida, explica diferencias de aproximadamente 1 metro en la altura a lo largo del perfil dunar, mostrando una tendencia basculante del perfil desde la cara de barlovento hacia la cresta dunar. Durante ese periodo, las pendientes medias han sido de 12,9° para la cara de barlovento y 14° para la cara de deslizamiento o avalancha.

Comparativamente, los perfiles reconstruidos de ambos seguimientos identifican una mayor variabilidad desde Septiembre de 2008 a Agosto de 2009 que de Mayo a Diciembre de 2006.

### 7.1.3. Evolución a corto plazo

El seguimiento topográfico a corto plazo se ha efectuado durante los días comprendidos entre el 5 y el 22 de Julio de 2006, abarcando un temporal completo de vientos de levante de moderada intensidad (con una velocidad media de  $31,4 \text{ km h}^{-1}$  registrada por la estación meteorológica de Tarifa). Los resultados derivados de la obtención de la 1ª componente reconstruida (explicando el 99,95% de la varianza comprendida en los datos) han mostrado que la duna ha crecido 1,3 metros en aproximadamente una quincena, alcanzando su máxima altura (40 m) tras 9 días del inicio de la campaña. Mediante la 2ª autofunción (que contiene tan sólo el 0,04% de la variabilidad) se han identificado pequeños y puntuales cambios en la zona de la cresta, alrededor de varios puntos pivote, mostrando una tendencia basculante del perfil desde la cara de barlovento hacia la cresta dunar. La tasa real de transporte ha alcanzado los  $14,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ . Las pendientes medias a barlovento y sotavento han sido de  $14,3^\circ$  y  $21,1^\circ$  respectivamente.

### 7.1.4. Evolución a muy corto plazo

Este análisis, realizado a partir de un seguimiento de 24 horas (14-15 Agosto 2009), revela que el avance del borde de la cresta dunar ha sufrido mayores variaciones en comparación con el resto de puntos del perfil, con una tasa de avance de 1,75 m en 24h. Lamentablemente, no se han encontrado en la literatura resultados comparables derivados de investigaciones similares a tan corto plazo. Una vez el borde de la cresta ha alcanzado la altura máxima (casi 42 m) ésta se estabiliza, favoreciendo el transporte de arena hacia la cara de avalancha. La tasa de transporte sedimentario calculado a partir de la serie topográfica ha sido de  $22,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ . Por otra parte, tras la instalación de la trampa sedimentaria instalada durante 30 minutos bajo intensos vientos de levante con rachas que superaban los  $60 \text{ km h}^{-1}$  se ha obtenido que el transporte de sedimentos en la cresta es aproximadamente el doble que el medido en la cara de barlovento y más de seis veces mayor que en el pie de duna. Además, se ha comprobado que del peso total recogido por la trampa en el pie y a barlovento, cerca del 50% queda retenido en los primeros 10 cm por encima de la superficie dunar. El tamaño medio de arena ha disminuido progresivamente desde la superficie dunar hasta los 50 cm de altura

de la trampa de arena, excepto en la cresta, donde la distribución del diámetro medio de grano con la altura es homogéneo. En cuanto a las pendientes, la cara de barlovento se ha mantenido constante ( $13,8^\circ$ ) mientras que a sotavento las dos pendientes han aumentado aproximadamente un grado ( $17^\circ$ - $18^\circ$  y  $25^\circ$ - $26^\circ$ , respectivamente) en sólo 24 horas.

## 7.2. Conclusiones

- La movilidad de la duna activa de Valdevaqueros se encuentra sujeta a dos factores principales que han influido en su evolución: por un lado, a un régimen de vientos quasi-unidireccional y por otro a un fenómeno de continua antropización. El hecho de analizar la evolución dunar a menor plazo ha permitido filtrar los efectos directos causados por las intervenciones antrópicas, proporcionando una visión más neta de la acción dinámica que ejerce el viento.
- El manejo de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF), si bien ya se había utilizado con anterioridad para evaluar cambios en los perfiles de playa, resulta una aplicación novedosa en el estudio de la evolución dunar. Como herramienta alternativa y complementaria a los mapas topográficos, la georreferenciación o la fotogrametría, la técnica de reconstrucción de los perfiles nos aproxima a una interpretación más clara e intuitiva de los procesos físicos que originan dichas alteraciones. Mediante la representación conjunta de una serie de combinaciones lineales de funciones espaciales y temporales, se consigue la máxima compresión de la variabilidad de los datos con el mínimo número de funciones posible. En concreto, la utilización de las EOF ha permitido establecer un método objetivo para definir el perfil medio de la duna y por tanto, poder comparar un mismo perfil en diferentes momentos o distintos perfiles de diferentes lugares. De este modo, la aplicación de las EOF ha resultado muy útil para identificar cambios y tendencias en la evolución morfodinámica de la duna de Valdevaqueros, a largo plazo (escala anual), medio plazo (mensual) y corto plazo (quincenal); si bien se ha demostrado que a muy corto plazo (escala horaria) la variabilidad contenida en los datos es demasiado baja, de forma que aunque resulta más compleja, es necesaria una interpretación directa de los levantamientos originales, sin tratamiento estadístico previo.

- El análisis a nivel global muestra que la 1ª autofunción representa el perfil medio o perfil de equilibrio dunar, que se caracteriza por presentar una cara de barlovento con una pendiente más estable, una cresta con importantes variaciones en su altura y una cara de avalancha cuyo ángulo crítico o de reposo está sujeto a fuertes modificaciones debido a los cambios de elevación de la cresta y el borde dunar y a las continuas extracciones de arena a sotavento de la duna. La 2ª autofunción, describe basculamientos del perfil entorno a puntos pivote, que confirman que el transporte sedimentario tiene lugar desde la cara de barlovento hacia la cresta y sotavento del perfil.
- El movimiento “inicial” del manto eólico previo al alcance de la carretera (reflejado a largo plazo) describe un avance progresivo y uniforme del perfil. A partir del momento en el que el perfil alcanza la carretera, éste se ve forzado (directa o indirectamente por las extracciones de arena e instalación de captadores) a experimentar variaciones en su morfología (sobre todo en la cresta y a barlovento) que conlleva a su vez importantes cambios en las pendientes a sotavento, describiendo un patrón mucho más complejo.
- A medio plazo la duna ha mostrado distintos comportamientos entre el seguimiento mensual (Mayo-Diciembre 2006) y el seguimiento bimensual (Septiembre 2008-Agosto 2009). En el primer caso, la cresta asociada al perfil medio ha sufrido importantes alteraciones y en el segundo, la tendencia ha sido a adoptar un perfil más suave. Para ambos casos, el análisis de la 2ª componente reconstruida ha permitido identificar alteraciones antrópicas del perfil de forma objetiva durante pequeños intervalos temporales. Ello indica que esta autofunción está estrechamente relacionada con las extracciones y movilizaciones de arena, por lo que el perfil de equilibrio se encuentra más condicionado por las intervenciones antrópicas previas a cada levantamiento, que por el intervalo de seguimiento en cuestión.
- Los resultados a corto plazo (5-22 Julio 2006) y muy corto plazo (14-15 Agosto 2009) demuestran que el perfil, al alcanzar su máxima elevación en la cresta, ésta tiende a reducir su altura a favor de un desplazamiento horizontal tierra adentro. Estos cambios son incluso apreciables a escala horaria, donde se ha comprobado que el avance dunar es mucho más significativo (escala métrica) en la zona del borde de la cresta y en la cara de avalancha a sotavento que en el resto del perfil.

- El análisis meteorológico ha demostrado que los vientos de levante son los principales responsables de la acción eólica y del aporte sedimentario hacia la duna. Una vez la arena entra a formar parte de la duna activa, ésta ya no regresa al equilibrio dinámico del sistema playa-duna. La humedad relativa del aire y la precipitación no han mostrado una asociación clara o suficiente influencia en las variaciones del perfil.
- Tras considerar la tasa de transporte “natural” experimentada por el perfil (teniendo en cuenta el volumen de arena extraído más el calculado a través del análisis de los perfiles) se ha determinado que para que se efectúe un desplazamiento volumétrico equivalente al de un año sólo son necesarias entre 2 y 3 semanas de presencia de vientos de levante de moderada intensidad (alrededor de 40 km/h). Esto proporciona el establecimiento de un criterio para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión dunar. En este caso, se demuestra que la actual estrategia basada en la remodelación fisiográfica del perfil a través de la movilización de arena desde el frente dunar hacia el pie de duna no es sostenible.
- La comparación del transporte real extraído a partir del análisis topográfico y el transporte teórico obtenido mediante las formulaciones tradicionales ha permitido la determinación de un índice adimensional que relaciona ambas tasas. La curva derivada de la representación de dicho índice en función del intervalo de medición obedece a una distribución logarítmica decreciente. Esto es, el transporte de sedimentos teórico se aproxima más al real conforme aumenta el intervalo de seguimiento, debido a que durante las campañas realizadas a menor escala temporal los efectos causados por los temporales de viento adquieren mayor importancia (siendo de un orden de magnitud superior) ya que se discriminan los efectos antrópicos como las extracciones.
- A partir del análisis de los datos obtenidos in situ mediante la instalación de la trampa de arena durante un temporal de levante, se deduce que el transporte real de sedimentos depende en gran medida de la zona del perfil transversal de la duna, siendo éste máximo en la cresta, seguido por la cara de barlovento y el pie dunar. Estos resultados se asemejan más a los teóricos si en el cálculo de éstos últimos se contempla la velocidad del viento registrada in situ, en lugar de tomar los datos obtenidos por la estación meteorológica más cercana.

### **7.3. Nuevas líneas de investigación**

Si bien en esta tesis se ha presentado una metodología general para el estudio objetivo de dunas (aplicado al caso particular de la duna de Valdevaqueros), tomando como línea conductora la aplicación de las Funciones Empíricas Ortogonales (empleada por primera vez para el estudio de la evolución de perfiles dunares), son varios los aspectos que podrían analizarse de forma complementaria con el fin de conocer de una manera más global la génesis y transformación de dicha duna.

Una vez determinadas las elevadas tasas de transporte en la duna y los volúmenes de arena extraída de la misma, es obvio preguntarse acerca de la procedencia de dicha fuente de sedimentos. La falta de datos tanto topográficos como batimétricos de la playa de Los Lances, situada a escasos kilómetros al sureste de la playa de Valdevaqueros, dificulta el conocimiento de dicho aporte sedimentario. De este modo, como futura línea de investigación a resaltar se atendería al estudio morfodinámico de la playa de Valdevaqueros así como toda la playa de Los Lances, hasta sus profundidades de cierre. Dicho análisis se basaría en la realización de campañas batimétricas de periodicidad semestral a lo largo de varios años, con tomas de muestras de sedimento y la utilización de trazadores para evaluar la existencia o no de pérdidas volumétricas de arena e investigar acerca de su procedencia.

Asimismo, podría abordarse el estudio del perfil de equilibrio dunar asimilándolo al contemplado por Dean para perfiles de playa, de forma que se integren en un parámetro adimensional las condiciones energéticas (en este caso el viento) así como los factores granulométricos del sedimento ( $D_{50}$ ), distinguiendo de forma experimental distintas partes del perfil mediante un ajuste relativamente sencillo.

Debido a que no se tiene mucha información acerca del antiguo campo eólico que conectaba la duna de Valdevaqueros con el sistema dunar de Bolonia, podría resultar útil la investigación de su estructura interna mediante la utilización de radares de penetración interna (GPR) con el fin de conocer la antigüedad de dicho campo así como su evolución a escala geológica.

Por otro lado, sería interesante profundizar en el estudio del transporte sedimentario en los demás perfiles dunares, que aunque no tan activos, influyen en el comportamiento íntegro del campo dunar. Las técnicas topográficas actuales (no disponibles al inicio de la toma de datos de este estudio) permitirían un cálculo

tridimensional de los volúmenes sedimentarios desplazados. Del mismo modo, resultaría conveniente el planteamiento de una campaña que permita justificar la hipótesis de cómo la instalación de tablestacado crea una morfología más abrupta del perfil dunar. Además de los análisis granulométricos efectuados, como investigación complementaria podría realizarse el estudio de las propiedades morfológicas y texturales de los granos (esfericidad, redondez, rugosidad, etc.), ya que condicionan el tipo de transporte sedimentario y el ángulo de reposo presente en las pendientes.

En cuanto a la ampliación de los datos sedimentarios obtenidos mediante la trampa de arena, sería interesante estudiar cómo diferentes condiciones de viento (tanto en velocidad como dirección), lluvia y humedad intersticial, influyen en la compactación de los granos y por consiguiente, en el transporte eólico sedimentario. A pesar de que la capacidad de transporte de sedimentos por viento (calculada a partir de los datos meteorológicos de la estación de Tarifa) ha quedado suficientemente justificada, es preciso estudiar el factor eólico a escala más local, de forma que represente más estrechamente las condiciones eólicas a las que está sujeta la duna de Valdevaqueros. De este modo, podría establecerse una función de transferencia que permitiera relacionar de manera virtual la intensidad del viento en la duna partiendo de los datos de la estación meteorológica de Tarifa.





## **ANEXOS**



# ANEXO I. DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MÉTODO DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES

El problema clásico de las funciones ortogonales, también conocidas como autofunciones o "*eigenfunctions*", surge al intentar resolver un sistema de ecuaciones diferenciales lineales sujetas a unas determinadas condiciones de contorno. La solución existe sólo para determinados valores (autovalores) de un parámetro  $\lambda$  que satisfacen una determinada ecuación:

$$A \cdot x = \lambda \cdot x \quad [A-I.1]$$

O bien: 
$$a_{ij} \cdot x_j = \lambda \cdot x_i \quad [A-I.2]$$

donde A es una matriz con los coeficientes de los operadores lineales del sistema de ecuaciones diferenciales a resolver. A los distintos  $\lambda$  que satisfacen [1 o 2] ya hemos dicho que se les llama autovalores del sistema, y a los x, asociados a cada uno de esos  $\lambda$ , autovectores.

La ecuación anterior también se puede expresar como:

$$[A - \lambda I] \cdot x = 0 \quad [A-I.3]$$

donde I es la matriz identidad.

Como ya se verá más adelante, la matriz A se obtiene a partir del producto de otra matriz por su traspuesta. Se puede demostrar que eso conduce a que la matriz A sea real y simétrica, y en este caso particular los autovalores gozan de unas propiedades específicas que se enuncian a continuación:

- Los autovalores de una matriz real simétrica son todos reales.
- Dos autovectores asociados a dos autovalores distintos son ortogonales.
- Una matriz real simétrica de dimensiones nxn tiene n autovectores independientes.
- Si la matriz además de simétrica y real es definida positiva, entonces sus autovalores son todos positivos.

El problema de las autofunciones empíricas debe satisfacer la misma ecuación [A.I-3]. La diferencia radica en el hecho de que, para el problema clásico, es la matemática la que nos indica la forma de la matriz A. En el caso empírico, los coeficientes de la matriz A se extraen de los datos y lo que se intenta es explicar la variabilidad de los mismos con unas pocas funciones: los autovectores o autofunciones.

Estas autofunciones se encuentran aplicando la siguiente condición: que su contribución a la varianza de los datos (definida como valor cuadrático medio) sea máxima. Esto es, la primera autofunción conserva la mayor parte de la varianza de los datos, la segunda autofunción el mayor valor de la varianza restante y así sucesivamente. De este modo, es posible representar un elevado porcentaje de la varianza de los datos con un número muy reducido de funciones.

Para desarrollar el método partimos de que tenemos una serie de datos  $h_{ij} = h(x_i, t_j)$ , donde, para fijar ideas y aclarar el proceso,  $h_{ij}$  podría ser la cota del punto  $x_i$  durante la campaña batimétrica  $j$ . El factor  $x_i$  es la distancia a la cabecera desde el punto  $i$  dentro de un perfil transversal, con  $i$  variando entre 1 y  $n_x$ , y siendo  $n_x$  el número de puntos del perfil. El parámetro  $t_j$  indica que se trata de los datos tomados en la campaña  $j$ , donde dicho índice varía entre 1 y  $n_t$ , y siendo  $n_t$  el número de batimetrías efectuadas (Fig. 1)

Estableceremos la hipótesis de que existen dos series de funciones  $X_l(x)$ , con  $l = 1 \dots N$ , y  $T_m(t)$ , con  $m = 1 \dots N$ , que cumplen:

$$\sum_{i=1}^{n_x} X_u(x_i) \cdot X_v(x_i) = 0 \quad \text{para } u \neq v, \quad u, v = 1 \dots N$$

$$\sum_{j=1}^{n_t} T_u(t_j) \cdot T_v(t_j) = 0 \quad \text{para } u \neq v, \quad u, v = 1 \dots N$$

Es decir, son ortogonales o, lo que es lo mismo, independientes entre sí. Para  $N$  suficientemente grande, se puede conseguir:

$$h_{ij} = h(x_i, t_j) = \sum_{l=1}^N X_l(x_i) T_l(t_j) \quad \text{[A-I.4]}$$

Como puede apreciarse, se trata de un desarrollo parecido al de Fourier, pero sin obligar, a priori, a que dichas funciones sean senos y cosenos. Será el propio método el que nos indique la forma de las mismas a partir de la variabilidad de los datos disponibles.

Si existe una estructura o tendencia en los datos (si no son completamente aleatorios), entonces tendremos una explicación mayoritaria de su variabilidad con pocas autofunciones. Y,

en la práctica, nos bastará con un número N de autofunciones muy inferior al N teórico. Eso conllevaría a la aparición de un error residual, al despreciarse términos de la serie, que podremos expresar como:

$$\varepsilon_{ij} = h_{ij} \text{ (real)} - h_{ij} \text{ (estimada)}$$

$$\varepsilon_{ij} = h_{ij} - \sum_{l=1}^N X_l(x_i) \cdot T_l(t_j) \quad [\text{A-I.5}]$$

Vamos a suponer que X(x) es la base generadora y que T(t) son sus coeficientes. Para obtener el valor de dichos coeficientes minimizaremos el error cuadrático medio existente entre los datos y el ajuste.

Diferenciando con respecto a T<sub>l</sub> e igualando a 0:

$$\sum_{i=1}^{n_x} \varepsilon_{ij}^2 = \sum_{i=1}^{n_x} \left( h_{ij} - \sum_{l=1}^N X_l(x_i) \cdot T_l(t_j) \right)^2 \quad j = 1, \dots, n_t \quad [\text{A-I.6}]$$

$$\sum_{i=1}^{n_x} \varepsilon_{ij}^2 = \sum_{i=1}^{n_x} \left( h_{ij} - X_1 T_1 - X_2 T_2 - \dots - X_l T_l - \dots - X_N T_N \right)^2$$

$$2 \sum_{i=1}^{n_x} \left( h_{ij} - \sum_{m=1}^N X_m(x_i) \cdot T_m(t_j) \right) \cdot (-X_l(x_i)) = 0 \quad l = 1, \dots, N$$

Si exigimos que las autofunciones X<sub>l</sub>(x) que, además de ortogonales, sean ortonormales, entonces: X<sub>i</sub>(x) X<sub>m</sub>(x) = δ<sub>im</sub>

$$\sum_{i=1}^{n_x} [h_{ij} X_l(x_i) - T_l(t_j)] = 0 \quad l = 1, \dots, N$$

Despejando:

$$T_l(t_j) = \sum_{i=1}^{n_x} h_{ij} \cdot X_l(x_i) \quad l = 1, \dots, N \quad [\text{A-I.7}]$$

De modo similar podíamos haber actuado tomando como base generadora las funciones temporales y como coeficientes las espaciales. De ese modo:

$$X_l(x_i) = \sum_{j=1}^{n_t} h_{ij} \cdot T_l(t_j) \quad l = 1 \dots N \quad [\text{A-I.8}]$$

De donde se deduce que hallada una de las dos series de funciones podemos calcular la otra a partir del producto de aquella con la matriz de datos. Para encontrar esas primeras autofunciones vamos a definir primero, y después analizar, una variabilidad de los datos consistente en el producto cruzado de los mismos. En el caso que se hubiera restado a los datos su media, coincidiría con la covarianza. Entendiéndolo así, usaremos el símbolo  $\sigma^2$  para designarla.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n_x n_t} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_t} h^2(x_i, t_j) \quad [\text{A-I.9}]$$

Sustituyendo la h real por la h estimada [4] y utilizando la ortogonalidad de las autofunciones:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n_x n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{l=1}^N T_l^2(t_j) \quad [\text{A-I.10}]$$

Para obtener las funciones  $X_l(x)$  vamos a maximizar su contribución en la varianza de los datos. Al objeto de evitar que los coeficientes sean arbitrariamente grandes, restringimos el tamaño de dichas funciones a la unidad. Además, puesto que queremos condicionar el problema de maximización, usaremos los multiplicadores de Lagrange. Para ello, debemos maximizar la expresión:

$$\sum_{j=1}^{n_t} T_l^2(t_j) - \lambda_l \left[ \sum_{i=1}^{n_x} X_l^2(x_i) - 1 \right] \quad l = 1 \dots N \quad [\text{A-I.11}]$$

Sustituyendo  $T_l$  por su expresión [7]

$$\sum_{j=1}^{n_t} \left[ \sum_{i=1}^{n_x} h_{ij} \cdot X_l(x_i) \right]^2 - \lambda_l \left[ \sum_{i=1}^{n_x} X_l^2(x_i) - 1 \right] \quad l = 1 \dots N$$

Diferenciando con respecto a  $X_l$  e igualando a 0.

$$\sum_{j=1}^{n_t} \left[ \sum_{i=1}^{n_x} h_{ij} X_l(x_i) \right] \left[ \sum_{i=1}^{n_x} h_{ij} \right] - \lambda_l \sum_{i=1}^{n_x} X_l(x_i) = 0$$

$$\sum_{j=1}^{n_t} \left[ \sum_{i=1}^{n_x} X_l(x_i) \cdot \sum_{s=1}^{n_x} h_{ij} \cdot h_{sj} \right] = \lambda_l \sum_{i=1}^{n_x} X_l(x_i)$$

$$\sum_{i=1}^{n_x} X_l(x_i) \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{s=1}^{n_x} (h_{sj} \cdot h_{sj}) = \lambda_l \sum_{j=1}^{n_x} X_l(x_j) \quad [\text{A-I.12}]$$

que puede escribirse en forma matricial como

$$X_l(x) \cdot A = X_l(x) \cdot \lambda_l \quad [\text{A-I.13}]$$

Expresión que también puede disponerse como:

$$[A - \lambda I] X_l = 0 \quad [\text{A-I.14}]$$

donde por su similitud por [3] apreciamos que  $\lambda$  y  $X_l$  son, respectivamente, los autovalores y autovectores de A.

Además, puesto que  $H = \{h_{ij}\}$  es una matriz de  $n_x$  filas y  $n_t$  columnas,  $H^T = \{h_{ij}\}$  tendrá  $n_t$  filas y  $n_x$  columnas y por tanto es una matriz cuadrada, donde:

$$A = H \cdot H^T \quad [\text{A-I.15}]$$

$$a_{ij} = h_{i1} \cdot h_{j1} + h_{i2} \cdot h_{j2} + \dots + h_{int} \cdot h_{jnt}$$

$$a_{ji} = h_{j1} \cdot h_{i1} + h_{j2} \cdot h_{i2} + \dots + h_{jnt} \cdot h_{int}$$

Por consiguiente,  $a_{ij} = a_{ji}$ , A es simétrica, y sus autovalores y autovectores cumplirán los teoremas t-1, t-2, t-3 y t-4.

De igual modo se podría hacer diferenciando con respecto a las autofunciones temporales  $T_1(t)$ .

$$T_1(t) \cdot B = T_1(t) \cdot \lambda_1 \quad [\text{A-I.16}]$$

donde  $B = H^T \times H$  es una matriz cuadrada simétrica de  $n_t \times n_t$ .

Si deseamos que las dos series de autofunciones  $X_l$  y  $T_1$  sean ortonormales aparece un factor de normalización.

$$a_l = (n_x \cdot n_t \cdot \lambda_l)^{1/2} \quad [\text{A-I.17}]$$

de modo que:



$$h_{ij} = h(x_i, t_j) = \sum_{l=1}^N X_l(x_i) T_l(t_j) \cdot a_l \quad [\text{A-I.18}]$$

Ahora, ya podemos considerar algunas de las propiedades de estas funciones:

- Las E.O.F., proporcionan el método más eficiente de compresión de los datos. De este modo, toda la varianza contenida en dichos valores puede quedar representada en pocas autofunciones, de forma que los N primeros términos explican el mayor porcentaje de variabilidad de los datos.
- Dado que los conjuntos de autofunciones temporales y espaciales son ortogonales, cada asociación  $\{X_l(x), T_l(t)\}$  representa un modo de variabilidad independiente de cualquier otro de los N-1 restantes.
- La representación de autofunciones es el mejor método en el sentido de ajuste de los datos por mínimos cuadrados. Permite reducir el número de variables y proporciona un método de eliminar el ruido o parte menos predecible de los datos.
- Al tratarse de un conjunto ortogonal de funciones, recuerdan en ciertos aspectos al más familiar Análisis de Fourier. Sin embargo, mientras que este último asume una variación sinusoidal del conjunto de los datos, las EOF no asumen "a priori" forma alguna de las autofunciones. Es la propia estructura de los datos la que determina dicha forma.

Los autovalores son los que proporcionan los pesos de las autofunciones. Nos dan la cantidad de valor cuadrático medio de los datos (varianza si se ha quitado la media) asociada a cada autofunción.

Una hipótesis de gran importancia es la de suponer que los resultados de las EOF se pueden interpretar, en ocasiones, en un sentido físico. En realidad, no existe ninguna razón para asumir de antemano que las autofunciones representen un proceso físico, salvo que los datos varían de distinta manera en función de ciertas acciones físicas. Por ejemplo, en el caso de los perfiles de duna la arena se mueve en respuesta al viento de una manera que podría ser estadísticamente predecible (teniendo en cuenta que algunos vientos soplan con más frecuencia en una época del año determinada). Se podría esperar, por tanto, que dado que la mayor parte de la variabilidad procede del viento, las autofunciones quizás deberían reflejar esta fuerza actuante.

## ANEXO II. APLICACIÓN DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES AL ANÁLISIS DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS DE PERFILES DUNARES. RECONSTRUCCIÓN DE LAS EOF

Con el fin de obtener las funciones empíricas ortogonales, se ha utilizado el programa 3PCA. Para ejecutar dicho programa, es necesaria la creación de un fichero INPUT y la obtención de un fichero OUTPUT. El cabecero del fichero INPUT debe tener la estructura matricial mostrada en la Fig. A-II. 1 antes de introducir los datos del perfil dunar a analizar, teniendo en cuenta que los datos han de ser equidistantes. Para ello, en los casos necesarios, se ha utilizado un programa propio de interpolación (POLO.exe). El número de puntos por perfil correspondería a la primera casilla (fila 1, columna 1). En este ejemplo, existen 31 puntos por perfil, 8 campañas y el número de componentes a extraer viene determinado por las últimas 3 cifras de la primera fila (en este caso serían 3 componentes transversales, 1 longitudinal y 3 temporales).

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
3PCA	VALDEVAQUEROS			
31	1	8	3	1 3
0	0	0	0	0 0 0
5	0	0		
0	100	0	0	0 0 0
0	0			
CROSS-SHORE	LONG-SHORE	TIME		
(F6.2)				

Fig. A-II. 1. Cabecera del fichero input para la aplicación del programa 3PCA

Posteriormente a la inserción de los datos de altura dentro de este fichero INPUT, se procede a la extracción de las tres componentes (L, M y N) del perfil, llamadas “compl.dat”, “compm.dat” y “compn.dat” y del fichero OUTPUT (Fig. A-II.2).

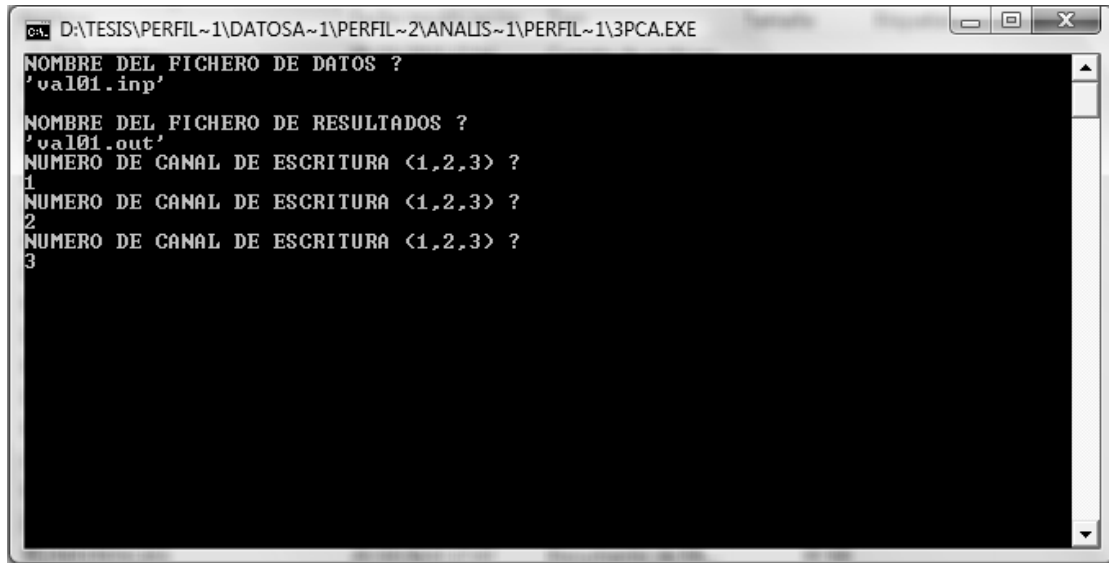


Fig. A-II.2. Ejecución del programa 3PCA.

El fichero OUTPUT es el que muestra la información acerca de las características de las componentes extraídas para dicho perfil. En la primera columna, el archivo nos muestra los 10 primeros datos del fichero INPUT que nos confirman que los datos de entrada son correctos, y además, calcula la constante escalar o *scaling constant* para toda la serie de datos (Fig. A-II.3).

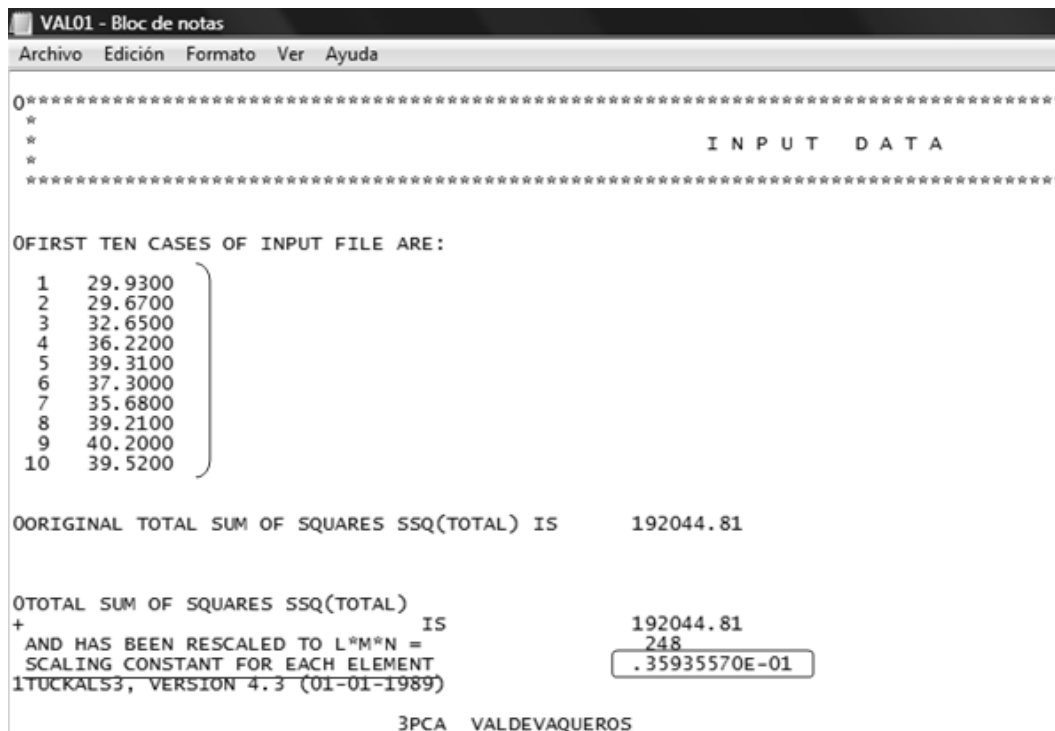


Fig. A-II.3. Cabecera del fichero de salida o output del programa 3PCA.

A continuación, muestra el peso de cada una de las componentes y su contribución a la varianza total de los datos, formando la matriz *Bartussek scaled* (en este caso se obtiene una matriz de 3x3 ya que hemos seleccionado las primeras 3 autofunciones), tal como se muestra en la Fig. A-II.4.

```

*                                     C O R E   M A T R I X
*
*****
0                                     FRONTAL PLANES OF CORE MATRIX DOWN: CROSS-SHORE   ACROSS: LONG-SHORE
0   UNSTANDARDIZED CORE PLANE           EXPLAINED VARIATION           BARTUSSEK SCALED

FRONTAL PLANE ( TIME      )   1
1  13.6274                          .9984
+
+ 2   .0000                          .0000
+
+ 3   .0000                          .0000
+

FRONTAL PLANE ( TIME      )   2
1   .0000                          .0000
+
+ 2   .5151                          .0014
+
+ 3   .0000                          .0000
+

FRONTAL PLANE ( TIME      )   3
1   .0000                          .0000
+
+ 2   .0000                          .0000
+
+ 3   .1263                          .0000
+

```

1.001
.000
.000
.000
.000
.000
26.479
.000
.000
.000
.000
108.016

Fig. A-II.4. Matriz principal del fichero output, con la contribución de cada componente a la varianza total y la “bartussek scaled”

Normalmente, la extracción de la 3ª componente se desprecia si su contribución a la varianza total de los datos es relativamente escasa, como en este caso. A pesar de ello, seguiremos ilustrando el ejemplo extrayendo 3 componentes.

Estos valores se dividirán por la *scaling constant* (en este ejemplo: 0,03593557) para obtener las matrices de covarianza de cada autofunción (Fig. A-II.5).

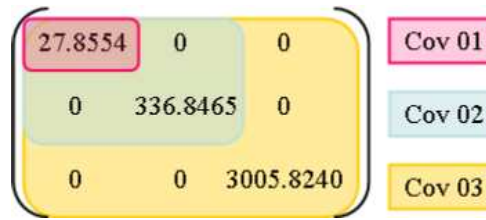


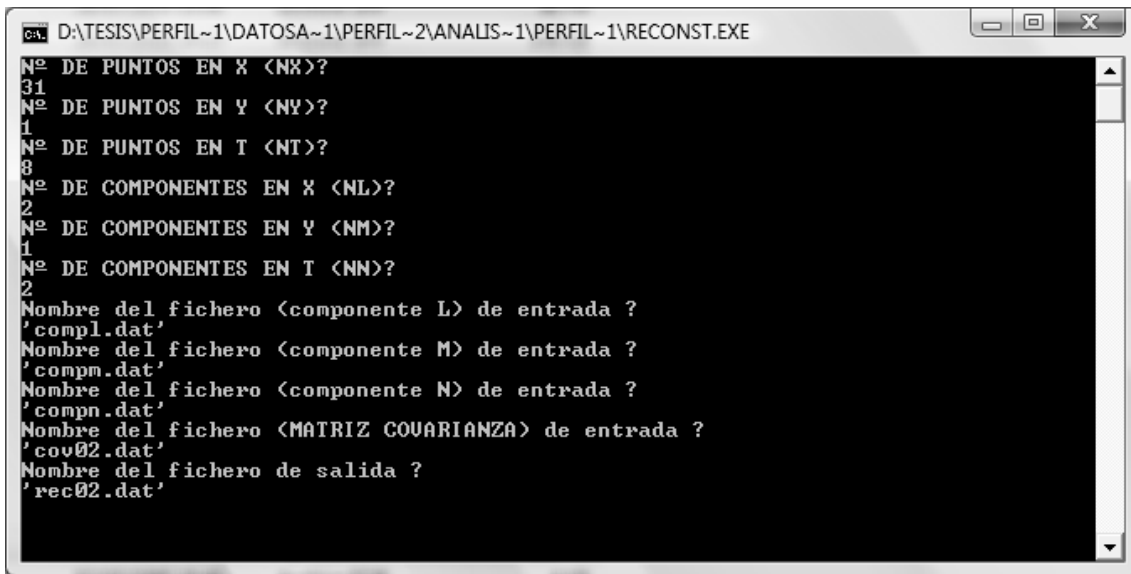
Fig. A-II.5. Extracción de las matrices de covarianza para la reconstrucción de los perfiles.

Una vez obtenidas las matrices de covarianza, puede procederse a la reconstrucción de los perfiles, mediante el programa RECONST.exe. Para ello, el programa nos pide el número de puntos en las tres dimensiones (x, y, t), el número de componentes en esas tres dimensiones, así como las tres componentes de entrada, la matriz de covarianza y el nombre que queremos darle al fichero reconstruido de salida, tal como se muestra en los casos siguientes para la obtención de la 1ª (Fig. A-II.6), 2ª (Fig. A-II.7) y 3ª (Fig. A-II.8) componente aislada reconstruida.

```

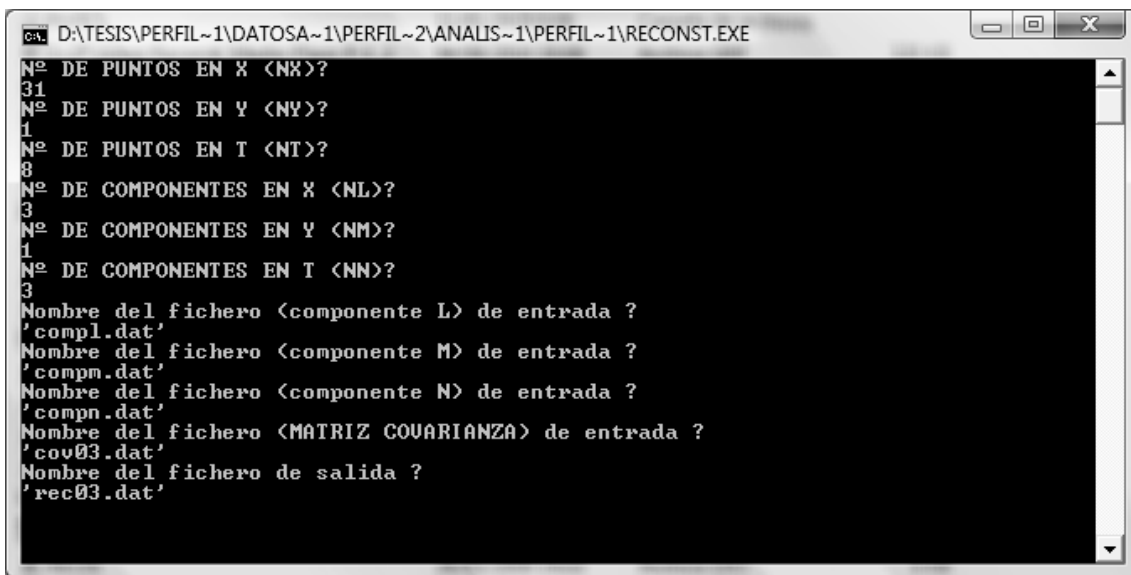
D:\TESIS\PERFIL~1\DATOSA~1\PERFIL~2\ANALIS~1\PERFIL~1\RECONST.EXE
Nº DE PUNTOS EN X <NX>?
31
Nº DE PUNTOS EN Y <NY>?
1
Nº DE PUNTOS EN T <NT>?
8
Nº DE COMPONENTES EN X <NL>?
1
Nº DE COMPONENTES EN Y <NM>?
1
Nº DE COMPONENTES EN T <NN>?
1
Nombre del fichero <componente L> de entrada ?
'compl.dat'
Nombre del fichero <componente M> de entrada ?
'compn.dat'
Nombre del fichero <componente N> de entrada ?
'compn.dat'
Nombre del fichero <MATRIZ COVARIANZA> de entrada ?
'cov01.dat'
Nombre del fichero de salida ?
'rec01.dat'
    
```

Fig. A-II.6. Extracción de la 1ª componente aislada reconstruida mediante el programa RECONST.



```
ca. D:\TESIS\PERFIL~1\DATOSA~1\PERFIL~2\ANALIS~1\PERFIL~1\RECONST.EXE
Nº DE PUNTOS EN X <NX>?
31
Nº DE PUNTOS EN Y <NY>?
1
Nº DE PUNTOS EN T <NT>?
8
Nº DE COMPONENTES EN X <NL>?
2
Nº DE COMPONENTES EN Y <NM>?
1
Nº DE COMPONENTES EN T <NN>?
2
Nombre del fichero <componente L> de entrada ?
'compl.dat'
Nombre del fichero <componente M> de entrada ?
'compm.dat'
Nombre del fichero <componente N> de entrada ?
'compn.dat'
Nombre del fichero <MATRIZ COVARIANZA> de entrada ?
'cov02.dat'
Nombre del fichero de salida ?
'rec02.dat'
```

Fig. A-II.7. Extracción de la 2ª componente aislada reconstruida mediante el programa RECONST.



```
ca. D:\TESIS\PERFIL~1\DATOSA~1\PERFIL~2\ANALIS~1\PERFIL~1\RECONST.EXE
Nº DE PUNTOS EN X <NX>?
31
Nº DE PUNTOS EN Y <NY>?
1
Nº DE PUNTOS EN T <NT>?
8
Nº DE COMPONENTES EN X <NL>?
3
Nº DE COMPONENTES EN Y <NM>?
1
Nº DE COMPONENTES EN T <NN>?
3
Nombre del fichero <componente L> de entrada ?
'compl.dat'
Nombre del fichero <componente M> de entrada ?
'compm.dat'
Nombre del fichero <componente N> de entrada ?
'compn.dat'
Nombre del fichero <MATRIZ COVARIANZA> de entrada ?
'cov03.dat'
Nombre del fichero de salida ?
'rec03.dat'
```

Fig. A-II.8. Extracción de la 3ª componente aislada reconstruida mediante el programa RECONST.

Estas primeras componentes extraídas pueden representarse de forma aislada o bien de forma conjunta sumando las demás componentes reconstruidas, de forma que se maximice la contribución a la varianza total de los datos.



## **ANEXO III. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SISTEMA PLAYA-DUNA DE VALDEVAQUEROS**

En este Anexo se muestran las hojas granulométricas extraídas para cada una de las siguientes muestras del perfil transversal más activo (perfil 1) del sistema playa-duna de Valdevaqueros (se han seleccionado aquellas zonas susceptibles de experimentar transporte eólico):

- Playa media o intermareal (Fig. A-III.1)
- Playa alta o supramareal (Fig. A-III.2)
- Pie de duna (Fig. A-III.3)
- Cara de barlovento (Fig. A-III.4)
- Cresta dunar (Fig. A-III.5)
- Cara de sotavento (Fig. A-III.6)
- Muestra compuesta de todo el perfil dunar (Fig. A-III.7)

Estas zonas pueden identificarse en el esquema del perfil transversal de la Fig. 4.4.

El análisis granulométrico se ha realizado mediante tamizada, utilizando las siguientes luces de malla: 1,0 - 0,71 - 0,5 - 0,35 - 0,25 - 0,18 - 0,125 y 0,075 mm.

En cada hoja, además de las distribuciones granulométricas y de una imagen a escala tomada con microscopio, se muestran los siguientes parámetros estadísticos a partir de los valores obtenidos de cada tamiz: media, desviación estándar, clasificación (*sorting*), asimetría (*skewness*), achatamiento (*kurtosis*), moda, percentiles, etc. En las observaciones pueden consultarse anotaciones acerca de las características de cada muestra.



TÍTULO: VALDEVAQUEROS (Fecha toma de muestra: Septiembre 2008)				Coordenadas UTM ED 50		X: 257279,607 Y: 3994907,732		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MUESTRA:	PLAYA MEDIA	Marzo 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor
Peso inicial muestra	150,00	gr.		2	0,00	0,00	100,00	D50 (mm)	0,36	Φ50	1,49
				1	0,10	0,10	99,90	D84 (mm)	0,47	Φ84	1,09
>2 mm	0,00	gr.	0	0,00	0,00	0,00	100,00	D16 (mm)	0,25	Φ16	2,00
2-1	0,15	gr.	0,15	0,10	8,73	9,59	90,41	D95 (mm)	0,60	Φ95	0,74
1-0,71	1,13	gr.	1,13	0,75	0,35	42,21	51,80	D5 (mm)	0,19	Φ5	2,40
0,71-0,5	13,10	gr.	13,1	8,73	0,25	31,11	82,91	D75 (mm)	0,43	Φ75	1,22
0,5-0,355	63,32	gr.	63,32	42,21	0,18	14,47	97,39	D25 (mm)	0,27	Φ25	1,89
0,355-0,250	46,67	gr.	46,67	31,11	0,125	2,55	99,93	Moda (mm)	0,355	M(Φ)	1,53
0,250-0,180	21,71	gr.	21,71	14,47	0,075	0,04	99,97	% Gruesos	0,00	θΦ (sorting)	0,50
0,180-0,125	3,82	gr.	3,82	2,55	0	0,03	100,00	% Arenas	99,97	αΦ (skewness)	-0,17
0,125-0,075	0,06	gr.	0,06	0,04				% Finos	0,03	KΦ (kurtosis)	1,01
<0,075 mm	0,04	gr.	0,04	0,03							
Peso final muestra	150,00	gr.	150,00	100,00							
<b>% FIABILIDAD</b>		<b>100,00</b>									



**Observaciones:** Arena con distribución granulométrica moderadamente bien clasificada, desplazada hacia los gruesos y mesocúrtica. De color dorado.

Imagen microscopio:

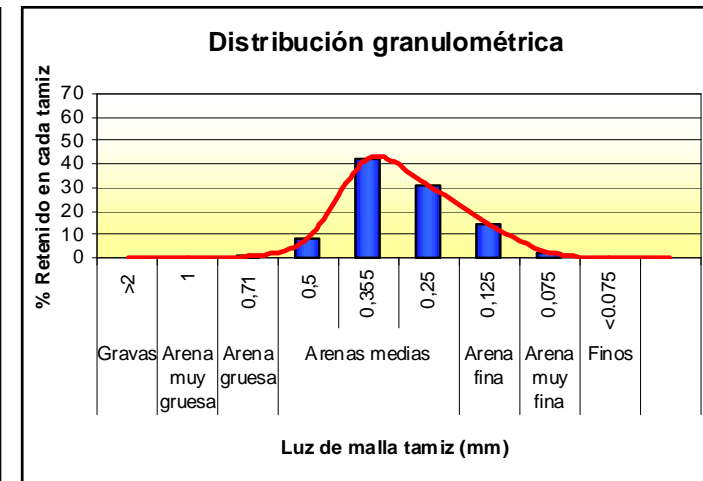
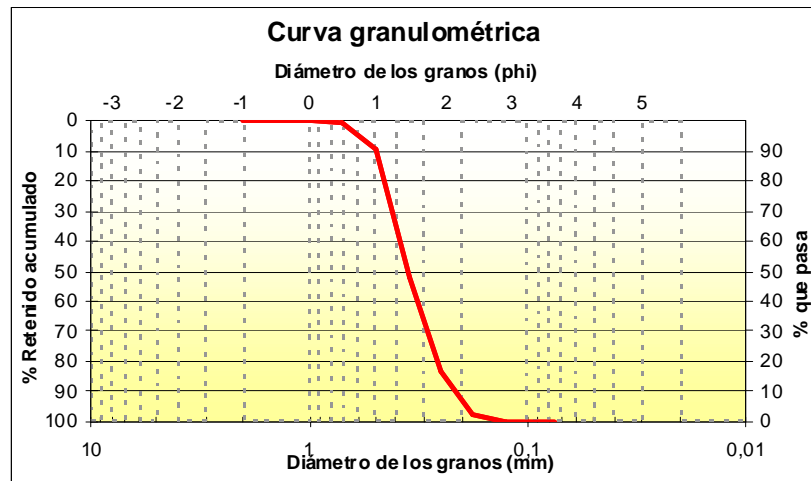



Fig. A-III.1. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Playa Media o Intermareal

TÍTULO: VALDEVAQUEROS (Fecha toma de muestra: Septiembre 2008)				Coordenadas UTM ED50		X: 257276,530 Y: 3994912,570		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MUESTRA:	PLAYA ALTA	Marzo 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor
Peso inicial muestra	150,00	gr.		2	0,00	0,00	100,00	D50 (mm)	0,33	Φ50	1,59
				1	0,07	0,07	99,93	D84 (mm)	0,46	Φ84	1,12
>2 mm	0,00	gr.	0	0,00	0,00	100,00					
2-1	0,10	gr.	0,1	0,07	0,31	0,37	99,63	D16 (mm)	0,23	Φ16	2,12
1--0,71	0,46	gr.	0,46	0,31	0,5	6,24	93,39	D95 (mm)	0,55	Φ95	0,86
0,71--0,5	9,36	gr.	9,36	6,24	0,35	36,81	43,43	D5 (mm)	0,19	Φ5	2,40
0,5--0,355	55,22	gr.	55,22	36,81	0,25	35,05	78,48	D75 (mm)	0,41	Φ75	1,29
0,355--0,250	52,58	gr.	52,58	35,05	0,18	17,93	96,41	D25 (mm)	0,27	Φ25	1,89
0,250--0,180	26,90	gr.	26,9	17,93	0,125	3,54	99,95	Moda (mm)	0,355	M(Φ)	1,61
0,180--0,125	5,31	gr.	5,31	3,54	0,075	0,05	100,00	% Gruesos	0,00	θΦ (sorting)	0,51
0,125--0,075	0,07	gr.	0,07	0,05	0	0,00	100,00	% Arenas	100,00	αΦ (skewness)	-0,08
<0,075 mm	0,00	gr.	0	0,00				% Finos	0,00	KΦ (kurtosis)	1,04
Peso final muestra	150,00	gr.	150,00	100,00							

<b>% FIABILIDAD</b>	<b>100,00</b>
---------------------	---------------



**Imagen microscopio:**

**Observaciones:** Arena con distribución granulométrica moderadamente bien clasificada, simétrica y mesocúrtica. De color dorado.

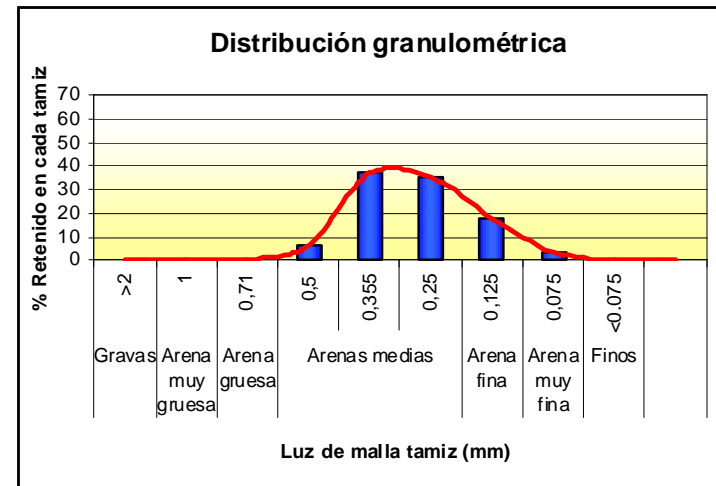
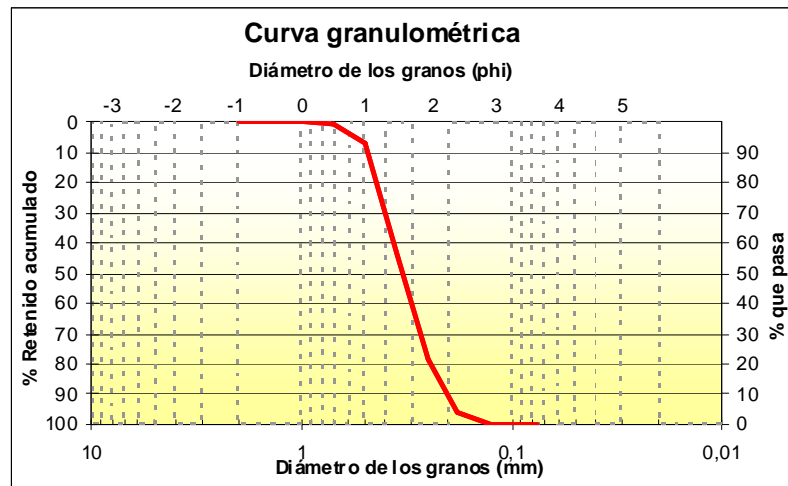



Fig. A-III.2 .Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Playa Alta o Supramareal

TÍTULO: VALDEVAQUEROS (Fecha toma de muestra: Septiembre 2008)				Coordenadas UTM ED50		X: 257254,316 Y: 3994931,492		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO								
MUESTRA:	PIE DUNA	Marzo 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor					
Peso inicial muestra	150,00	gr.	Peso (gr)	% Peso	2	0,00	0,00	100,00	<b>D50 (mm)</b>	<b>0,33</b>	$\Phi_{50}$	1,59				
>2 mm	0,00	gr.	0	0,00	1	0,14	0,14	99,86	D84 (mm)	0,52	$\Phi_{84}$	0,94				
2-1	0,21	gr.	0,21	0,14	0,71	1,87	2,01	97,99	D16 (mm)	0,21	$\Phi_{16}$	2,25				
1--0,71	2,81	gr.	2,81	1,87	0,5	15,82	17,83	82,17	D95 (mm)	0,67	$\Phi_{95}$	0,58				
0,71-0,5	23,73	gr.	23,73	15,82	0,35	27,33	45,17	54,83	D5 (mm)	0,18	$\Phi_5$	2,47				
0,5-0,355	41,00	gr.	41	27,33	0,25	28,21	73,38	26,62	D75 (mm)	0,46	$\Phi_{75}$	1,12				
0,355-0,250	42,32	gr.	42,32	28,21	0,18	22,86	96,24	3,76	D25 (mm)	0,24	$\Phi_{25}$	2,06				
0,250-0,180	34,29	gr.	34,29	22,86	0,075	0,03	99,95	0,05	Moda (mm)	0,250	M( $\Phi$ )	1,59				
0,180-0,125	5,57	gr.	5,57	3,71	0	0,02	100,00	0,00	% Gruesos	0,00	$\theta\Phi$ (sorting)	0,64				
0,125-0,075	0,04	gr.	0,04	0,03									% Arenas	99,98	$\alpha\Phi$ (skewness)	0,10
<0,075 mm	0,03	gr.	0,03	0,02									% Finos	0,02	$\kappa\Phi$ (kurtosis)	0,83
<b>Peso final muestra</b>	150,00	gr.	150,00	100,00												

**% FIABILIDAD** 100,00

Imagen microscopio:

**Observaciones:** Arena con distribución granulométrica moderadamente bien clasificada, simétrica y platocúrtica. De color dorado.

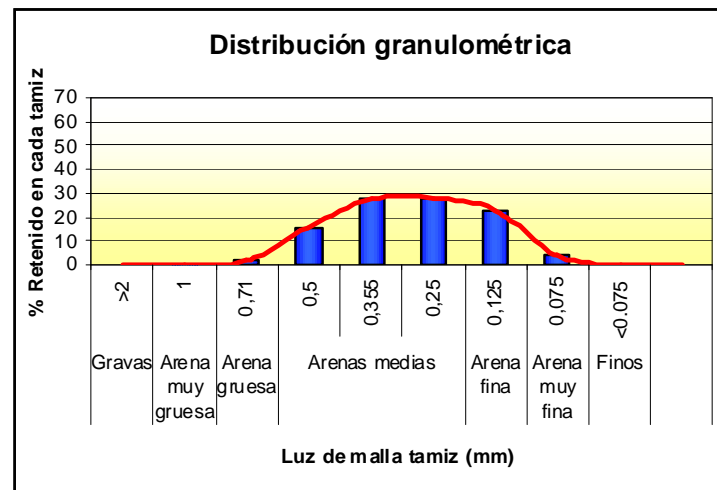
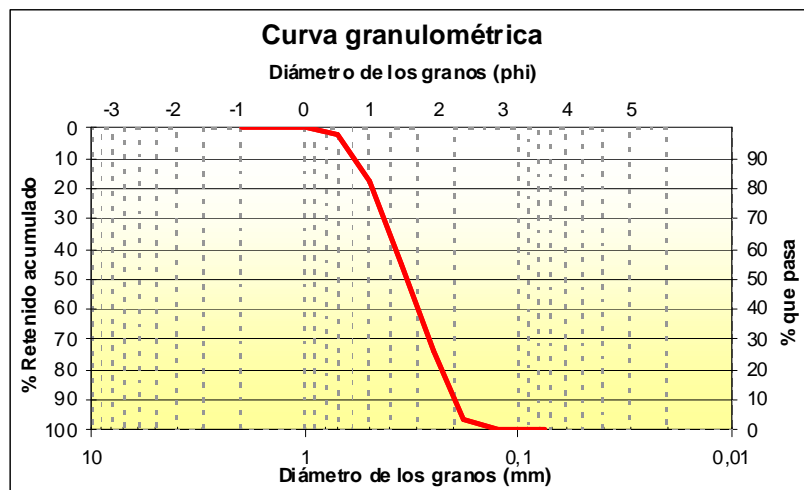


Fig. A-III.3. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Pie de Duna

TÍTULO: VALDEVAQUEROS (Fecha toma de muestra: Septiembre 2008)				Coordenadas UTM ED50		X: 257181,866 Y: 3995046,431		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MUESTRA:	BARLOVENTO	Marzo 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor
Peso inicial muestra	150,00	gr.		2	0,00	0,00	100,00	D50 (mm)	0,30	Φ <sub>50</sub>	1,76
>2 mm	0,00	gr.	0	1	0,01	0,01	99,99	D <sub>84</sub> (mm)	0,41	Φ <sub>84</sub>	1,29
2-1	0,02	gr.	0,02	0,71	0,23	0,24	99,76	D <sub>16</sub> (mm)	0,21	Φ <sub>16</sub>	2,25
1--0,71	0,34	gr.	0,34	0,5	3,27	3,51	96,49	D <sub>95</sub> (mm)	0,48	Φ <sub>95</sub>	1,06
0,71--0,5	4,90	gr.	4,9	0,35	23,00	26,51	73,49	D <sub>5</sub> (mm)	0,18	Φ <sub>5</sub>	2,47
0,5--0,355	34,50	gr.	34,5	0,25	43,67	70,18	29,82	D <sub>75</sub> (mm)	0,36	Φ <sub>75</sub>	1,47
0,355--0,250	65,51	gr.	65,51	0,18	26,34	96,52	3,48	D <sub>25</sub> (mm)	0,24	Φ <sub>25</sub>	2,06
0,250--0,180	39,51	gr.	39,51	0,125	3,44	99,96	0,04	Moda (mm)	0,250	M(Φ)	1,76
0,180--0,125	5,16	gr.	5,16	0,075	0,03	99,99	0,01	% Gruesos	0,00	θΦ (sorting)	0,48
0,125--0,075	0,05	gr.	0,05	0	0,01	100,00	0,00	% Arenas	99,99	αΦ (skewness)	-0,03
<0,075 mm	0,01	gr.	0,01					% Finos	0,01	KΦ (kurtosis)	0,99
Peso final muestra	150,00	gr.	150,00								

% FIABILIDAD 100,00

Imagen microscopio:



**Observaciones:** Arena con distribución granulométrica bien clasificada, simétrica y mesocúrtica. De color dorado.

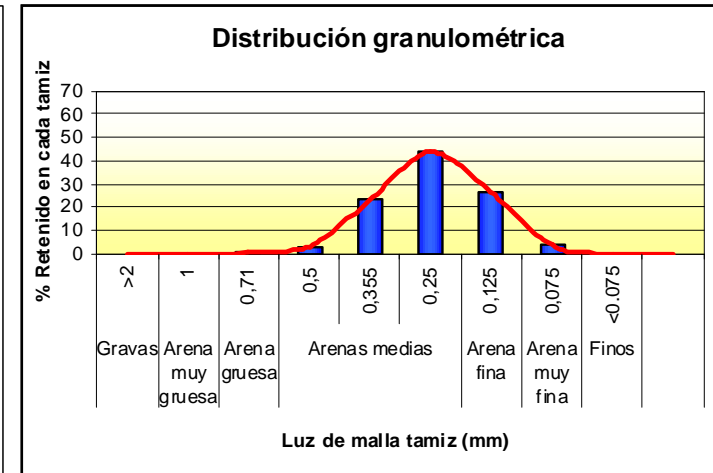
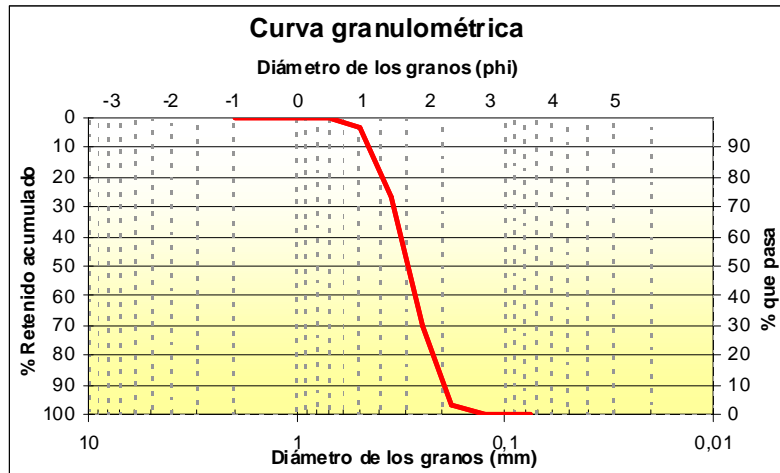


Fig. A-III.4. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Barlovento

TÍTULO: VALDEVAQUEROS (Fecha toma de muestra: Septiembre 2008)				Coordenadas UTM ED50		X: 257112,550 Y: 3995164,497		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
MUESTRA:	CRESTA	Marzo 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor	
Peso inicial muestra	150,00	gr.	Peso (gr)	% Peso	2	0,00	0,00	100,00	D50 (mm)	0,28	Φ50	1,86
>2 mm	0,00	gr.	0	0,00	1	0,01	0,01	99,99	D84 (mm)	0,36	Φ84	1,47
2-1	0,02	gr.	0,02	0,01	0,71	0,02	0,03	99,97	D16 (mm)	0,20	Φ16	2,32
1--0,71	0,03	gr.	0,03	0,02	0,5	0,79	0,82	99,18	D95 (mm)	0,46	Φ95	1,12
0,71-0,5	1,18	gr.	1,18	0,79	0,35	16,00	16,82	83,18	D5 (mm)	0,18	Φ5	2,47
0,5-0,355	24,00	gr.	24	16,00	0,25	44,82	61,64	38,36	D75 (mm)	0,33	Φ75	1,60
0,355-0,250	67,23	gr.	67,23	44,82	0,18	33,84	95,48	4,52	D25 (mm)	0,22	Φ25	2,18
0,250-0,180	50,76	gr.	50,76	33,84	0,125	4,44	99,92	0,08	Moda (mm)	0,250	M(Φ)	1,88
0,180-0,125	6,66	gr.	6,66	4,44	0,075	0,07	99,99	0,01	% Gruesos	0,00	θΦ (sorting)	0,44
0,125-0,075	0,11	gr.	0,11	0,07	0	0,01	100,00	0,00	% Arenas	99,99	αΦ (skewness)	0,05
<0,075 mm	0,01	gr.	0,01	0,01					% Finos	0,01	κΦ (kurtosis)	0,95
<b>Peso final muestra</b>	<b>150,00</b>	gr.	<b>150,00</b>	<b>100,00</b>								

% FIABILIDAD 100,00

Imagen microscopio:



**Observaciones:** Arena con distribución granulométrica bien clasificada, simétrica y mesocúrtica. De color dorado.

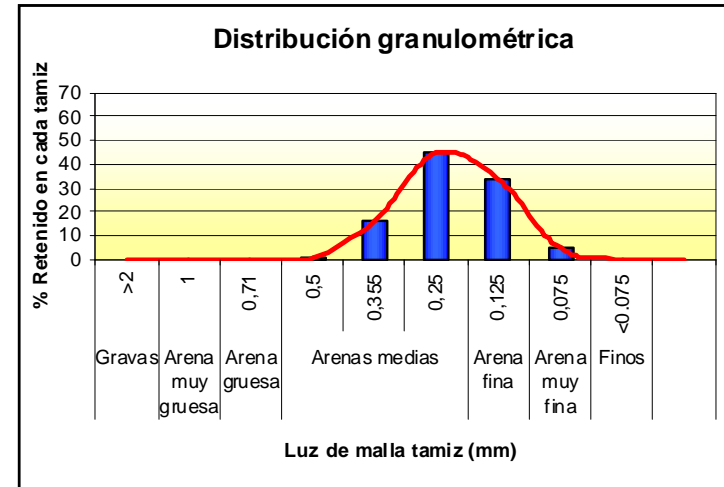
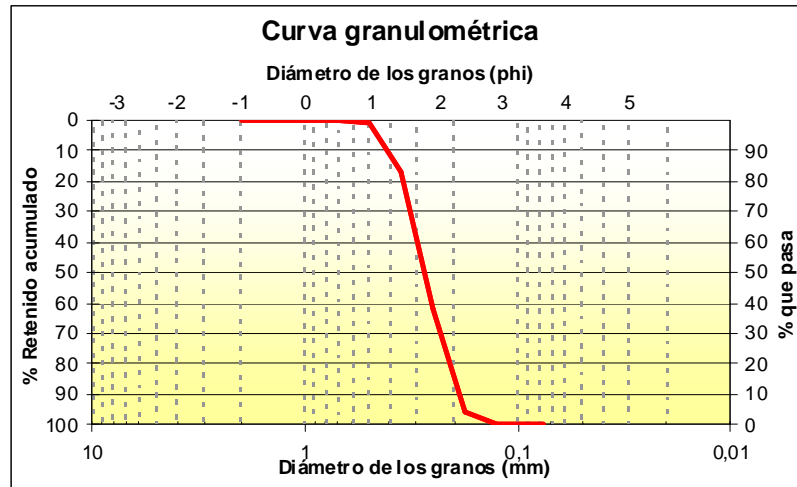


Fig. A-III.5. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de la Cresta

TÍTULO: VALDEVAQUEROS (Fecha toma de muestra: Septiembre 2008)				Coordenadas UTM ED50		X: 257112,550 Y: 3995164,497		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MUESTRA:	SOTAVENTO	Marzo 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor
Peso inicial muestra	150,00	gr.		2	0,00	0,00	100,00	D50 (mm)	0,33	$\Phi_{50}$	1,59
				1	0,05	0,05	99,95	D84 (mm)	0,50	$\Phi_{84}$	1,00
>2 mm	0,00	gr.	0	0,00	1,38	1,43	98,57	D16 (mm)	0,12	$\Phi_{16}$	3,06
2-1	0,07	gr.	0,07	0,05	0,5	13,82	84,75	D95 (mm)	0,65	$\Phi_{95}$	0,62
1--0,71	2,07	gr.	2,07	1,38	0,35	29,51	55,25	D5 (mm)	0,18	$\Phi_5$	2,47
0,71-0,5	20,73	gr.	20,73	13,82	0,25	31,07	24,18	D75 (mm)	0,45	$\Phi_{75}$	1,15
0,5--0,355	44,26	gr.	44,26	29,51	0,18	21,33	2,85	D25 (mm)	0,26	$\Phi_{25}$	1,94
0,355-0,250	46,60	gr.	46,6	31,07	0,125	2,79	0,06	Moda (mm)	0,250	M( $\Phi$ )	1,88
0,250-0,180	32,00	gr.	32	29,99	0,075	0,05	0,01	% Gruesos	0,00	$\theta\Phi$ (sorting)	0,82
0,180-0,125	4,18	gr.	4,18	99,99	0	0,01	0,01	% Arenas	99,99	$\alpha\Phi$ (skewness)	-0,84
0,125-0,075	0,07	gr.	0,07					% Finos	0,01	K $\Phi$ (kurtosis)	0,96
<0,075 mm	0,01	gr.	0,01								
Peso final muestra	149,99	gr.	149,99	99,99							

% FIABILIDAD 99,99

Imagen microscopio:



Observaciones: Arena con distribución granulométrica moderadamente clasificada, desplazada hacia los gruesos y mesocúrtica. De color dorado.

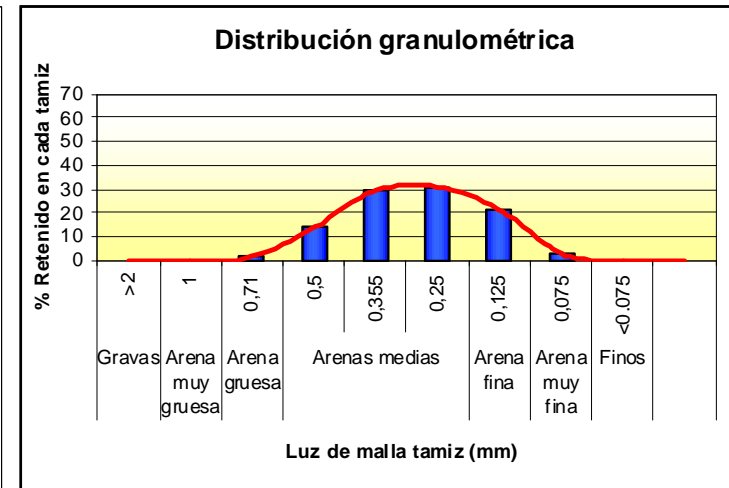
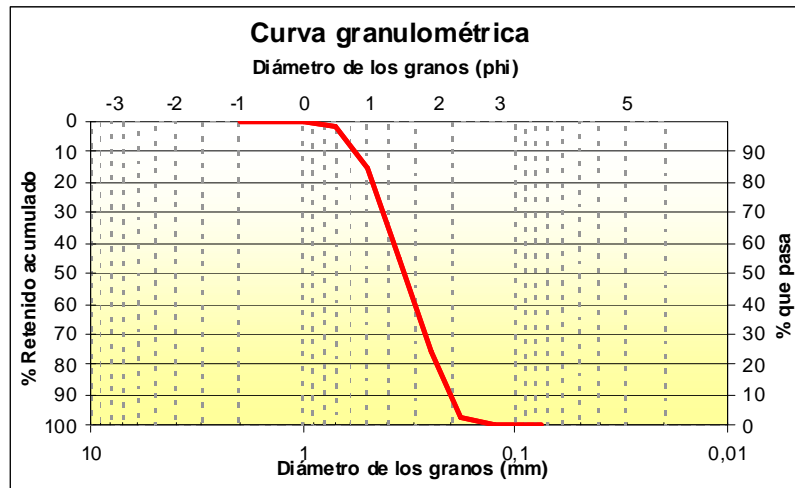


Fig. A-III.6. Resultados del análisis granulométrico para la muestra de Sotavento

TÍTULO: VALDEVAQUEROS (Fecha toma de muestra: Septiembre 2008)				Coordenadas UTM ED50		X: Y:		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MUESTRA:	MUESTRA COMPUESTA	Marzo 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor
Peso inicial muestra	150,00	gr.		2	0,00	0,00	100,00	D50 (mm)	0,31	Φ50	1,67
>2 mm	0,00	gr.	0	1	0,06	0,06	99,94	D84 (mm)	0,47	Φ84	1,09
2-1	0,08	gr.	0,08	0,71	0,67	0,73	99,27	D16 (mm)	0,21	Φ16	2,25
1--0,71	1,01	gr.	1,01	0,5	7,68	8,41	91,59	D95 (mm)	0,59	Φ95	0,76
0,71-0,5	11,52	gr.	11,52	0,35	29,00	37,41	62,59	D5 (mm)	0,18	Φ5	2,47
0,5-0,355	43,50	gr.	43,50	0,25	34,97	72,38	27,62	D75 (mm)	0,40	Φ75	1,32
0,355-0,250	52,46	gr.	52,46	0,18	23,63	96,02	3,98	D25 (mm)	0,24	Φ25	2,06
0,250-0,180	35,45	gr.	35,45	0,125	3,92	99,94	0,06	Moda (mm)	0,250	M(Φ)	1,67
0,180-0,125	5,89	gr.	5,89	0,075	0,05	99,99	0,01	% Gruesos	0,00	θΦ (sorting)	0,58
0,125-0,075	0,07	gr.	0,07	0	0,02	100,00	0,00	% Arenas	99,99	αΦ (skewness)	0,09
<0,075 mm	0,02	gr.	0,02					% Finos	0,02	KΦ (kurtosis)	0,95
Peso final muestra	150,01	gr.	150,01								

% FIABILIDAD	100,00
--------------	--------

**Observaciones:** Arena con distribución granulométrica moderadamente bien clasificada, simétrica y mesocúrtica. De color dorado.

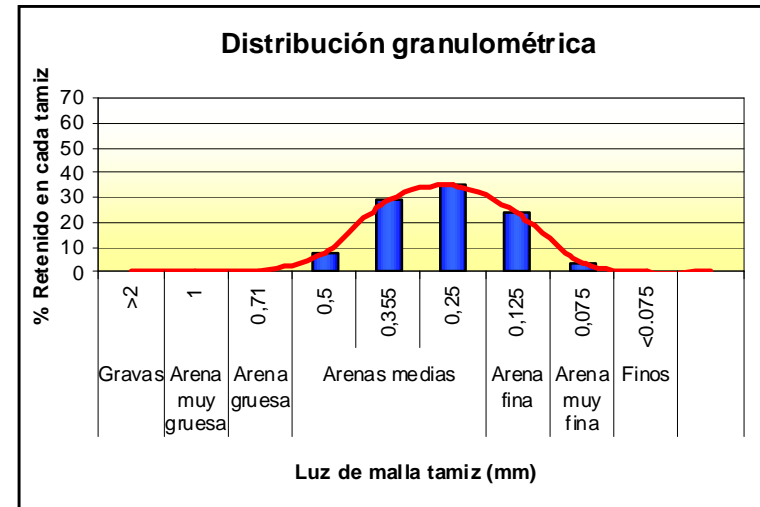
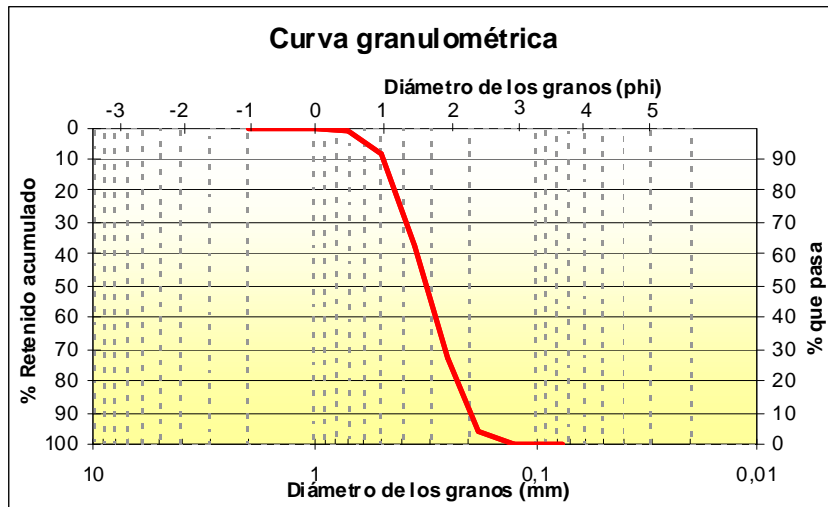


Fig. A-III.7. Resultados del análisis granulométrico para la Muestra Compuesta del perfil

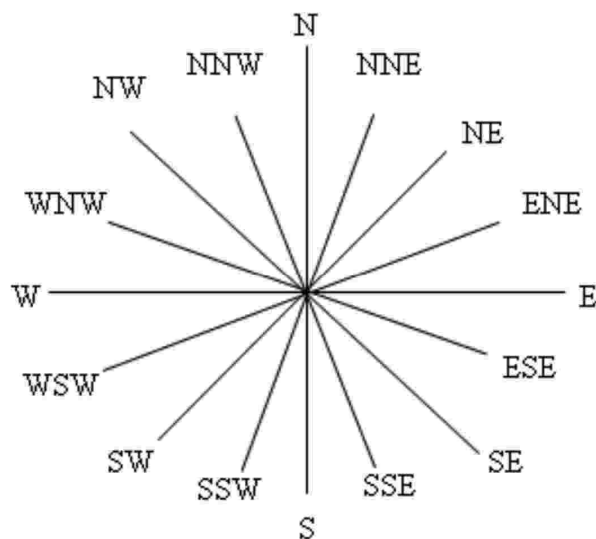


## ANEXO IV. DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO DEL TRANSPORTE EÓLICO POTENCIAL DE SEDIMENTOS: EL MÉTODO DE FRYBERGER

La base del cálculo del potencial eólico (DP) y potencial eólico resultante (RDP) se ha llevado a cabo según el método de Fryberger (1979).

En primer lugar, se parte de datos de viento horarios, tanto de dirección como de velocidad. Para el tratamiento de grandes cantidades de datos, como en este caso, normalmente se utiliza el programa Matlab, así como para dibujar la rosa de transporte eólico de arena. Los datos han de venir en formato excel previamente preparado con Matlab.

En general, se suelen tomar las medias durante un largo plazo de tiempo (varios años). A partir de estos datos, se extrae la velocidad y frecuencia de aparición para cada dirección de viento. Para ello se tienen en cuenta todas las posibles procedencias de los vientos incidentes, tal como figura en la rosa de los vientos (Fig. A-IV.1).



*Fig. A-IV.1. Rosa de los vientos*



La velocidad ( $u$ ) viene dada en nudos (1 nudo = 0.5148 m/s = 1.852 km/h) y la dirección en grados sexagesimales. La idea se basa en que la tasa de transporte eólica sedimentaria (y la fuerza del viento) son proporcionales al cubo de la velocidad de fricción del viento ( $u_*$ ). Se considera que la velocidad umbral del viento ( $u_t$ ) a partir de la cual se produce el inicio del movimiento es de aproximadamente 12 nudos, es decir, de 22,24 km/h. Por lo tanto, interesa asociar un determinado peso a cada dirección del viento y reflejar así este comportamiento a través de una rosa de transporte eólico de arena.

A la hora de procesar todos los datos de viento, se parte de direcciones definidas en intervalos de  $\pm 22,5^\circ$ , es decir, la dirección N vendría dada por los vientos comprendidos entre  $358,75^\circ$  y  $11,25^\circ$ . En Tabla A-IV.1 se muestra la clasificación de las direcciones por rangos de grados.

Tabla A-IV.1. Clasificación de las principales direcciones de viento

Dirección	Intervalo (grados)
N	$348,75^\circ$ - $11,25^\circ$
NNE	$11,25^\circ$ - $33,75^\circ$
NE	$33,75^\circ$ - $56,25^\circ$
ENE	$56,25^\circ$ - $78,75^\circ$
E	$78,75^\circ$ - $101,25^\circ$
ESE	$101,25^\circ$ - $123,75^\circ$
SE	$123,75^\circ$ - $146,25^\circ$
SSE	$146,25^\circ$ - $168,75^\circ$
S	$168,75^\circ$ - $191,25^\circ$
SSW	$191,25^\circ$ - $213,75^\circ$
SW	$213,75^\circ$ - $236,25^\circ$
WSW	$236,25^\circ$ - $258,75^\circ$
W	$258,75^\circ$ - $281,25^\circ$
WNW	$281,25^\circ$ - $303,75^\circ$
NW	$303,75^\circ$ - $326,25^\circ$
NNW	$326,25^\circ$ - $348,75^\circ$

Para preparar los datos, se construye una tabla que refleje el porcentaje de aparición de vientos (con una dirección determinada) cuyas velocidades estén contenidas en intervalos de 4 nudos. A modo de ejemplo, en la Tabla A-IV.2 se muestran 6 direcciones, faltando el resto hasta llegar a las 16 direcciones).

Tabla A-IV.2. Porcentajes de aparición de cada intervalo de velocidad para 6 direcciones de viento

Intervalo Velocidad (nudos)	Velocidad media (nudos)	SWS <sub>t</sub>	SW <sub>t</sub>	WSW <sub>t</sub>	W <sub>t</sub>	WNW <sub>t</sub>	NW <sub>t</sub>
11-16	13,5	0,1	1,3	0,9	9,4	1,1	1,9
17-21	19	0,1	1,1	0,7	6,2	0,4	0,8
22-27	24,5	0,1	1,1	0,4	3,5	0,2	0,5
28-33	30,5	0,04	0,6	0,2	0,9	0,04	0,2
34-40	37	0,03	0,2	0,1	0,3	0,03	0,04
41-47	44	0	0,1	0,04	0,1	0	0,03
48-55	51,5	0,01	0,04	0	0,04	0,01	0
>56	56	0,009	0,03	0	0,03	0	0,01

De este modo, por ejemplo, para un viento que sople del N (es decir, 360°) se extraen las velocidades medias ( $u$ ) para cada intervalo (Tabla A-IV.3) y se realizan los cálculos para la obtención del potencial de transporte eólico, teniendo en cuenta que la velocidad umbral ( $u_t$ ) es de 12 nudos.

Tabla A-IV.3. Ejemplo de extracción de las velocidades medias y del factor de peso para el viento de dirección N

Intervalos Velocidad (nudos)	Velocidad media (nudos)	$u^2$	$(u-u_t)$	$u^2 (u-u_t)/100$
11 - 16	13.5	182,3	1,5	2,7
17 - 21	19	361	7	25,3
22 - 27	24.5	600,3	12,5	75
28 - 33	30.5	930,3	18,5	172,1
34 - 40	37	1.369,0	25	342,3

Se divide  $u^2 (u-u_t)$  por 100 para evitar que salgan números muy elevados. Los factores de peso normalizados de la tabla representan tasas de transporte de arena.

Entonces:

$$q = u^2 (u-u_t) \cdot t$$

$$q_{total} = \sum u^2 (u-u_t) \cdot t$$

Donde  $q$  es la tasa anual de transporte potencial de arena y  $t$  es el porcentaje de ocurrencia del viento, que es el lapso de tiempo durante el cual sopla un determinado viento, expresado como porcentaje para todo el año.

El total de unidades de vector para esta dirección de viento (N) viene representado por el potencial de transporte eólico (*Drift potential*) de los vientos procedentes, en este caso, del Norte (Tabla A-IV.4). Siguiendo esta metodología se realizan los mismos cálculos para las demás direcciones (se pueden analizar 8 direcciones, a pesar de que es preferible las 16, tal como vemos en la Fig. A-IV.1).

Tabla A-IV.4. Ejemplo de extracción del factor de peso, el porcentaje de recurrencia y las unidades vector para el viento procedente del N

$u^2 (u-u_t)/100$ (factor de peso normalizado)	$t$ (en %)	Unidades vector
2.7	1,3	3,5
25.3	0,3	7,6
75.0	0,1	7,5
172.1	0	0
342.3	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>1,70</b>	<b>18,6</b>

De este modo, teniendo en cuenta los porcentajes totales de recurrencia y unidades vector para cada viento, se extraerá el Potencial de transporte así como la dirección de transporte resultante.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



- Aagaard, T., Davidson-Arnott, R., Greenwood, B. y Nielsen, J., 2004. Sediment supply from shoreface to dunes: Linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. *Geomorphology* 60, 205-224.
- Achab, M., Moral Cardona, J.P y Gutiérrez Mas, J.M., 2005. Analysis of the quartz grains surface features present in the Cadiz Bay sediments (SW of Spain). IOC Workshop Report No. 197, 52-55.
- Al-Awadhi, J.M., Al-Helal, A. y Al-Enezi, A., 2005. Sand drift potential in the desert of Kuwait. *Journal of Arid Environments*, Volume 63, Issue 2, Pages 425-438.
- Alcántara-Carrió, J. y Alonso, I., 2001. Aeolian sediment availability in coastal areas defined from sedimentary parameters. Application to a case study in Fuerteventura. *Scientia Marina* 65(IS), 7-20.
- Alcántara-Carrió, J., Fernández-Bastero, S. y Alonso, I., 2010. Source area determination of aeolian sediments at Jandia Isthmus (Fuerteventura, Canary Islands). *Journal of Marine Systems* 80, 219-234.
- Anfuso, G., Domínguez, L. y Gracia, F.J., 2007. Short and medium-term evolution of a coastal sector in Cadiz, SW Spain. *Catena* 70(2), 229-242.
- Anthony, E.J., Vanhée, S. y Ruz, M. H., 2007. Embryo dune development on a large, actively accreting macrotidal beach: Calais, North Sea coast of France. *Earth Surface Processes and Landforms* 32(4), 631-636.
- Arens, B., Geelen, L., Slings, R. y Wondergem, H., 2005. Restoration of dune mobility in the Netherlands. *Landschap* 4, 191-202.
- Arens, S.M., 1996. Patterns of sand transport on vegetated foredunes. *Geomorphology* 17, 339-350.
- Arens, S. M., Slings, Q. y de Vries, C.N., 2004. Mobility of a remobilised parabolic dune in Kennemerland, The Netherlands. *Geomorphology* 59, I. 1-4, 175-188.
- Ash, J.E. y Wasson, R.J., 1983. Vegetation and sand mobility in the Australian desert dunefield, *Zeitschrift fur Geomorphologie* 45, 7-25.
- Aubrey, D.G., 1978. Statistical and dynamic prediction of changes in natural sand beaches. PhD thesis, Univ. of California, Sand Diego, 193 pp.
- Aubrey, D.G., 1979. Seasonal Patterns of Onshore/Offshore Sediment Movement. *Journal of Geophysical Research* 84(10), 6347-6354.
- Avis, A.M., 1989. A review of coastal dune stabilization in the Cape Province of South Africa *Landscape and Urban Planning*, vol. 18, I.1, 55-68.

- Bagnold, R.A., 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Chapman Hall, London, 265 pp.
- Bagnold, R.A., 1954. The Physical Aspects of Dry Deserts. In: J.C. Cloudsley-Thompson, Editor, *Biology of Deserts*. Inst. of Biology, London (1954), 7–12.
- Bailey, S.D. y Bristow, C.S., 2004. Migration of parabolic dunes at Aberffraw, Anglesey, North Wales. *Geomorphology* 59, 165-174.
- Balduzzi, I., Bozzano, A., Corradi, N., Mariotti, L.M. y Vagge, I., 2006. The evolution of the dune fields of Platamona-Marritza (northern Sardinia): Application of remote-sensing methods. *Chemistry and Ecology* 22 (SUPPL. 1), S371-S381.
- Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C., Cunha, T. y Dias, J., 2008. Monitoring Sandy Shores Morphologies by DGPS. A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*: Vol. 24, No. 6, 1516-1528.
- Barragán Muñoz, J.M., 2003. *Medio Ambiente y Desarrollo en Áreas Litorales. Introducción a la planificación y Gestión Integradas*. Servicio de Publicaciones Universidad de Cádiz.
- Bate, G. y Ferguson, M., 1996. Blowouts in coastal foredunes. *Landscape and Urban Planning* 34, Issues 3-4, 215-224.
- Belly, P.Y., 1964. Sand movement by wind. United States Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Centre, *Technical Memorandum*, I, 38 pp.
- Brock, J.C. y Purkis, S.J., 2009. The emerging role of lidar remote sensing in coastal research and resource management. *Journal of Coastal Research* SI 53, 1-5.
- Brown, D.G. y Arbogast, A.F., 1999. Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65, 467-474.
- Buynevich, I., Bitinas, A. y Pupienis D., 2007. Reactivation of Coastal Dunes Documented by Subsurface Imaging of the Great Dune Ridge, Lithuania. *Proceedings of the ICS 2007 Journal of Coastal Research* SI (50), 226-230.
- Carter, R.W.G., 1990. *Coastal environments: An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. 5th edn. London: Academic Press ltd, 617 pp.
- Chase, B.M. y Thomas, D.S.G., 2006. Late Quaternary dune accumulation along the western margin of South Africa: distinguishing forcing mechanisms through the analysis of migratory dune forms. *Earth and Planetary Science Letters* 251 (3-4), 318-333.

- Chepil, W.S., 1945. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Science* 60, 305-320.
- Chepil, W.S., Siddoway, F.H. y Armbrust, D.V., 1963. Climatic Index of Wind Erosion Conditions in the Great Plains. *Journal of Soil Water Society of America*, 27(4), 449-452.
- Clemmensen, L.B. y Murray, A., 2006. The termination of the last major phase of aeolian sand movement, coastal dunefields, Denmark. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 795–808.
- Clemmensen, L.B., Murray, A., Heinemeier, J. y de Jong, R., 2009. The evolution of Holocene coastal dunefields, Jutland, Denmark: A record of climate change over the past 5000 years. *Geomorphology* 105 (3-4), 303-313.
- Coastal Engineering Manual, 2002. Part III. Chapter 4. Wind-Blown Sediment Transport, 1-79 (<http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>).
- Cooper, J.A.G. y McLaughlin, S., 1998. Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *J. of Coastal Research*, 14(2), 512-524.
- Daultrey, S., 1976. Principal Component Analysis. Inst. Br. Geogr, London.
- De Castro, F., 1995. Computer simulation of the dynamics of a dune system. *Ecological Modelling* 78, 205-217.
- Del Río, L., 2007. Riesgos de eroción costera en el litoral atlántico gaditano. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz, 496 pp.
- Del Río, L. y Gracia, F.J., 2007. Análisis de la vulnerabilidad de los acantilados atlánticos de la provincia de Cádiz ante la erosión costera. *Revista C&G* 21(1-2), 87-101.
- Del Valle, H.F., Rostagno, C.M., Coronato, F.R., Bouza, P.J. y Blanco, P.D., 2008. Sand dune activity in north-eastern Patagonia. *Journal of Arid Environments* 72 (4), 411-422.
- Dick, J.E., y Dalrymple, R.A., 1984. Short and long term beach changes at Bethany Beach, Delaware. Proc. 19th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, Houston, 1650–1667.
- Dukes, J.S y Mooney, H.A., 2004. Disruption of ecosystem processes in western North America by invasive species. *Revista Chilena de Historia Natural* 77, 411-437.
- Fages, L., Gómez-Pina, G., Navarro, M., Román-Sierra, J., Giménez-Cuenca, M., Ruiz, J.A. y Muñoz-Pérez, J.J., 2007. Integrated study of alternatives for Valdevaqueros



- dune area (Tarifa Co., Cadiz, Spain). Proceedings of the International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes. Santander, Spain, 168-171.
- Flather, R.A. y Williams, J.A., 2000. Climate change effects on storm surges: methodologies and results. Climate scenarios for water-related and coastal impact. ECLAT-2 Workshop Report No. 3, KNMI, 66-78. The Netherlands.
- Flor, G., 2004. Geología Marina. Área de Estratigrafía y Sedimentología. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo.
- Fryberger, S.G. 1979. Dune forms and wind regime. In: A study of global sand seas (Ed E.D. McKee), 1052, 137-169. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1052, Washington.
- Gadgil, R.L. y Ede, F.J., 1998. Application of scientific principles to sand dune stabilization in New Zealand: past progress and future needs. Land Degradation and Development, 9(2), 131-142.
- Gallego Fernández, J.B., Muñoz Vallés, S., Dellafiore, C., 2006. Plan de Gestión y Conservación de los hábitats dunares del litoral de Cádiz. Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla.
- García-Mora, M.R., Gallego-Fernández, J.B. y García-Novo, F., 1999. Plant functional types in coastal foredunes in relation to environmental stress and disturbance. Journal of Vegetation Science 10, 27-34.
- García Mora, M.R., Gallego-Fernandez, J.B. y Garcia-Novo, F., 2000. Plant diversity as a suitable tool for coastal dune vulnerability assessment. Journal of Coastal Research 16, 990-995.
- Girardi, J.D. y Davis, D.M., 2010. Parabolic dune reactivation and migration at Napeague, NY, USA: Insights from aerial and GPR imagery. Geomorphology 114 (4), 530-541.
- Goldsmith, V., 1978. Coastal dunes. En: R.A. Davis, Jr. (Ed.). Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag, 171-235.
- Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J.J., Ramírez, J.L. y Ley, C., 2002. Sand dune management problems and techniques. Journal of Coastal Research, Special Issue on Coastal Dunes, 325-332.
- Gómez-Pina, G., Fages, L., Román-Sierra, J., Navarro, M., Giménez-Cuenca, M., Ruiz, J.A. y Muñoz-Pérez, J.J., 2007. An example of Integrated Coastal Management in Punta Candor (Co. Rota, Spain). Conferencia Internacional sobre Restauración y Gestión de las Dunas Costeras, Santander, 2007.

- Grootjans, A.P., Geelen, H.W.T., Jansen, A.J.M. y Lammerts E.J., 2002. Restoration of coastal dune slacks in the Netherlands. *Hydrobiologia* 478, 181-203.
- Gutiérrez Mas, J.M., Martín, A., Domínguez, S. y Moral, J.P., 1991. Introducción a la geología de la provincia de Cádiz. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 315 pp.
- Hack, J.T., 1941. Dunes of the western Navajo Country. *Geographical Review* 31, 240-263.
- Hanson, P.R., Arbogast, A.F., Johnson, W.C., Joeckel, R.M. y Young, A.R., 2010. Megadroughts and late Holocene dune activation at the eastern margin of the Great Plains, north-central Kansas, USA. *Aeolian Research*, 1: 101-110.
- Haxel, J.H. y Holman, R.A. 2004. The sediment response of a dissipative beach to variations in wave climate. *Marine Geology* 206, 73-99.
- Hellström, G.B., 1996. Preliminary investigations into recent changes of the Goukamma Nature Reserve frontal dune system, South Africa - with management implications.
- Herrmann, H.J., Sauermann, G. y Schwämmle, V., 2005. The morphology of dunes. *Physica A* 358, 30-38.
- Hertling, U.M. y Lubke, R.A., 1999. Use of *Ammophila arenaria* for Dune Stabilization in South Africa and Its Current Distribution—Perceptions and Problems. *Environmental Management* 24, No. 4, 467–482.
- Hesse, R., 2009. Using remote sensing to quantify aeolian transport and estimate the age of the terminal dune field Dunas Pampa Blanca in southern Peru. *Quaternary Research* 71(3), 426-436.
- Hesp, P.A. 1988. Morphology, dynamics and internal stratification of some established foredunes in Southeast Australia. *Sediment Geology* 55, 17-41.
- Hesp, P.A. 1999. The Beach Backshore and Beyond. In: SHORT AD (Ed), *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, Chichester. J Wiley & Sons, NY, p. 145-170.
- Hesp, P.A. y Thom, B.G., 1990. Geomorphology and evolution of active transgressive dunefields. In: K.F. Nordstrom, N.P. Psuty & R.W.G. Carter (Editores), *Coastal Dunes: Form and Process*. Wiley, New York.
- Hesp, P.A., Martínez, M., Miot da Silva, G., Rodríguez-Revelo, N., Gutiérrez, E., Humanes, A., Laínez, D., Montaña, I., Palacios, V., Quesada, A., Storero, L., González, G. y Trochine, C., 2010. Transgressive dunefield landforms and

- vegetation associations, Doña Juana, Veracruz, México. *Earth Surface Processes and Landforms* n/a. doi: 10.1002/esp.2035.
- Honrado, J., Vicente, J., Lomba, A., Alves, P., Macedo, J.A., Henriques, R., Granja, H. y Caldas, F.B., 2010. Fine-scale patterns of vegetation assembly in the monitoring of changes in coastal sand-dune landscapes. *Web Ecology* 10, 1-14.
- Horikawa, K., Hotta, S. y Kraus, N.C., 1986. Literature review of sand transport by wind on a dry sand surface. *Coastal Engineering* 9(6), 503-526.
- Hsu, S.A., 1971. Wind stress criteria in Aeolian sand transport. *Journal of Geophysical Research* 76, 8.684-8.686.
- Hugenholtz, C.H. y Wolfe, S.A., 2005. Recent stabilization of active sand dunes on the Canadian prairies and relation to recent climate variations. *Geomorphology* 68, 131-147.
- Instituto Hidrográfico de la Marina, 2010. *Anuario de Mareas*.
- Jackson, J.E., 1991. *A User's Guide to Principal Components*. John Wiley & Sons, New York.
- Jimenez, J.A., Maia, L.P., Serra, J. y Morais, J., 1999. Aeolian dune migration along the Ceará coast, north-eastern Brazil. *Sedimentology* 46, 689-701.
- Kadib, A.A., 1965. A function of sand movement by wind. *Hydraulic Eng. Lab. Tech. Rep. HEL-2-12*. Berkeley: Univ. California.
- Kasper-Zubillaga, J.J. y Faustinos-Morales, R., 2007. Scanning electron microscopy analysis of quartz grains in desert and coastal dune sands (Altar Desert, NW Mexico). *Ciencias Marinas*, 33(1), 11-22.
- Kawamura, R., 1964. Study of sand movement by wind. *Hydraulic Eng. Lab. Tech. Rep. HEL-2-8*, 99-108. Berkeley: Univ. California.
- Kemal Sönmez, N., Onur, I., Sari, M. y Maktav, D., 2009. Monitoring changes in land cover/use by CORINE methodology using aerial photographs and IKONOS satellite images: A case study for Kemer, Antalya, Turkey. *International J. of Remote Sensing* 30(7), 1771-1778.
- Kocurek, G. y Ewing, R.C., 2005. Aeolian dune field self-organization – implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. *Geomorphology* 72(1-4), 94-105.
- Kutiél, P., Peled, Y. y Geffen, E., 2000. The effect of removing shrub cover on annual plants and small mammals in a coastal sand dune ecosystem. *Biological Conservation* 94, 235-242.

- Lancaster, N., 2005. Sedimentary processes. Aeolian Processes. Encyclopedia of Geology, 612-627.
- Larson, M., Hanson, H., Kraus, N.C. y Newe, J., 1999. Short and long-term responses of beach fills determined by EOF analysis. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 125 (6), 285–293.
- LeBlanc, L.R. y Middleton, F.H. 1980. An underwater acoustic sound velocity data model. Journal of Acoustical Society of America 67, 2055-2062.
- Lemauiel, S., Gallet, S. y Rozé, F., 2003. Sustainable management of fixed dunes: Example of a pilot site in Brittany (France). Comptes Rendus - Biologies 326 (SUPPL. 1), S183-S191.
- Lettau, K. y Lettau, H.H., 1978. Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration. In: Exploring the World's Driest Climate (ed. H.H. Lettau & K. Lettau). University of Wisconsin-Madison, IES report, vol. 101, pp.110-147.
- Levin, N., 2011. Climate-driven changes in tropical cyclone intensity shape dune activity on Earth's largest sand island. Geomorphology 125(1), 239-252.
- Levin, N. y Ben-Dor, E., 2004. Monitoring sand dune stabilization along the coastal dunes of Ashdod-Nizanim, Israel, 1945-1999. Journal of Arid Environments 58, 335-355.
- Levin, N., Kidron, G.J. y Ben-dor, E., 2006. The spatial and temporal variability of sand erosion across a stabilizing coastal dune field. Sedimentology 53, 697–715.
- Levin, N., Kidron, G.J. y Ben-dor, E., 2007. A field quantification of coastal dune perennial plants as indicators of surface stability, erosion or deposition. Sedimentology, 55(4), 751-772.
- Ley, C., Gallego Fernández, J.B. y Vidal Pascual, C., 2007. Manual de restauración de dunas costeras, 2007. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas.
- Long, J.T. y Sharp, R.P., 1964. Barchan dune movement in Imperial Valley, California. Geological Society of America Bulletin 75, 149-156.
- Losada, M.A., Medina, R., Vidal, C. y Roldan, A., 1991. Historical evolution and morphological analysis of “El Puntal” Spit, Santander (Spain). Journal of Coastal Research 7 (3), 711–722.
- Lowe, J.A. y Gregory, J.M., 2005. The effects of climate change on storm surges around the United Kingdom. Philosophical Transactions of the Royal Society A 363, 1313-1328.

- Maia, L.P., Freire, G.S.S. y Lacerda, L.D., 2005. Accelerated dune migration and aeolian transport during El Niño events along the Brazilian coast. *Journal of Coastal Research* 21, 1121-1126.
- Martinez, J., 1994. Cartographic characterization of the littoral camps of dunes. *Coastal Dynamics, Proceedings of the International Conference*, pp.462-475.
- Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., García-Franco, J.G., Moctezuma, C y Jiménez, C.D., 2006. Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of México. *Environmental Conservation*, 33 (2), 109-117.
- Martinho, C.T., Hesp, P.A. y Dillenburg, S.R., 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology* 117, 14–32.
- Masselink, G. y Short, A.D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research* 9, 785-800.
- McKee, E.D., 1979. Introduction to a study of global sand seas. In: *A Study of Global Sand Seas*, McKee ED (ed.). Professional Paper 1052. US Geological Survey, 1-19.
- Medina, R., Losada, M.A., Dalrymple, R.A. y Roldan, A., 1991. Cross-shore sediment transport determined by E.O.F. Method. *Coastal Sediments '91 Proceedings*. ASCE: 2160-2174.
- Medina, R., Losada, M.A., Losada IJ y Vidal, C., 1994. Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. *Marine Geology*, 118: 195-206.
- Miller, J. K. y Dean, R.G., 2007. Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics. *Coastal Engineering* 54, 111–131.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA), 2005. "A.T. para la redacción del proyecto de reordenación del borde litoral de la duna de Valdevaqueros y su entorno; T.M. de Tarifa", (Cádiz). Ref: 11-0550.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), 2008. Estudio de la evolución de la duna de Valdevaqueros (T.M. Tarifa, Cádiz) y propuestas de actuación.

- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), 2010. “Estudio Comparativo de las técnicas blandas en la fijación de sistemas dunares en la provincia de Cádiz”. Demarcación de Costas A-A. Ref: 11-0677.
- Miot da Silva, G. y Hesp, P.A., 2010. Coastline orientation, aeolian sediment transport and foredune and dunefield dynamics of Moçambique Beach, Southern Brazil. *Geomorphology* 120 (3-4), 258-278.
- Moore, L.J., 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research* 16, 111-124.
- Moreno, I.M., Ávila, A. y Losada, M.A., 2010. Morphodynamics of intermittent coastal lagoons in Southern Spain: Zahara de los Atunes. *Geomorphology*, 121, 305–316.
- Muhs, D.R. y Holliday, V.T., 1995. Evidence of active dune sand on the Great Plains in the 19<sup>th</sup> century from accounts of early explorers. *Quaternary Research* 43, 198-208.
- Muñoz-Perez, J.J. y Medina, R., 2000. Profile changes due to a fortnightly tidal cycle. *International Conference on Coastal Engineering (ASCE), Sydney*, 3063-3075.
- Muñoz-Pérez, J.J. y Medina, R., 2010. Comparison of long-, medium- and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control. *Coastal Engineering* 57, 241–251.
- Muñoz-Perez, J.J., Medina, R. y Tejedor, B., 2001. Evolution of longshore beach contour lines determined by the E.O.F. method. *Scientia Marina* 65(4), 393-402.
- Muñoz-Pérez, J.J., Tejedor, L. y Medina, R., 1999. Equilibrium beach profile model for reef-protected beaches. *Journal of Coastal Research*, 15(4), 950-957.
- Muñoz-Pérez, J.J., Navarro, M., Román-Sierra, J., Tejedor, B., Rodríguez, I. y Gómez-Pina, G., 2009. Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method. *Geomorphology* 112, 167–177.
- Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Tejedor, B, Rodríguez, I. y Gómez Pina, G., 2007. Morphological evolution in the migrating dune of Valdevaqueros (SW Spain) during an eleven-year period. *Proceedings of the 1st International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*, 80-85. ISBN: 978-84-8102-497-5.

- Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Tsoar, H., Rodríguez, I. y Gómez-Pina, G., 2011. Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. *Geomorphology* 129 (1-2), 14-28.
- Nickling, W.G. 1988. The initiation of particle movement by wind. *Sedimentology* 35, 499-511.
- Oliveira Jr. J.G., Medeiros, W.E., Tabosa, W.F., y Vital, H., 2008. From barchan to domic shape: Evolution of a coastal sand dune in Northeastern Brazil based on GPR Surrey. *Revista Brasileira de Geofísica* 26(I1), 5-20.
- Olivier, M.J. y Garland, G.G., 2003. Short-term monitoring of foredune formation on the east coast of South Africa. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 1143-1155.
- Ojeda, J., Vallejo, I. y Málvarez, G.C., 2005. Morphometric evolution of the active dunes system of the Doñana National Park, Southern Spain (1977-1999). *Journal of Coastal Research* SI 49, 40-45.
- Ojeda Zújar, J., Borgniet, L., Pérez Romero, A.M. y Loder, J.F., 2002. Monitoring morphological changes along the coast of Huelva (SW Spain) using soft-copy photogrammetry and GIS. *Journal of Coastal Conservation* 8(1), 69-76.
- Packham, J.R. y Willis, A.J., 1997. *Ecology of dunes, salt marsh and shingle*. Ed. Chapman & Hall, Cambridge, 337 pp.
- Palomares Losada, A.M., 2002. Tesis Doctoral: Caracterización del régimen de vientos y desarrollo de un modelo de predicción eólica a escala local en el estrecho de Gibraltar. Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Universidad Complutense de Madrid.
- Paskoff, R., 2003. Coastal dune fields in Atlantic Europe: towards a dynamic conservation. *Nature Sciences Sociétés* 11(3), 288-294.
- Peña-Cortés, F., Ailio, C., Gutiérrez, P., Escalona-Ulloa, M., Rebolledo, G., Pincheira-Ulbrich, J., Rozas, D. y Hauenstein, E., 2008. Morphology and dune dynamics in the coastal border of Araucania region in Chile. Background for conservation and territorial Management. *Revista de Geografía Norte Grande* 41, 63-80.
- Peterson, C.D., Stock, E., Price, D.M., Hart, R., Reckendorf, F., Erlandson, J.M. y Hostetler, S.W., 2007. Ages, distribution and origins of upland coastal dune sheets in Oregon, USA. *Geomorphology* 91, 80-102.

- Phillips, C.J. y Willetts, B.B., 1978. A review of selected literature on sand stabilisation. *Coastal Engineering* 2, 133-147.
- Provoost, S., Ampe, C. Bonte, D., Cosyns, E. y Hoffmann, M., 2004. Ecology, management and monitoring of grey dunes in Flanders. *Journal of Coastal Conservation* 10(1), 33-42.
- Pruszek, Z. 1993. The analysis of beach profile changes using Dean's method and empirical orthogonal functions. *Coastal Engineering* 19, 245-261.
- Pye, K., 2001. Long-term geomorphological changes and how they may affect the dune coasts of Europe. *Coastal Dune Management. Shared Experience of European Conservation Practice*, 17-22.
- Pye, K. y Neal, A., 1994. Coastal dune erosion at Formby Point, north Merseyside, England: Causes and Mechanisms. *Marine Geology*, 119 (1-2), 39-56.
- Pye, K. y Tsoar, H., 1990. *Aeolian sand and sand dunes*. Springer.
- Ranwell, D.S., 1960. Newborough Warren, Anglesey: III. Changes in the Vegetation on Parts of the Dune System After the Loss of Rabbits by Myxomatosis. *Journal of Ecology*, 48(2): 385-395.
- Regnauld, H. y Louboutin, R., 2002. Variability of sediment transport in beach and coastal dune environments, Brittany, France. *Sedimentary Geology* 150, 17-29.
- Robertson, M.P., Peter, C.I., Villet, M.H. y Ripley, B.S., 2003. Comparing models for predicting species' potential distributions: a case study using correlative and mechanistic predictive modelling techniques. *Ecological Modelling* 164, 153-167.
- Rodríguez, I., Montoya, I., Sánchez, M.J. y Carreño, F., 2009. Geographic Information Systems applied to Integrated Coastal Zone Management. *Geomorphology* 107 (1-2), 100-105.
- Rodríguez Santalla, I., Sánchez García, M.J., Montoya Montes, I., Gómez Ortiz, D., Martín Crespo, T. y Serra Raventos, J., 2009. Internal structure of the aeolian sand dunes of El Fangar spit, Ebro Delta (Tarragona, Spain). *Geomorphology*, 104, (3-4), 238-252.
- Román Lozano, A., 2008. Tarifa y el viento de levante. *Climatología. Aljaranda: revista de estudios tarifeños*, nº 68, 28-30.
- Román-Sierra, J., Navarro Pons, M., Muñoz-Pérez, J.J., Gomez-Pina, G. y Fages Antiñolo, L., 2004. Ecosistemas dunares en la provincia de Cádiz. Estabilizaciones en Bolonia y Valdevaqueros, T.M. Tarifa. *Revista de Obras Públicas* 151, 3450, 65-76.



- Rust, I.C. y Illenberger, W.K., 1996. Coastal dunes: sensitive or not? *Landscape and Urban Planning* 34, 165-169.
- Savage, R.P y Woodhouse, J.R.W.W., 1968. Creation and stabilization of coastal barrier dunes. *Proc. ICCE, ASCE*, 671-700.
- Saye, S.E., van der Wal, D., Pye, K. y Blott, S.J., 2005. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology* 72(1-4), 128-155.
- Saye, S.E., Pye, K. y Clemmensen, L.B., 2006. Development of a cliff-top dune indicated by particle size and geochemical characteristics: Rubjerg Knude, Denmark. *Sedimentology* 53, 1-21.
- Schmeisser, R.L., Loope, D.B. y Wedin, D.A., 2009. Clues to the Medieval Destabilization of the Nebraska Sand Hills, USA, from Ancient Pocket Gopher Burrows. *Palaios*, 24(11-12): 809-817.
- Scorer, R.S., 1952. Mountain-gap winds; a study of surface wind at Gibraltar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 78(335), 53-61.
- Shengyu, L., Jiaqiang, L., Xinwen, X., Lixin, W., Zhibin, Z. y Hongzhong, L., 2006. Topographical changes of ground surface affected by the Tarim Desert Highway. *Chinese Science Bulletin*, 51, Supp. I, 101-109.
- Shenoi, S.S.C., Murty, C.S. y Veerayya, M., 1987. Monsoon-induced seasonal variability of sheltered versus exposed beaches along the west coast of India. *Marine Geology* 76, 117-130.
- Sherman, D.J. 1990. Evaluation of aeolian sand transport equations using intertidal-zone measurements, Saunton Sands, England - discussion. *Sedimentology* 37, 385-392.
- Short, A.D. y Hesp, P.A., 1982. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Marine Geology* 48, Issues 3-4, 259-284.
- Smith, T.M., Reynolds, R.W., Livezey, R.O. y Stokes, D.C., 1996. Reconstruction of historical sea surface temperatures using Empirical Orthogonal Functions. *Journal of Climate*, 9, 1403-1420.
- Stapor, F.W., May, J.P. y Barwis, J. 1983. Eolian shape-sorting and aerodynamic traction equivalence in the coastal dunes of Hout Bay, Republic of South Africa. In: Brookfield, M.E. and Ahlbrandt, T.S. (eds), *Eolian sediments and landforms, Developments in Sedimentology* 38, Amsterdam: Elsevier, pp. 149-164.

- Talbot, M.R., 1984. Late Pleistocene rainfall and dune building in the Sahel. *Palaeoecology of Africa* 16, 203-214.
- Thomas, A.S., 1960. Changes in vegetation since the advent of myxomatosis. *Journal of Ecology*, 48(2), 287-306.
- Thomas, A.S., 1963. Further changes in vegetation since the advent of myxomatosis. *Journal of Ecology*, 51(1), 151-186.
- Thornton, E.B., Sallenger, A., Sesto, J.C., Egley, L., Mc Gee, T. y Parsons, R., 2006. Sand mining impacts on long-term dune erosion in southern Monterey Bay. *Marine Geology* 229, 45-58.
- Tsoar, H., 1985. Profiles analysis of sand dunes and their steady state signification. *Geographiska Annaler. Series A, Physical Geography* 67, n° ½, 47-59.
- Tsoar, H., 2001. Types of aeolian sand dunes and their formation. In: Balmforth, N.J. and Provenzale, A. (eds), *Geomorphological Fluid Mechanics, Lecture Notes in Physics Series 582*, Berlin: Springer-Verlag, pp. 403-429.
- Tsoar, H., 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 357 (1), 50-56.
- Tsoar, H. y Blumberg, D.G., 2002. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast. *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (11), 1147-1161.
- Tsoar, H., Blumberg, D.G. y Stoler, Y., 2004. Elongation and migration of sand dunes. *Geomorphology* 57, 293-302.
- Tsoar, H., White, B. y Berman, E., 1996. The effect of slope on sand transport - numerical modelling. *Landscape and Urban Planning* 34, 171-181.
- Tsoar, H., Levin, N., Porat, N., Maia, L.P., Herrmann, H.J., Tatumi, S.H. y Claudino-Sales, V., 2009. The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quaternary Research* 71 (2), pp. 217-226.
- Van der Burgh, L.M., Wijnberg, K.M., Hulscher, S.J.M.H., Mulder, J.P.M y Van Koningsveld, M., 2007. Linking coastal evolution and super storm dune erosion forecasts. *Coastal Sediments*, ASCE, pp.14.
- Van Dijk, P.M., Arens, S.M. y Van Boxel, J.H., 1999. Aeolian processes across transverse dunes. II: Modelling the sediment transport and profile development. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 319-333.

- Watson, A. 1987. Discussion: variation in wind velocity and sand transport on the windward flanks of desert sand dunes. *Sedimentology* 34, 511-20.
- White, B.R., 1979. Soil transport by wind on Mars. *J. of Geophysical Research* 84, 4643-4651.
- Williams, A.T. y Davies, P., 2001. Coastal dunes of Wales; vulnerability and protection. *Journal of Coastal Conservation* 7, 145-154,
- Williams, A.T., Alveirinho-Dias, J., Garcia Novo, F., Garcia-Mora, M.R., Curr, R. y Pereira, A., 2001. Integrated coastal dune management: Checklists. *Continental Shelf Research* 21, 1937-1960.
- Winant, C.D. y Aubrey, D.G., 1976. Stability and impulse response of Empirical Eigenfunctions. Proc. 15<sup>th</sup> Coastal Engineering Conf., ASCE, New York, 1312-1325.
- Winant, C.D., Inman, D.L. y Nordstrom, C.E. 1975. Description of seasonal beach changes using Empirical Eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*, 80, C15, 1979-1986.
- Wolf, J. y Woolf, D.K., 2006. Waves and climate change in the north-east Atlantic. *Geophysical research Letters* 33, L06604, 4 pp.
- Yao, Z.Y., Wang, T., Han, Z.W., Zhang, W.M. y Zhao, A.G., 2007. Migration of sand dunes on the northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China. *J. of Arid Environments* 70, 80-93.
- Yizhaq, H., Ashkenazy, Y. y Tsoar, H., 2007. Why do active and stabilized dunes coexist under the same climatic conditions? *Physical Review Letters* 98 (18). Art. No. 188001.
- Zhang, K., Douglas, B.C. y Leatherman, S.P., 2000. Twentieth-Century Storm Activity along the U.S. East Coast. *Journal of climate* 13, 1748-1761.
- Zingg, A., 1953. Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Proceedings of the 5th Hydraulics Conference Bulletin* 34, 111-135. Iowa City: Inst. of Hydraulics.





**UCA**

---

Universidad  
de Cádiz