

## **ANÁLISIS DE LAS FORMACIONES DUNARES ACTIVAS DE LA FLECHA DEL FANGAR (DELTA DEL EBRO)**

I. Rodríguez<sup>1</sup>, M. J. Sánchez<sup>1</sup>, I. Montoya<sup>1</sup>, D. Gómez<sup>1</sup>, Martín<sup>1</sup>, T., F.J. Gracia<sup>2</sup>, L.  
Moreno<sup>3</sup>, J.J. Muñoz<sup>4</sup>, J. Serra<sup>5</sup>

1. Universidad Rey Juan Carlos, ESCET. C/ Tulipán s/n; 28933 Móstoles, Madrid
2. Universidad de Cádiz, Facultad de CC del Mar y Ambientales. Avda. República Árabe Saharaui s/n, 11510 Puerto Real, Cádiz
3. Universidad Politécnica de Madrid, E.U.I.T. Obras Públicas. C/ Alfonso XII, 3 y 5, 28014 Madrid
4. Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico. C/ Marianista Cubillo, 11071 Cádiz.
5. Universidad de Barcelona, Facultad de Geología. Martí Franqués, s/n; 08028, Barcelona

### **INTRODUCCIÓN**

El Delta del Río Ebro ha sido objeto, y es, fuente de muchas y variadas investigaciones, especialmente en lo que concierne a la dinámica litoral y a la evolución deltaica (Maldonado, 1972; Mariñas y Tejedor, 1986; Palanques, 1987; Guillén, 1992; UPC-LIM, 1991; Sánchez-Arcilla *et al.*, 1995; CEDEX-CEPYC, 1996; I.T.G.E., 1996; Jiménez *et al.*, 1996; Jiménez, 1996; Rodríguez, A., 1997; Serra, 1997; Rodríguez, I., 1999; Serra, 2000; Rodríguez, I., 2003). Sin embargo, en relación con los procesos eólicos, intensos y significativos en el litoral deltaico, apenas hay referencias, destacando el estudio realizado por Serra y su equipo de la Universidad de Barcelona (1997) bajo encargo del CEDEX-CEPYC, el cual sienta la base para iniciar un trabajo de mayor detalle y profundidad en el conocimiento de dichos procesos eólicos.

Este artículo muestra los trabajos realizados sobre los campos de dunas activas de la Flecha del Fangar al amparo del Proyecto de Investigación "Cuantificación y Contribución del Transporte Eólico en los Procesos Dinámicos y Ambientales en el Delta del Ebro. Aplicación a su Gestión Integrada y a la Conservación de los Ambientes Marginales" (AGITE), concedido por el Ministerio de Educación y Ciencia

dentro del Plan Nacional de I+D+i (2005-2008). En dicho proyecto se ha podido analizar cuál es la morfodinámica de dicho campo, cómo es su estructura interna, y cuáles son los mecanismos que gobiernan su dinámica, aspectos desarrollados en una Tesis Doctoral (Sánchez, 2008) defendida recientemente. En el marco del proyecto, también se han realizado otros trabajos globales de todo el delta, tendentes a aumentar el conocimiento de la zona, y evaluar el interés y la percepción social que tiene la problemática actual del delta.

Actualmente, los principales campos dunares del Delta del Ebro se encuentran en la Flecha del Fangar, Barra del Trabucador y Punta de la Banya, pero el único que queda activo es el del Fangar, motivo por el cual fue esta la zona donde se centró el estudio de cálculo del transporte eólico. El campo dunar activo de la Flecha del Fangar se extiende paralelo a la costa externa de la flecha desde el extremo meridional de la misma hasta su inicio en el cuerpo deltaico principal (Figura 1a). La longitud del campo de dunas es de unos 4 kilómetros y el ancho varía entre los 50 y los 250 metros (Serra et al., 1997). Tiene una extensión de 100.000 m<sup>2</sup> aproximadamente y acumula un volumen de sedimentos de 200.000 m<sup>3</sup>. La altura de duna aumenta de N a S hasta alcanzar una altura máxima entre 5 y 6 metros en la zona intermedia, volviendo a disminuir hasta 2 metros al finalizar el campo dunar (Sánchez et al., 2007). Las dunas se orientan perpendiculares a la línea de costa, y la morfología dunar predominante es barjana, encontrándose también formas barjanoides (Figura 1b). La posición del campo dunar está condicionada por la dirección predominante de los vientos de mayor intensidad cuya dirección es 315° (Serra et al., 1997), así como por la orientación de la costa. Los sedimentos que alimentan las dunas proceden de la punta de la flecha, los cuales a su vez han sido transportados por las corrientes desde el frente deltaico.

A partir de la Playa de la Marquesa, y hasta la Flecha del Fangar, el cordón dunar es móvil, y presenta una dinámica muy activa: en los meses de invierno, cuando las tormentas son muy fuertes, las dunas son arrasadas parcialmente por el oleaje incidente, quedando el Fangar prácticamente plano, y en los meses de bonanza, a partir de marzo o abril, aproximadamente, la propia dinámica costera se encarga de volver a disponer el material de nuevo, para formar otra vez los cuerpos dunares. Este momento es aprovechado por las aves que habitan en el delta para preparar sus nidos en los espacios interdunares, y por este motivo, durante los meses comprendidos entre abril y agosto, el Parque Natural dispone un cercado alrededor del campo dunar, para evitar el paso de personas y vehículos entre las dunas que puedan alterar la

nidificación. En la costa interna, también hay una serie de cordones dunares artificiales, construidos para proteger los cultivos marinos que están instalados en la Bahía del Fangar (Sánchez, 2008).

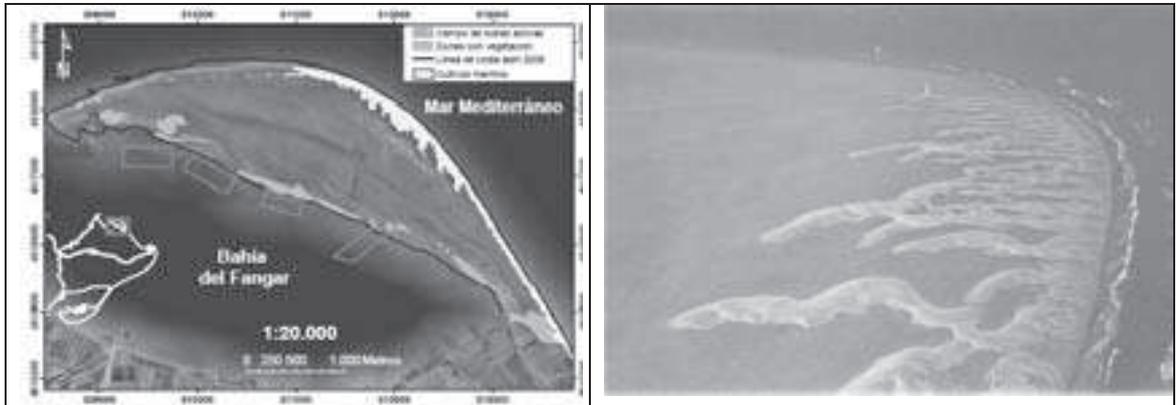
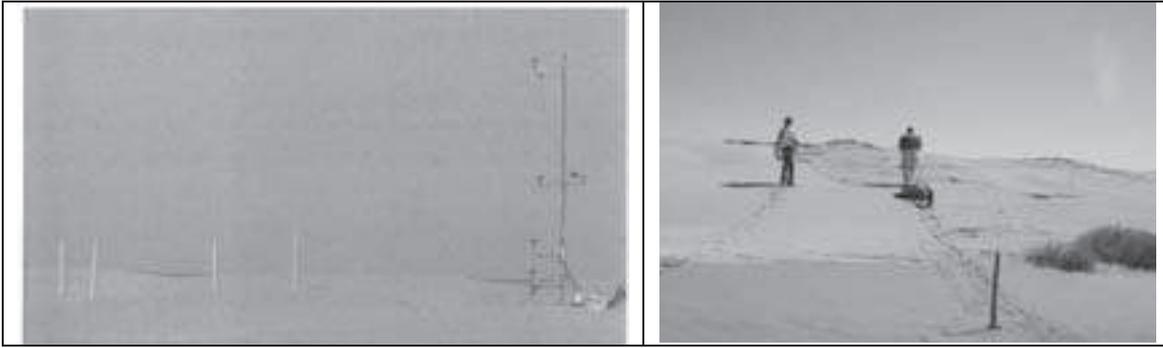


Figura 1.a) Situación del campo dunar en la Barra del Fangar (Hemidelta Norte); b) Aspecto del campo dunar.

## METODOLOGÍA

### Trabajos de campo

En total se han realizado siete campañas de campo para la adquisición de datos físicos, más una enfocada a la realización de encuestas de percepción social del problema erosivo. El periodo de adquisición de datos ha transcurrido desde finales de 2005 hasta finales de 2007. En dichas campañas, además del levantamiento topográfico de todas las dunas con GPS diferencial, se instaló una torre de anemómetros diseñada especialmente para este proyecto, y se colocaron una serie de trampas de sedimento para tomar datos sobre transporte eólico (Figura 2a). Además, durante la campaña de septiembre de 2006, se obtuvieron datos de la estructura interna de las dunas con GPR (Ground Penetrating Radar) (Figura 2b). Aparte, en las diferentes campañas realizadas se han recogido muestras de arena en distintos puntos de la Flecha del Fangar, las cuales han sido analizadas por medio de granulometría, microscopía óptica y difracción de Rayos X para establecer las características mineralógicas y texturales del sedimento.



*Figura 2. a) Ubicación de la torre de anemómetros y de las trampas de sedimentos sobre la duna; c) Toma de datos geofísicos con GPR*

## **Trabajos de gabinete**

Los trabajos de gabinete se han centrado en el tratamiento e interpretación de la información recogida en campo, así como en el análisis de otras fuentes de información deltaica. Hay que destacar que se han utilizado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una herramienta fundamental para la integración de todos los datos recogidos y analizados, así como para su interpretación, explotación y elaboración de resultados y cartografías finales.

La cartografía geomorfológica del litoral deltaico se ha obtenido a partir de fotointerpretación de pares estereoscópicos de distintas fechas (Figura 3a). Esta información ha sido georreferenciada y digitalizada y se ha incorporado en el SIG, para realizar un análisis de cambios entre las diferentes clases geomorfológicas. Así mismo, se verificaron los resultados en campo.

Los radargramas registrados por el GPR y distribuidos por todo el campo dunar fueron estratigráficamente interpretados (Figura 6) mostrando la estructura interna de los cuerpos dunares (Gómez et al., 2009; Rodríguez et al., 2009).

Los datos recogidos con GPS-D se procesaron y se fueron introducidos en el SIG donde se construyeron los diferentes Modelos Digitales de Elevación (MDE) (figura 3b). A partir de esta información se obtuvo la dinámica y evolución en planta de los cuerpos dunares, así como los cambios volumétricos. Esta información, junto con la explotación de los datos recogidos por los anemómetros y las trampas de sedimento, permitió determinar los parámetros necesarios para introducirlos en las ecuaciones de cálculo de transporte eólico, y alcanzar así el valor de éste para el campo dunar del Fangar.

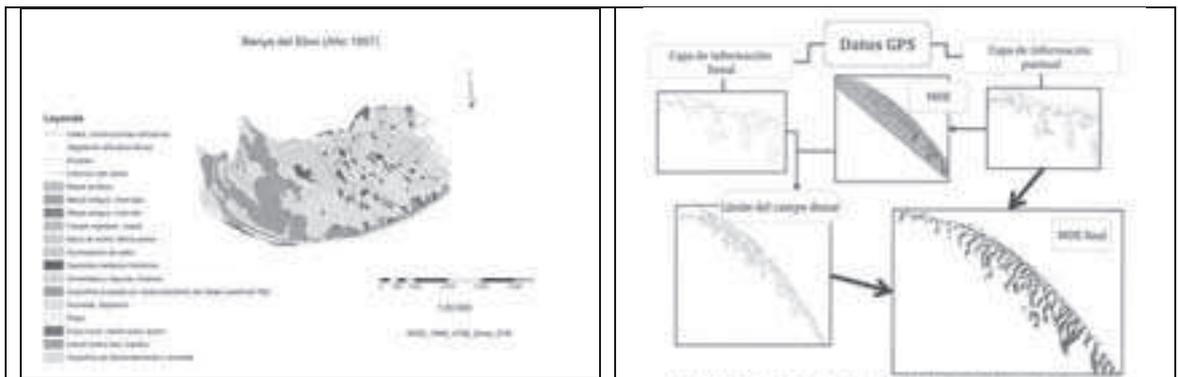


Figura 3. a) ejemplo de una cartografía geomorfológica; b) modelo cartográfico de la obtención del MDE (Sánchez, 2008)

## RESULTADOS

De todo el trabajo anterior se han conseguido resultados relevantes que han permitido caracterizar las formaciones dunares de la Flecha del Fangar, en planta, en volumen y, también en profundidad, además de obtener el valor del transporte eólico ocurrido en el periodo de estudio. La evolución en planta a largo plazo del campo dunar muestra como se ha modificado la extensión de los campos dunares debido, principalmente, al descenso de sedimento que llega a la desembocadura por parte del río, y a los procesos de erosión por parte del oleaje incidente. Ante estas situaciones el campo dunar ha ido readaptándose a las nuevas posiciones de la línea de orilla, perdiendo en algunos sitios parte de su superficie (Figura 4), e incluso llegando a desaparecer en los puntos más vulnerables como la Playa de la Marquesa, debido a que no hay espacio suficiente para que las dunas retrocedan por encontrarse elementos antrópicos (caminos y campos de cultivos) que impiden este movimiento, provocando la erosión de la duna (Sánchez et al., 2008).

El análisis volumétrico se ha realizado a dos escalas de tiempo diferentes. En el medio plazo se ha partido del trabajo realizado por la Universidad de Barcelona (1997), desarrollado únicamente en la parte norte de la flecha. La Tabla 1 muestra los resultados, observándose una disminución en planta, mientras que el volumen aumenta, al elevarse la altura media de las dunas

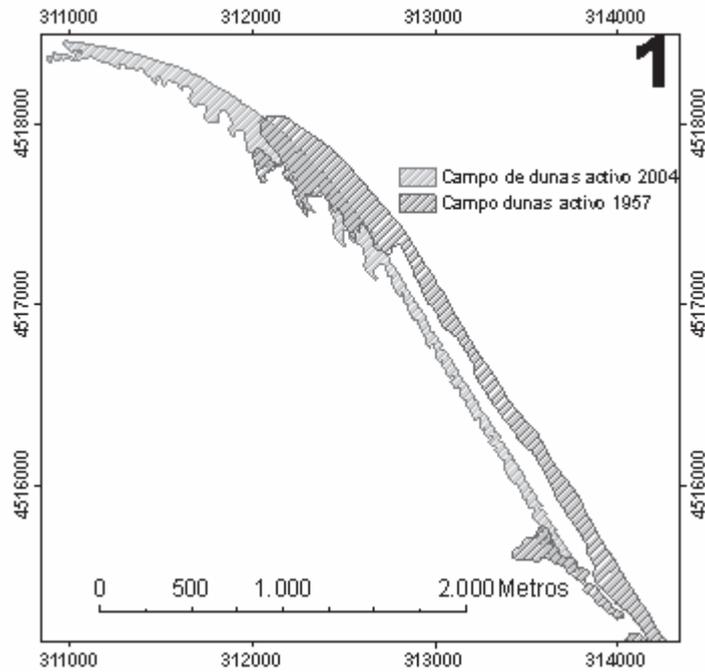


Figura 4. Posición del campo dunar activo de la Punta del Fangar en 1957 y 2004.

	1996			2005		
	Altura media (m)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Altura media (m)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Sector 1	0,60	31.000,00	18.600,00	2,09	11.646,86	24.365,24
Sector 2	1,20	40.000,00	48.000,00	2,30	29.313,69	67.362,85
Sector 3	0,65	38.500,00	23.000,00	2,45	18.710,04	121.723,75
Sector 4	1,00	81.000,00	78.570,00	2,77	43.975,35	45.802,18
Total	0,86	190.500,00	168.170,00	2,40	103.645,93	259.254,01

Tabla 1. Resultados obtenidos en el análisis de cambio en volumen a medio plazo

El análisis de cambios en volumen a corto plazo se ha realizado a partir de los datos recogidos con GPS-D en las diferentes campañas, procesados e interpretados con el SIG. Los resultados (Figura 5) muestran como se produce la migración del campo dunar hacia el SE, y un incremento tanto de área como de volumen.

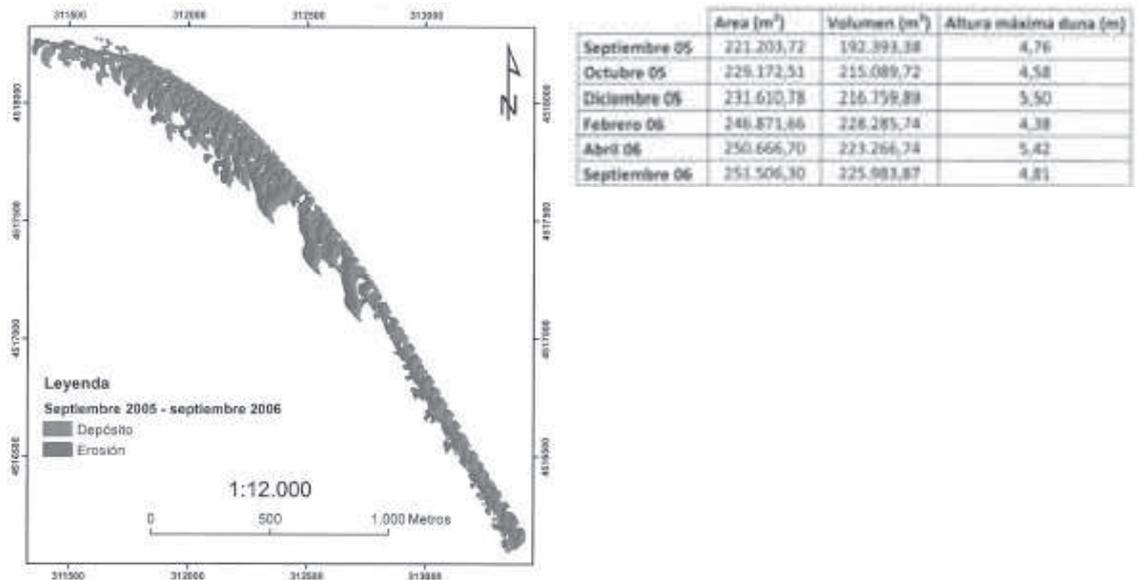
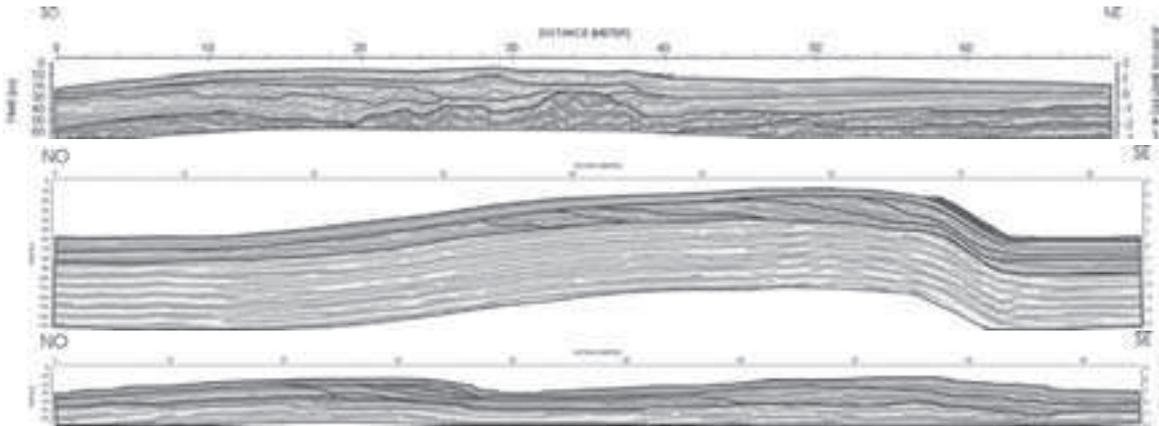


Figura 5. A) MDT que muestra la migración dunar hacia el SE durante el análisis a corto plazo;  
 b) Resultados de los cálculos parciales entre diferentes campañas

La interpretación de los radargramas (Figura 6) ha permitido comprobar la relación estrecha entre la estructura interna de las dunas y su comportamiento dinámico (Rodríguez et al., 2009). Así, las dunas de la zona norte, presentan cuerpos dunares de baja altura, y en ella, los reflectores (Figura 6a) muestran la morfología de las barras que se van anexionando a la playa, y que han dado lugar a la Flecha del Fangar. Por encima se encuentran las facies típicas de la migración dunar. En la figura 6b, radargrama perteneciente a la zona central del campo dunar, se observan dos tipos de facies diferentes: la más profunda presenta reflectores continuos lateralmente y de muy bajo ángulo, asociados a la acreción del foreset; mientras que las facies situadas sobre la anterior muestran estratificación cruzada en dirección SE, causada por la migración del cuerpo dunar. Por encima de ésta se puede distinguir una pequeña estructura generada por avalancha debida a reactivación del viento. La figura 6c corresponde al radargrama tomado en la zona sur que contiene dunas de menor altura, y muy próximas a la orilla. Esto hace que en los momentos de oleaje fuerte estas dunas sean abatidas y erosionadas lo que queda reflejado en la secuencia de radar por truncaciones en los reflectores.



*Figura 6a, b y c. Distinción de radarfacies sobre radargramas realizados en la zona 1, zona 3 y zona 4, respectivamente*

En cuanto al cálculo del transporte eólico, los resultados de las ecuaciones corregidas con los datos de viento de las estaciones meteorológicas, y los tomados en campo, muestran que el transporte eólico de la zona se dirige hacia el SE, transportando un volumen de sedimentos de más de 23.000 m<sup>3</sup>/m en un periodo de 10 años (1997-2007). La dirección de transporte coincide con la dirección de la línea de costa desde el inicio de la flecha hasta aproximadamente la mitad del campo dunar, por lo que la mayor parte del sedimento se mueve paralelo a la línea de costa, hasta que llega al mar, incorporándose de nuevo al ciclo (Sánchez, 2008).

## CONCLUSIONES

La evolución reciente de las formaciones eólicas es motivo de interés en cuanto representan un almacén de arena disponible del sistema deltaico costero, elemento imprescindible para mantener el sistema frente a la acción de la dinámica marina, y de otros elementos propios del sistema ecológico y paisajístico.

La adquisición de datos topográficos con GPS-D ofrece, además de precisiones tanto en planimetría como en altimetría adecuadas a la altura de las dunas de la zona, un avance en cuanto al tiempo que se necesita para realizar los levantamientos. Esto permite hacer seguimientos del campo dunar continuos, reflejando los cambios que puedan ocurrir en muy corto plazo.

El GPR representa una herramienta muy adecuada para obtener datos de la estructura interna de los cuerpos dunares, de forma rápida y poco agresiva con el medio. Esta información permite formular modelos del comportamiento dinámico de las dunas al

objeto de establecer un acercamiento a la evolución futura y actuar en consecuencia aplicando políticas de gestión y conservación de los espacios dunares.

Los SIG se mantienen como una herramienta muy eficaz en este tipo de estudios, pues permiten integrar datos de muy diferente naturaleza y procesarlos en conjunto, dando soluciones globales que integran los diferentes aspectos considerados.

Los análisis evolutivos realizados en planta y en volumen, muestran un campo dunar muy activo. La migración se produce hacia el SE, y alcanza unos valores de casi 100 metros al año

Los cálculos obtenidos tanto en superficie como en volumen, muestran que el campo de dunas se ha incrementado, readaptándose a la nueva morfología que va imponiendo la línea de costa por erosión, excepto en aquellas áreas donde no hay espacio suficiente para que las dunas retrocedan.

La dirección neta de transporte eólico de la zona, es hacia el SE, con un volumen de sedimentos transportados de más de 23.000 m<sup>3</sup>/m en 10 años.

## **AGRADECIMIENTOS**

El Proyecto de Investigación “Cuantificación y Contribución del Transporte Eólico en los Procesos Dinámicos y Ambientales en el Delta del Ebro. Aplicación a su Gestión Integrada y a la Conservación de los Ambientes Marginales” (AGITE), ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia dentro del Plan Nacional de I+D+i (2005-2008). Los miembros del equipo de investigación del citado proyecto desean agradecer a todos los organismos y entidades que de una forma u otra han colaborado en su desarrollo: Servicio de Costas de Tarragona, Centro de Puertos y Costas del CEDEX, Instituto Cartográfico de Cataluña, y en especial a los Técnicos de Parque Natural del Delta del Ebro, así como José A. Jiménez y Jorge Guillén que de forma desinteresada han aportado sus ideas y conocimientos.

## **REFERENCIAS**

CEDEX-CEPYC, 1996. Estudio de la dinámica litoral del Delta del Ebro. Informe técnico realizado para la Dirección General de Costas- MOPTMA, 155 pp.

Gómez Ortiz, D.; Martín-Crespo, T.; Rodríguez, I.; Sánchez, M.J.; Montoya, I., 2009. Internal structure of modern barchan dunes of the Ebro River Delta (Spain) from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 2/68. Pág. 159 – 170.

Guillén, J., 1992. Dinámica y Balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

I.T.G.E., 1996. Estudio geológico del Delta del Ebro. Proyecto para la evaluación de la tasa de subsidencia actual. Informe Técnico de Instituto Tecnológico y Geominero de España; 83 pp.

Jiménez, J.A., 1996. Evolución costera en el Delta del Ebro. Un proceso a diferentes escalas de tiempo y espacio. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 274 pp. Barcelona.

Jiménez, J.A.; Sánchez-Arcilla, A.; Valdemoro, H.I.; Gracia, V.; Nieto, F., 1996. Forcing agents controlling reduction processes in Ebro Delta. *Marine Geology*, July, 1996.

Maldonado, A., 1972. El Delta del Ebro. Estudio sedimentológico y estratigráfico. Tesis Doctoral. *Boletín de Estratigrafía*, 1, Vol. Extra. Universidad de Barcelona, 476 pp.

Mariñas, J.F.; Tejedor, L., 1986. Modelo numérico de simulación hidrodinámica del Delta del Ebro, El sistema integrado del Delta del Ebro: Cuenca, Delta y medio Marino. Madrid, Gráficas Hermes.

Palanques, A., 1987. Dinámica sedimentaria, mineralógica y microcontaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Rodríguez, A., 1997. Estudio experimental de la hidrodinámica en zona de rompientes. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 274 pp. Barcelona

Rodríguez, I., 1999. Evolución geomorfológica del Delta del Ebro y prognosis de su evolución. Tesis Doctoral. Madrid, Universidad de Alcalá de Henares, 200 pp.

Rodríguez, I.; Galofré, J.; Montoya, F., 2003. El Fangar spit evolution. *Coastal Engineering VI: Computer Modelling and Experimental Measurements of Seas and Coastal Regions*. WIT PRESS, UK. 419-425

Rodríguez, I.; Sánchez, M.J.; Montoya, I.; Gómez, D.; Martín-Crespo, T.; Serra, J., 2009. Internal structure of the aeolian sand dunes of El Fangar spit, Ebro Delta (Tarragona, Spain). *Geomorphology*, Vol. 3-4/104. Pág. 238 – 252

Sánchez, M.J.; Rodríguez, I.; Montoya, I., 2007. Short term coastal dune evolution of Fangar Spit (Ebro Delta, Spain). *International Conference on Management and Restoration of coastal dunes*. Santander, Spain.

Sánchez, M.J., 2008. Evolución y análisis morfodinámico del campo dunar de la Flecha del Fangar (Delta del Ebro). Tesis Doctoral, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.

Sánchez-Arcilla, A.; Jiménez, J.A.; Gracia, V.; Valdemoro, H.I., 1995. Sediment Budget at the Ebro Delta coast: a multi-scale approach. International conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'95

Serra, J.; Riera, G.; Argullós, J.; Maia, L.P., 1997. El transporte eólico en el delta del Ebro: evaluación y contribución al modelado litoral. Bol. Geol. Y Min., Vol. 4-5: 477-485. Madrid.

Serra, J., 2000. Impacto geológico de la disminución del caudal del Río Ebro en su curso inferior y costa deltaica. Caudales Ecológicos APROMA (ED): 216-227. Barcelona.

Universidad de Barcelona, 1997. Estudio de la situación actual y evolutiva de las formaciones eólicas litorales del Delta del Ebro. Informe Técnico, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona; 49 pp.

UPC-LIM (1991): Análisis y propuesta para estabilizar el Delta del Ebro. Informe Técnico. Varios volúmenes. Generalidad de Cataluña.