

Tema: Sistemas dunares e inundación costera

LA IMPORTANCIA DEL ESTUDIO ESPACIO-TEMPORAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LAS DUNAS MÓVILES

M. Navarro¹, J. Román-Sierra², I. Caballero¹, J.J. Muñoz-Pérez², G. Gómez-Pina², L. Fages².

1. Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales.
Universidad de Cádiz. Polígono Río San Pedro, s/n, 11510, Puerto Real (Cádiz).

2. Demarcación de Costas Andalucía Atlántico. C/ Marianista Cubillo, 7, 11071, Cádiz.

INTRODUCCIÓN

Las dunas costeras son sistemas arenosos de especial singularidad, situados en la transición entre el ambiente continental y el marino. Estos ecosistemas dunares no sólo representan una protección física contra la erosión del litoral actuando de reservorio de arena durante los grandes temporales, sino que también poseen una función ecológica única, permitiendo la colonización de especies psamófilas adaptadas a estos ambientes salinos.

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. 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, a cambios en la movilidad o estabilización, etc. En muchos casos, se trata de dunas costeras degradadas debido a un uso turístico poco adecuado para estas áreas litorales. Sin embargo, en otros casos, dicha degradación se debe en parte a causas naturales que afectan a su equilibrio dinámico. En el ámbito costero europeo ya se han detectado sistemas dunares que presentan una especial inactividad, conllevando a una disminución de la biodiversidad típica de esos ambientes (Provoost et al., 2002; Clemmensen y Murray, 2006; Arens et al, 2007), mientras que en otros sistemas dunares el problema radica en la pérdida de estabilidad y consiguiente incremento de movilidad (Castro, 2005; Chase y Thomas, 2006; del Valle et al., 2008). Para ambos casos es posible la recuperación del sistema dunar mediante una gestión adecuada adaptada a las necesidades de cada uno de estos ecosistemas. Generalmente, en los estudios de

restauración se desarrollan 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).

La gestión de los ecosistemas dunares requiere del establecimiento de una metodología práctica, basada en el estudio del comportamiento tanto espacial como temporal de las dunas. En este estudio llevaremos a cabo un seguimiento y análisis a largo plazo de una duna transgresiva con un alto índice de movilidad. De este modo es posible extraer las pautas de comportamiento de la duna con el fin de satisfacer las necesidades antrópicas, sin menoscabo de garantizar el mantenimiento del entorno natural en la medida de lo posible.

ZONA DE ESTUDIO Y ANTECEDENTES

La duna de Valdevaqueros, situada en el T.M. de Tarifa (Cádiz), es un ejemplo de duna transgresiva migratoria (Fig. 1). Este tipo de dunas son las más activas y su invasión tierra adentro puede causar importantes daños, tanto antrópicos como naturales. En concreto, se trata de una duna costera de más de 40 metros de altura sobre el cero hidrográfico, con una longitud de 700 metros y una anchura media de unos 300 metros (Muñoz-Pérez et al., 2009). Una de sus peculiaridades es que se encuentra principalmente afectada por los vientos de Levante, muy frecuentes en la zona del Estrecho, que pueden alcanzar rachas de más de 100 km/h (Gómez-Pina et al., 2002). Ello explica que la duna de Valdevaqueros presente una elevada movilidad hacia el oeste de la ensenada.



Figura 1. Localización de la duna de Valdevaqueros

Son precisamente estas peculiares condiciones eólicas las que hacen que la gestión de la duna de Valdevaqueros no sea tarea fácil, ya que su invasión hacia la carretera que se dirige al poblado de Mas Palomas parece inevitable. A lo largo de las últimas décadas y debido a su continuo avance hacia el pinar y la carretera adyacentes, se han aplicado numerosos trabajos de restauración. En primer lugar, se ha ido llevando a cabo una remodelación fisiográfica de la duna, extrayendo arena de la parte de sotavento y cresta y suavizando la pendiente de barlovento en la zona dunar más activa (Fig. 2).



Figura 2. Remodelación fisiográfica y extracción de áridos de la cresta y sotavento

Paralelamente, se han ido estableciendo captadores de arena, principalmente tablestacas en la cresta y barlovento de la duna pero también mimbre en la parte más baja de la duna. Los captadores de mimbre, de naturaleza más flexible, se suelen colocar normalmente en las zonas dunares con aún presencia de vegetación y que conservan cierta estabilidad. Estos captadores, a diferencia de las tablestacas logran una pendiente mucho más natural, lo que favorece la colonización de vegetación. Por otra parte, en las pequeñas dunas embrionarias, se han ido realizando trabajos de revegetación con *Ammophila arenaria*, debidamente acordonadas y señalizadas, con diferentes resultados en función de la zona de plantación (Fig. 3).



Figura 3. Instalación de captadores y revegetación

A pesar de la que la restauración dunar se ha ido llevando a cabo de manera continua, no se ha conseguido la estabilización general del campo dunar y la carretera ha seguido siendo invadida por las arenas.

Llegados a este punto, la Demarcación de Costas, tal como se expuso en Fages et al. (2007), se planteó una serie de alternativas, como la elevación de la carretera, la creación de un falso túnel o la desviación del tránsito por la carretera que utilizaban los militares para llegar a Punta Paloma.

METODOLOGÍA

Toma de datos

Para determinar el porqué del especial comportamiento de la duna de Valdevaqueros, se realizó un seguimiento y análisis de evolución de la duna mediante levantamientos topográficos sucesivos de 5 perfiles a lo largo de 11 años, concretamente en Junio 1995, Mayo 1999, Noviembre 1999, Junio 2000, Noviembre 2003 y Mayo 2003. La toma de datos se realizó con estación total durante los primeros años y finalmente con GPS diferencial durante los últimos levantamientos (Fig. 4). A su vez, se trataron datos meteorológicos de los últimos años y se realizaron tomas de muestras en los puntos más significativos de la duna para su posterior análisis granulométrico.



Figura 4. Toma de datos mediante GPS diferencial

Aplicación de funciones empíricas ortogonales

La obtención de datos brutos permitió apreciar una acreción generalizada de la duna, sin embargo, resultaba de difícil interpretación en cuanto a diferencias volumétricas, y determinación cambios en las pendientes de los perfiles. Para ello, se ha aplicado una metodología objetiva e intuitiva como es la reconstrucción de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs), cuyo fundamento matemático puede basarse en la siguiente expresión:

$$h_{ij} = h(x_i, t_j) = \sum_{l=1}^N a_l \cdot X_l(x_i) \cdot T_l(t_j) = a_1 \cdot X_1(x_i) \cdot T_1(t_j) + a_2 \cdot X_2(x_i) \cdot T_2(t_j) + \dots$$

En la que h_{ij} es la altura en el punto x_i y levantamiento t_j , X_l representa la autofunción espacial l , T_l la autofunción temporal l y a_l es el coeficiente de escala de las autofunciones l . Se trata de “fusionar” en una sola representación gráfica los cambios ocurridos tanto en la escala espacial como en la temporal, obteniendo resultados mucho más intuitivos e interpretables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la obtención de las componentes transversales y temporales a través de la aplicación de las EOFs, se han podido extraer las tendencias de cada perfil. A continuación se muestran dichas componentes para el caso del perfil 1 (Fig. 5), siendo éste el perfil que presenta mayor actividad. Para todos los casos, el eje de ordenadas representa el borde de la carretera minimizando su distancia hacia la playa a medida que nos alejamos en las abcisas.

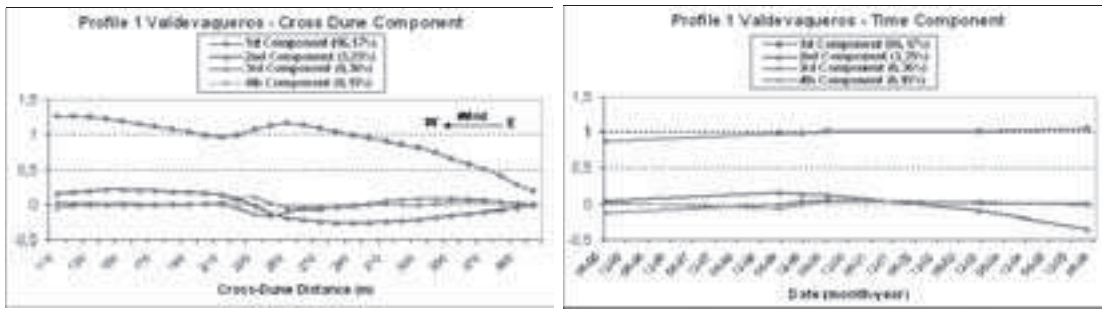


Figura 5. Componentes transversales y temporales para el perfil 1.

Una vez esto, se ha llevado a cabo la reconstrucción de las EOFs, en la que se consigue una interpretación más intuitiva tanto para expertos como para lectores no familiarizados con esta metodología. Mediante la obtención de la primera componente espacio-temporal se ha determinado el perfil medio dunar (Fig. 6). A esta primera componente, que representa el 96,17% de la variabilidad de los datos, se le asocia un volumen ganado por la duna de 1.758 m³/m durante 11 años.

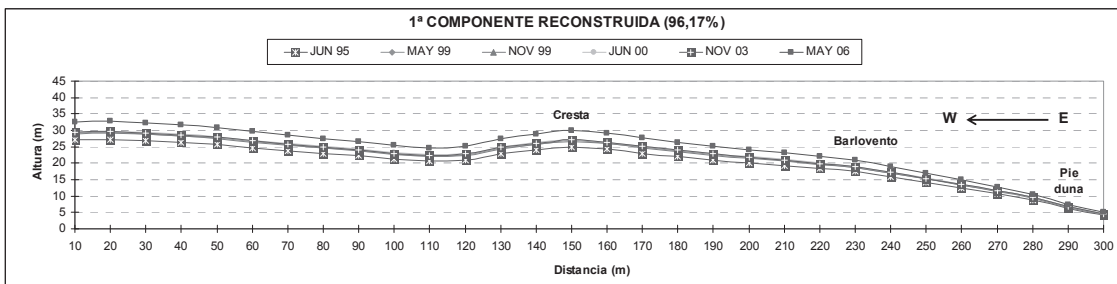


Figura 6. Reconstrucción de la 1ª componente espacio-temporal.

Por otra parte, gracias a la representación de la segunda componente espacio-temporal (que explica un 3.25% de la variabilidad de los datos) se ha identificado punto pivote alrededor de la cresta de la duna (Fig.7), lo que explica un basculamiento en el perfil, transportándose grandes cantidades de arena desde la pendiente de barlovento hacia la cresta y sotavento de la duna.

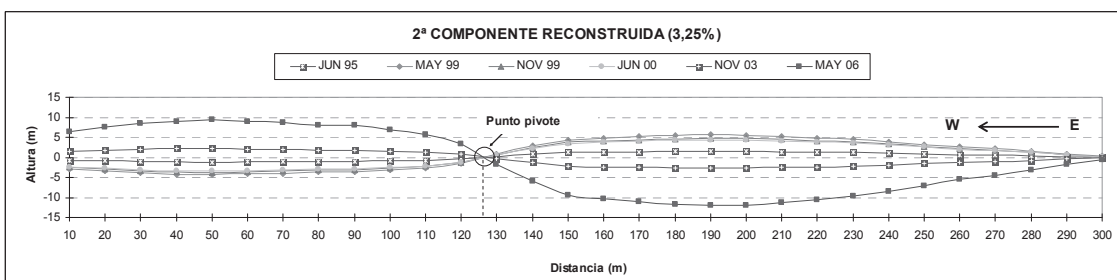


Figura 7. Reconstrucción de la 2ª componente espacio-temporal.

En cuanto a la tercera componente (0.36% de la varianza total explicada), ésta muestra un punto pivote en la zona de barlovento, lo que describe un cambio de esta pendiente de barlovento, suavizándose a partir de Mayo'99 y haciendo que el perfil se vuelva más estable.

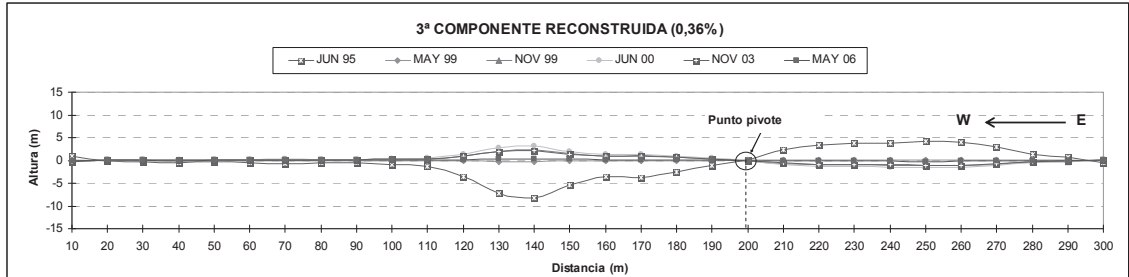


Figura 8. Reconstrucción de la 3ª componente espacio-temporal.

Por último, la cuarta componente espacio-temporal, pese a representar el 0.15% de la variabilidad de los datos, ha permitido la identificación de pequeños movimientos paralelos de avance dunar.

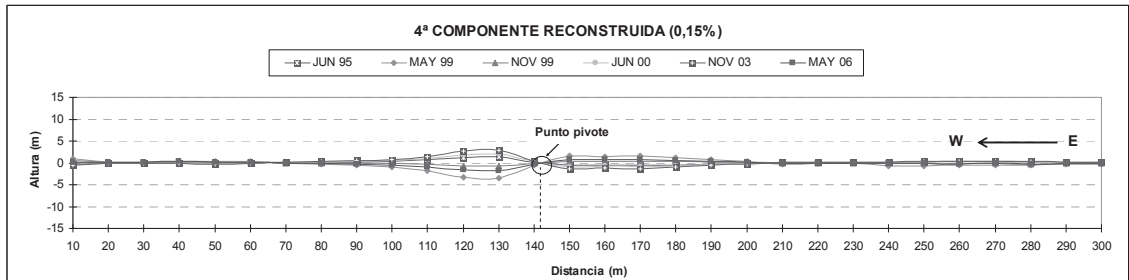


Figura 9. Reconstrucción de la 4ª componente espacio-temporal.

Asimismo, teniendo en cuenta estudios como los realizados por Jimenez et al. (2002) o Rodríguez et al. (2009), se han podido extraer diversos parámetros dunares, como pendientes, alturas, distancias y tasas de avance (Tabla 1). De este modo, puede comprobarse cómo el avance medio dunar ha sido de unos 17.5 m durante el periodo de estudio. La pendiente de sotavento es la que más cambios ha experimentado, con una pendiente media del 28.5%, mientras que la de barlovento se ha mostrado algo más estable, con una pendiente cercana al 18%.

		JUN 95	MAY 99	NOV 99	JUN 00	NOV 03	MAY 06	Media	Desviación
Pendiente barlovento (%)	Max	34,7	27,3	23,9	30,5	25,3	25,2	28,3	3,6
	Media	21,1	19,5	18,7	19,4	16,4	13,0	18,2	2,5
	Min	12,8	11,7	13,4	11,0	7,2	3,9	9,8	3,0
Pendiente sotavento (%)	Max	24,2	63,5	44,3	53,7	23,1	30,8	38,9	16,7
	Media	15,9	50,1	31,7	33,1	23,1	15,1	28,5	12,5
	Min	7,5	39,1	19,2	14,7	23,1	4,0	19,5	11,8
Altura pie duna (m)		4,1	4,2	4,7	5,3	5,1	4,3	4,6	0,5
Altura cresta (m)		23,1	32,6	32,2	31,8	31,3	41,1	31,3	4,9
Altura pie sotavento (m)		16,6	17,6	19,7	21,4	29,0	35,7	23,4	6,5
Distancia pie duna-cresta (m)		90	150	150	160	280	310	193,9	79,0
Distancia cresta-carretera (m)		320	260	259	250	120	90	212,2	83,6
Avance duna (m/año)		-	15,3	2,0	15,4	38,0	12,0	17,5	12,1

Tabla 1. Parámetros dunares obtenidos para el periodo de estudio.

Para una mejor comprensión de los cambios ocurridos en la duna, se muestra una tabla con las extracciones llevadas a cabo durante 15 años (Tabla 2). Nótese cómo el volumen total de arena extraído asciende a más de 440.000 m³, lo que justifica en parte, los cambios en la altura de cresta y pendiente de sotavento. Estos datos junto con los obtenidos tras los análisis granulométricos (donde se determinó que el D₅₀ de las arenas era de 0.29 mm) y meteorológicos (confirmando la intensidad del viento de levante) dan idea de la elevada magnitud del transporte eólico sobre la superficie dunar, incluso necesitando un mayor umbral de velocidad a partir del cual se produce el movimiento de los granos.

EXTRACCIONES DE ÁRIDOS (m³)

AÑO	ANUAL	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1991	76.700	-	-	-	-	76.700	-	-	-	-	-	-	-
1992	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1993	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1994	174.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1995	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1996	5.700	-	-	-	-	-	5.700	-	-	-	-	-	-
1997	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1999	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	94.787	-	-	15.000	25.000	28.488	16.912	9.387	-	-	-	-	-
2001	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2002	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	3.600	-	-	-	-	-	-	-	3.600	-	-	-	-
2004	15.974	-	-	-	-	-	4.387	7.000	-	-	-	4.587	-
2005	31.437	-	4.587	-	-	-	6.750	-	-	4.700	7.700	7.700	-
2006	38.420	-	8.420	-	-	-	-	-	15.000	15.000	-	-	-
TOTAL	441.118												

Tabla 2. Volúmenes de arena extraídos de la duna de Valdevaqueros desde 1991 hasta 2006. Los meses sombreados corresponden a los levantamientos realizados en el estudio.

Comparando estos datos con los resultados obtenidos mediante las EOFs, vemos que hasta 2003 el movimiento natural de las arenas se veía equiparado por el volumen que se iba extrayendo. Sin embargo, pese a estas medidas correctoras, el crecimiento natural fue 6 veces mayor al volumen extraído durante los últimos 3 años, lo que hace pensar en la necesidad de un seguimiento continuado para reflejar posibles tendencias no sólo a medio-largo plazo sino también a muy corto plazo.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el estudio de la evolución de la duna de Valdevaqueros a largo plazo tras un seguimiento topográfico y posterior análisis mediante Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs). La reconstrucción de las EOFs representa un método objetivo de análisis de variabilidad de los datos, tras el cual se han obtenido una serie de componentes espacio-temporales:

- La 1ª componente representa el perfil medio dunar, pues explica el 96,17% de la variabilidad de los datos, a la vez que
- La 2ª componente identifica un transporte basculante de arena de barlovento hacia la cresta.
- La 3ª componente explica cambios en la relación H/L.
- La 4ª componente muestra pequeños movimientos paralelos de avance.

En cuanto a los parámetros dunares obtenidos, llama especialmente la atención una tasa media de migración de casi 18 m/año, siendo una de las dunas más activas actualmente en España. No es de extrañar, entonces, que la duna haya estado sujeta a continuas extracciones de arena, lo que confirma que la pendiente de sotavento haya experimentado tantos cambios a lo largo de 11 años. La pendiente de barlovento, por otra parte, ha presentado valores menos variables, convergiendo a un perfil más estable. A pesar de las continuas extracciones que solían frenar el avance hacia la carretera, se ha detectado un movimiento natural 6 veces superior al volumen extraído durante los últimos 3 años del periodo estudiado.

REFERENCIAS

- Arens, S.M., Slings, Q.L., Geelen, L.H.W.T. and van der Hagen, G.J.M., 2007. Implications of environmental change for dune mobility in the Netherlands. *International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*, Santander, 2007.
- Castro, J.W.A., 2005. Burying processes carried out by a mobile transversal dunefield, Paracuru County, State of Ceará, Brazil. *Environmental Geology*, 49: 214–218.
- Chase, B.M and 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, 318–333.
- Del Valle, H.F., Rostagno, C.M., Coronato, F.R. and Bouza, P.J., Blanco P.D., 2008. Sand dune activity in north-eastern Patagonia. *Journal of Arid Environments* 72, 411–422.
- Clemmensen, L.B. and Murray, A., 2006. The termination of the last major phase of Aeolian sand movement, coastal dunefields, Denmark. *Earth Surf. Process. Landforms* 31, 795–808.
- Fages, L., Gómez-Pina, Jiménez-Cuenca, M., Ruiz, J.A., and Muñoz Pérez J.J., 2007. Integrated study of alternatives for Valdevaqueros dune area (Tarifa Co., Cádiz, Spain). *Proceedings of the International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes*. Santander, pp. 50-51.
- Gómez-Pina, G., Muñoz Pérez J.J., Ramírez J.L. and Ley C., 2002. Sand dune management problems and techniques, Spain. *Journal of Coastal Research*, SI 36, 325-332.
- Jiménez, J.A., Maia, L.P., Serra, J. and Morais, J., 2002. Aeolian dune migration along the Ceará coast, north-eastern Brazil. *Sedimentology*, Volume 46 Issue 4, Pages 689 – 701.
- Ley, C., Gallego, J.B. y Vidal, C., 2007. *Manual de restauración de dunas costeras*.
- Muñoz-Pérez, J.J., Navarro, M., Román-Sierra, J., Tejedor, B., Rodríguez, I. and Gómez-Pina, G., 2009. Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method. *Volume 112, Issues 1-2*, pp. 167-177.
- Provoost, S., Ampe, C., Bonte, D. Cosyns, E. and Hoffmann, M., 2002. Ecology, management and monitoring of grey dunes in Flanders. *Journal of Coastal Conservation*, 10: 33-42.
- Rodríguez, I., Montoya, I., Sánchez, M.J. and Carreño, F., 2009. Geographic Information Systems applied to Integrated Coastal Zone Management. *Geomorphology*, vol. 107, Issues 1-2, pp. 100-105.
- Román-Sierra, J., Navarro Pons, M., Muñoz-Pérez, J.J., Gómez 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, n. 3450, 65-76.