

## B.1. Seguimiento de la línea de costa y de la dinámica dunar

Técnico responsable: Ricardo Díaz-Delgado

Asesores científicos: José Ojeda Zújar e Ismael Vallejo (Dto. Geografía, Universidad de Sevilla).

### *Introducción*

El sistema de dunas móviles del P.N. de Doñana ocupa unos 60 km<sup>2</sup> y se desarrolla sobre una flecha litoral que, desde el máximo transgresivo flandriense (6500 BP), ha ido progresivamente cerrando la antigua bahía asociada a la desembocadura del Guadalquivir (Lario et al, 2002). En la actualidad ocupa un frente costero de mas de 20 km y se extiende hacia el interior hasta aproximadamente 4 km. La estructura general del complejo se define a través de diferentes trenes de dunas transgresivas, con nítidos frentes de avance en el sentido de los vientos dominantes (SO-NE con carácter general), y depresiones interdunares que se intercalan entre los anteriores, separándolos unos de otros. La totalidad del sistema de dunas móviles está integrado por las unidades de duna costera (*foredune*), trenes de dunas transgresivas (*transgressive dune ridges*) y depresiones interdunares (*slacks*).

El sistema costero del PND presenta una dinámica muy activa dada la influencia oceánica en la morfología de la línea de costa y en el desarrollado sistema dunar (Ojeda y Vallejo 2003). El retroceso y avance de la línea de costa puede ser cuantificado a lo largo del tiempo en función de la velocidad de este proceso. En las últimas décadas se ha constatado un avance entre Mazagón y la Torre del Loro, y una retirada de la misma entre Matalascañas y Sanlúcar de Barrameda, originando en este último sector una serie de playas colgadas que aumentan en número hacia la desembocadura del Guadalquivir.

Las nuevas tecnologías (GPS, restitución fotogramétrica, Lidar, etc.) posibilitan la obtención de parámetros morfométricos de forma precisa, rápida y repetitiva para extensas áreas (Ojeda, 2000). La fotogrametría y las imágenes de teledetección,

ambas con carácter retrospectivo, son una herramienta esencial para el análisis dinámico de estos espacios (Brown and Arbogast, 1999; Judge et al, 2000). Así, la teledetección permite discriminar los sistemas de dunas móviles dada la característica respuesta espectral de la arena. De esta forma el avance y tendencia general del sistema dunar y los corrales (áreas interdunares cubiertas por *Pinus pinea*) puede ser cuantificado a través una serie temporal de escenas sobre el área de interés mediante previa normalización radiométrica afín de evitar problemas de calibración.

La metodología planteada utiliza la banda 7 de los sensores Landsat TM y ETM+ (2.08 - 2.35  $\mu\text{m}$ ) basados en la óptima discriminación espectral que existe en esta banda entre el mar y la playa (márgen y río), entre las dunas y los corrales y entre arenas y arcillas cubiertas por vegetación (White y El Asmar, 1999).

El análisis de los cambios llevado a cabo en estos protocolos se efectuó para periodos de cada aproximadamente 5 años que se corresponde con la frecuencia establecida en las prescripciones técnicas del proyecto. No obstante, se aplicaron también a fechas anteriores con objeto de determinar cambios sustanciales en las dinámicas examinadas en periodos más extensos y poder así valorar la idoneidad de las metodologías.

La fecha de referencia que constituye el origen de análisis para todos los seguimientos de este protocolo es el 25 de agosto de 1984, año de la primera imagen Landsat TM disponible para Doñana.

### **Objetivos**

- Controlar la dinámica de la línea de costa y la morfología dunar a escala 1:100000.
- Evaluar la velocidad de avance de las dunas, así como la variación en superficie y morfológica de los diferentes ecosistemas asociados a ella a escala 1:100000.
- Evaluar los procesos de regresión/transgresión de la línea de costa.

- Evaluar la velocidad con que se producen estos fenómenos, y su relación con las actividades humanas en la zona (dragados, tráfico fluvial, etc) que ayuden a la prevención y gestión.
- Orientar las actuaciones restauradoras que en cada caso procedan

### ***B.1.1. Protocolo para el seguimiento de dinámica de la línea de costa y playa***

Para la discriminación de la línea de costa deben calcularse los coeficientes de mareas estimados para cada fecha de adquisición de la serie de escenas comparadas con objeto de tener en consideración el efecto mareal en la estima de la línea de costa. El cálculo de los coeficientes de marea se realiza con el software wxtide32 (<http://wxtide32.com/>).

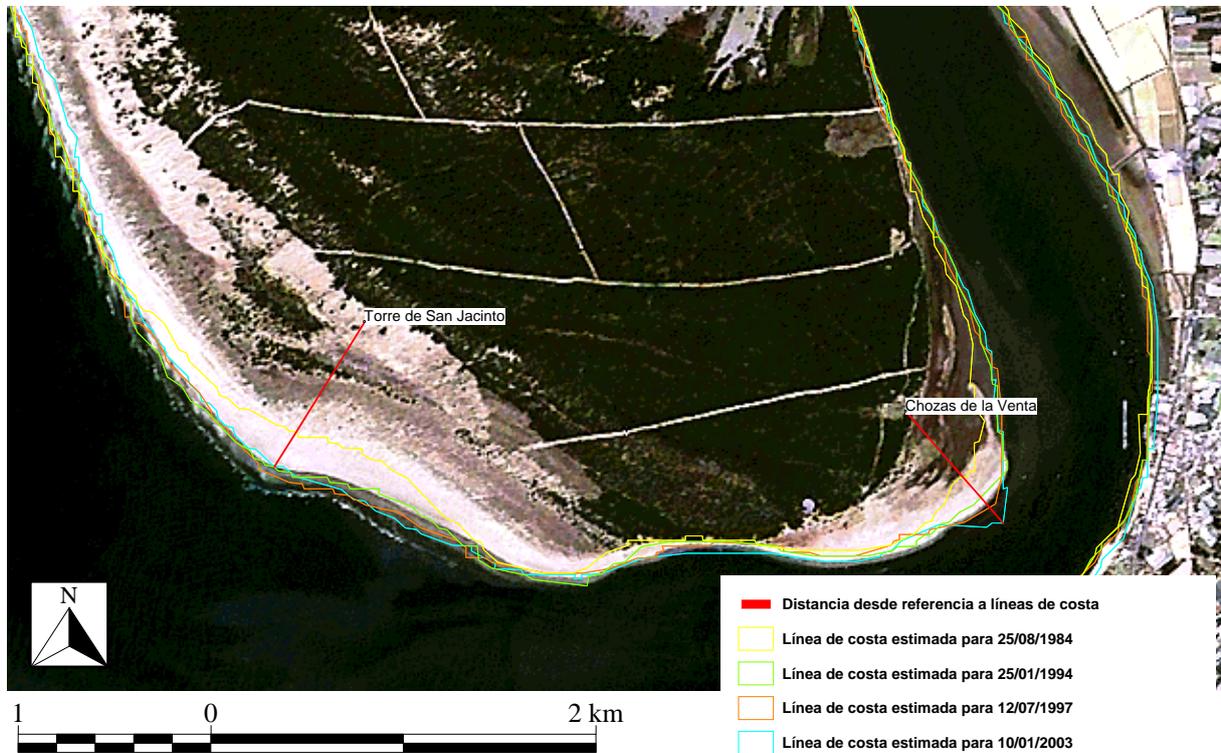
A continuación se detalla secuencialmente el proceso metodológico para la obtención de las líneas de costa:

1. Segmentación de la banda 7 empleando como valores mínimo y máximo de reflectividad 0-0.05. Estos valores se corresponden con los valores de reflectividad media del mar calculadas para la serie. El mínimo de población de píxeles usado para pertenecer a un segmento es de 100 y el número de píxeles a considerar para la conectividad de los segmentos es 8.
2. Generación de la máscara de mar/tierra (línea de costa) a partir del valor asignado por la segmentación al mar.
3. Aplicación de un filtro de moda con ventana de convolución de 3x3 para eliminar píxeles con valores anómalos.
4. Vectorización de la máscara resultante.

### **Localidades (Puntos de referencia)**

Una vez obtenidas las cartografías de línea de costa para cada fecha (Figura 1), se procede a estimar la distancia con respecto a los puntos de referencia en la costa siguiendo un rumbo fijo. Los puntos de referencia escogidos se distribuyen a

lo largo de toda la costa del parque nacional y sus coordenadas figuran en la Tabla 3. Estos puntos se corresponden a estructuras de origen humano que se mantienen fijas en el tiempo (disponibles en <http://mercurio.ebd.csic.es/seguimiento/>).



**Figura 1: Detalle de la dinámica de la línea de costa en la Punta del Malandar.**

Los rumbos se establecieron con idea de maximizar las distancias indicadoras de las tendencias en los cambios de la línea de costa.

**Tabla 3: Localización geográfica de los puntos de referencia y rumbos desde el Norte geográfico para el seguimiento de la dinámica costera. Coordenadas en proyección UTM huso 30 con datum European 1950 para España y Portugal obtenidas mediante GPS diferencial con corrección post-proceso.**

Toponimia	X	Y	Rumbos N (°)
Chozas de la Venta	201152.50	4078517.50	139.21
Torre San Jacinto	198342.50	4078987.50	121.66
Cuartel del Inglesillo	196413.75	4081478.75	167.45
Torre Zalabar	195097.50	4086692.50	162.57
Torre Carbonero	191152.60	4093224.43	122.55
Chozas de los Pescadores	188217.50	4096822.50	142.22

## Calendario

Las escenas empleadas para la validación deben ser escogidas en función de los valores similares de coeficiente de marea calculados para la hora de pasada del satélite (10:30 AM UTC) y el periodo de tiempo transcurrido entre ellas ajustándose a la frecuencia quinquenal requerida en las prescripciones técnicas.

## Material

Los métodos aplicados emplean como fuente de datos las imágenes de reflectividad corregistradas y normalizadas obtenidas aplicando los protocolos auxiliares para el tratamiento de la serie temporal de imágenes de Landsat TM y ETM+, para adquisición de datos de campo como verdad-terreno (necesidad de GPS).

Con respecto al software de tratamiento de las imágenes, para la aplicación de los protocolos aquí expuestos, se requieren licencias de MiraMon, ENVI y ArcGis.

## Personal

El personal dedicado deberá poseer conocimientos de teledetección y fotointerpretación y digitalización en pantalla.

## Resultados

Las fechas de las escenas de satélite se escogieron tal y como establecen los protocolos, en función del coeficiente mareal (comparables) y el periodo de años entre ellas (Tabla 4).

**Tabla 4: Fechas escogidas para la comparación de línea de costa y sus coeficientes de marea estimados para la hora de paso del satélite (10:30 AM UTC). Se muestran así mismo el periodo de años entre las escenas y los coeficientes mareales máximo y mínimo registrados para toda la serie.**

Fecha de la escena	Coeficiente de marea (m)	Periodo de años
25/08/1984	1.93	
25/01/1994	1.85	9.42
12/07/1997	1.75	3.46
10/01/2003	1.86	5.50
Máximo serie	2.37	
Mínimo serie	0.29	

Los periodos entre escenas son aproximadamente 10, 5 y 3 años, entre los cuales se aprecian cambios importantes en la línea de costa.

La tabla de resultados muestran para cada Punto de Referencia en las filas, y para cada fecha analizada en las columnas, las distancias totales entre la línea de playa en cada fecha y cada punto de referencia. Se ofrece también una tasa media anual de avance o retroceso en la línea de costa y en consecuencia un campo acerca del carácter progradante o regresivo del proceso. Además se ofrece la tabla con las coordenadas de las localizaciones de los puntos de referencia y los rumbos con orientación Norte y la tabla con los coeficientes mareales y el periodo de años entre las escenas comparadas.

Los resultados indican un importante proceso de transgresión en la Punta del Bajo derivado de la acumulación de sedimentos en la zona y una no menos importante tasa de erosión en la playa del norte del parque que encuentra su máximo a la altura de Torre Zalabar. Los valores parecen haber aumentado con respecto a los ofrecidos por Menanteau (1979) en el retroceso a la altura de Torre Carbonero de 88 m/siglo y en la progradación a la altura de Torre San Jacinto de 105 m/siglo y ser similares en Torre la Higuera con una tasa estimada de 70 m/siglo (muy próxima a Chozas de los Pescadores). Los procesos dominantes siguen siendo los mismos.

Los resultados brutos se acompañan de la cartografías completas de la línea de costa del Parque Nacional de Doñana publicadas para cada fecha en el Servidor de Cartografía Digital de Doñana (<http://mercurio.ebd.csic.es/seguimiento>). Además se incluyen los límites mareales derivados de la cartografía de costa efectuada para las escenas con los coeficientes mareales máximo y mínimo de la

serie que permiten determinar el ancho de playa. También se incluye la digitalización a escala 1:5000 sobre las ortofotos aéreas en pantalla de la línea de contacto entre la duna costera (foredune) y la playa alta (backshore) con objeto de determinar su localización a nivel subpixel en las imágenes.

### ***B.1.2. Protocolo para el seguimiento de la dinámica dunar***

Al igual que para la línea de costa, se emplean en la determinación del ritmo de avance de las dunas móviles las bandas 7 de las imágenes de satélite de la serie temporal.

A continuación se detalla secuencialmente el proceso metodológico para la cartografía de la superficie dunar:

1. Segmentación de la banda 7 empleando como valores mínimo y máximo de reflectividad 0.37-0.64. Estos valores se corresponden con los valores de reflectividad media de las dunas calculadas para la serie. El mínimo de población de píxeles usado para pertenecer a un segmento es de 100 y el número de píxeles a considerar para la conectividad de los segmentos es 8.
2. Generación de la máscara de dunas para cada fecha (Figura 2).
3. Proceso de sustracción por fechas consecutivas de las máscaras de dunas generadas.

### **Calendario**

Las escenas escogidas deben maximizar la separabilidad espectral en la respuesta radiométrica entre corrales (interdunas) y los frentes dunares. Este contraste es máximo para determinadas fechas en las que existe mayor transparencia atmosférica. Además debe considerarse el periodo de tiempo transcurrido entre ellas para ajustarlo al propuesto en las prescripciones técnicas (5 años).

## **Localidades (Sectores de Actividad Dunar)**

Una vez obtenidas las cartografías de resta de superficie dunar para cada fecha, se extrae la superficie cubierta para cada uno de los sectores de actividad dunar definidos por Ojeda y Vallejo (2003) en el sistema dunar del Parque Nacional de Doñana (Figura 2). Estos distintos sectores a lo largo del sistema poseen características bien distintas en cuanto a la disposición, número y relevancia de los trenes dunares. Los ángulos de los rumbos se corresponden con los máximos de avance dunar.

## **Material**

Los métodos aplicados emplean como fuente de datos las imágenes de reflectividad corregistradas y normalizadas obtenidas aplicando los protocolos auxiliares para el tratamiento de la serie temporal de imágenes de Landsat TM y ETM+, para adquisición de datos de campo como verdad-terreno.

Con respecto al software de tratamiento de las imágenes, para la aplicación de los protocolos aquí expuestos, se requieren licencias de MiraMon, ENVI y ArcGis.

## **Personal**

El personal dedicado deberá poseer conocimientos de teledetección, fotointerpretación y digitalización en pantalla.

## **Resultados**

Tras analizar la separabilidad espectral de la serie temporal de imágenes se escogieron fechas en las que la reflectividad media de las dunas se discriminaba en la banda 7 nítidamente de la reflectividad media de los corrales cubiertos por pinar (Tabla 5).

**Tabla 5: Fechas escogidas para la cartografía de frentes dunares.**

Fechas	Periodo de años	Ref media dunas	Ref media corrales
01/09/1988		0.51	0.12
06/03/1997	8.52	0.50	0.08
10/01/2003	5.85	0.57	0.10

Además de la comparación entre escenas con 5 años de diferencia se añadió una escena con diferencia de 8 años y medio para complementar la validación. La tabla muestra para las fechas de análisis en las filas, y para cada sector dunar en las columnas, las tasas medias anuales de avance dunar. Además, se indican para cada sector el número de frentes dunares que atraviesa cada rumbo y la orientación N de dichos rumbos.

De acuerdo con los resultados se ha incrementado el ritmo de avance dunar en los últimos años, notablemente en los sectores medios del complejo dunar. Al mismo tiempo estos sectores son sin duda los más activos. Los valores medios se encuentran entre los estimados por García-Novo et al. (1976).

Los resultados se acompañan de la cartografía completa de la superficie dunar del Parque Nacional de Doñana publicada para cada fecha analizada en el Servidor de Cartografía Digital de Doñana (<http://mercurio.ebd.csic.es/seguimiento>).

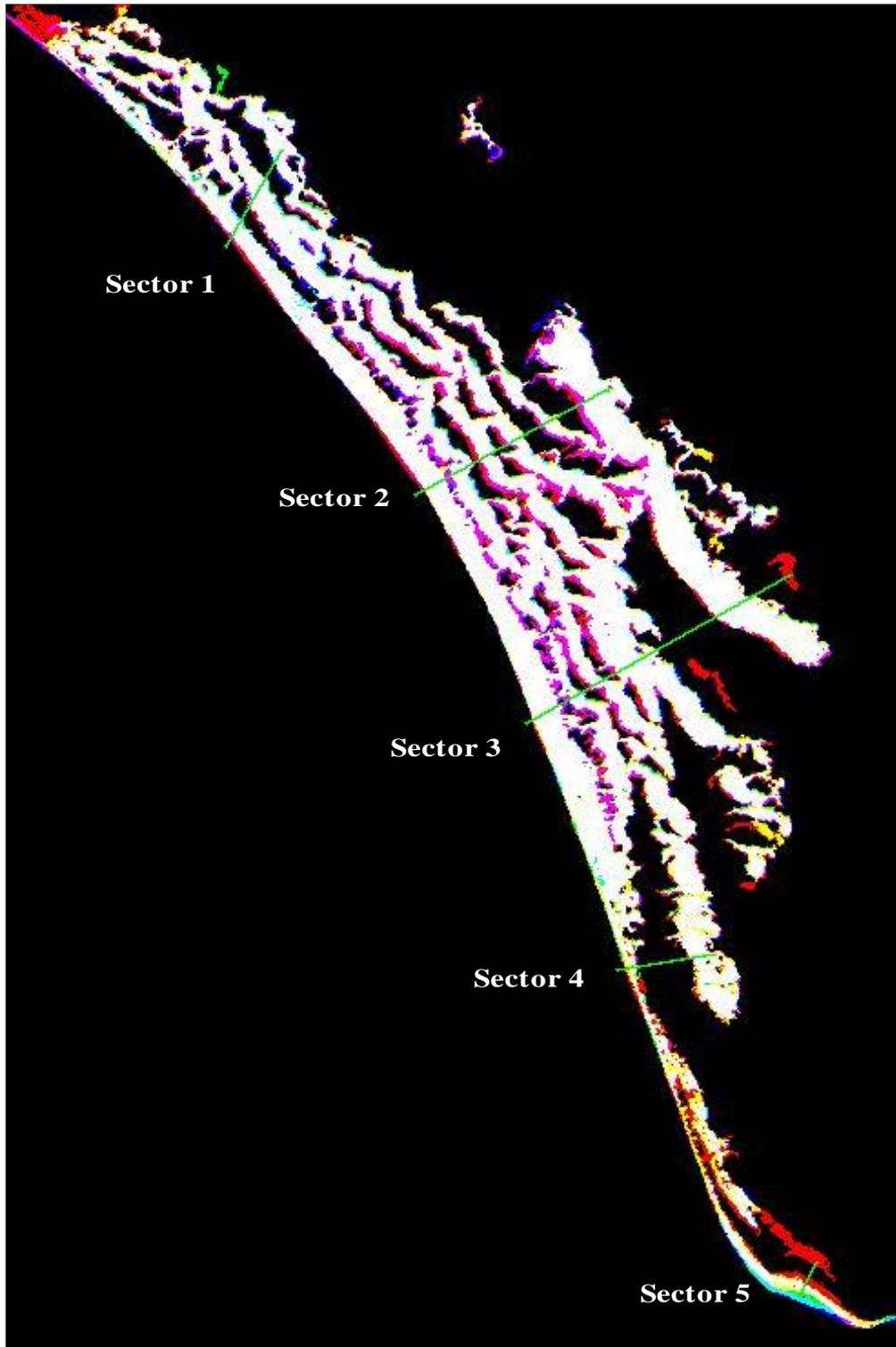


Figura 2: Cartografía dunar para las fechas analizadas. Rojo: 1984, verde: 1997 y azul: 2003. Las líneas verdes se corresponden con los frentes de avance característicos de cada sector del complejo dunar.

## Referencias bibliográficas

- Brown, D.G y Arbogast A.F. 1999. Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dune in Michigan. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 65(4):467-474.
- García Novo, F., Ramírez Diaz, L. y Torres, A. 1976. El sistema de dunas de Doñana. *Naturalia Hispanica*, 5:51-52.
- Judge, E.K., Garriga, C.M. y Overton, M.F. 2000. Topographic analysis of dunes volume and position, Jockey's Ridge State Park, North Carolina. *Shore and Beach*. 68(4):19-24.
- Lario, J., Zazo, C., Goy, J.L, Dabrio, C., Borja, F., Silva, P.J., Sierro, F.J., Gonzalez, A., Soler, V. y Yll, E. 2002. Changes in sedimentation trends in SW Iberia Holocene estuaries (Spain). *Quaternary International*, 93-94: 171-176.
- Menanteau, L. 1979. Compte rendu des journées sur l'aménagement et la protection du littoral (Madrid, les 2-5 mai 1978). *Mélanges de la Casa Velázquez*, 15 :615-622.
- Ojeda, J. 2000. Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30:103-118.
- Ojeda, J. y Vallejo, I. 2003. El empleo de los modelos digitales del terreno (MDTs) en la caracterización geomorfológica del sistema de dunas móviles del Parque Nacional de Doñana. In *Resúmenes de la II Reunión Nacional Geomorfología Litoral*. Santiago de Compostela. Universidad de Santiago de Compostela. Pp. 21-27.
- White, K. y El Asmar, H.M. 1999. Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta. *Geomorphology*, 29: 93–105.

### **B.3. Seguimiento de de la dinámica de los conos de deyección de arenas y de los procesos sedimentarios de la marisma.**

Técnico responsable: Ricardo Díaz-Delgado

Asesores científicos: Javier Bustamante (EBD-CSIC) y Juan Miguel Mintegui (Universidad Politécnica de Madrid).

#### ***Introducción***

La dinámica fluvial de los arroyos vertientes a la marisma ha sido alterada a lo largo de las últimas décadas debido en gran medida a las actuaciones en las cuencas de drenaje. Con el proyecto de regeneración hídrica y corrección de cauces esta dinámica se verá también afectada para aquéllas actuaciones previstas en el plan Doñana 2005.

Uno de los efectos más evidentes es el aporte continuo de sedimentos y la formación de importantes conos de deyección entorno a la marisma de El Rocío. En esta zona se pone de manifiesto un proceso de colmatación que debe ser evaluado no sólo sobre el terreno si no además mediante un estudio retrospectivo que muestre la velocidad de deposición de sedimentos y la relación con las aportaciones fluviales así como con la gestión de las cuencas de drenaje.

El arroyo del Partido presenta, salvo por su escasa pendiente, la estructura típica de una cuenca torrencial: con su área de recepción, su garganta, su primitivo cono de deyección y con anterioridad a 1981 presentaba también un canal de desagüe, que era el encargado final de conducir sin sedimentos la corriente del arroyo a la marisma: el llamado caño del Ajolí. En 1982 la superficie que ocupaba el nuevo cono de sedimentación (el anterior se encontraba en el cauce canalizado en 1981) ha sido estimado en 14.72 ha; 29 en 1985; a 104 en 1993; 204 en 1996; 317 en 1997 y 381 en 1998 (Sendra Arce, 2002). El incremento del cono de sedimentación ha continuado y continúa de forma dinámica.

Merced a la disponibilidad de escenas procedentes de las diferentes fuentes de teledetección citadas se ha podido discriminar la deposición de sedimentos en la zona de estudio constatada por Sendra Arce (2002). Además han podido constatarse los cambios producidos en estos conos a lo largo de los últimos 30 años. Este aspecto resulta clave para determinar de forma cuantitativa el crecimiento de estos conos y de la influencia de las actuaciones del 2005 en la dinámica fluvial de estos arroyos.

La metodología planteada utiliza la banda 7 de los sensores Landsat TM y ETM+ (2.08 - 2.35  $\mu\text{m}$ ) basados en la óptima discriminación espectral que existe en esta banda entre el mar y la playa (márgen y río), entre las dunas y los corrales y entre arenas y arcillas cubiertas por vegetación (White y El Asmar, 1999).

El análisis de los cambios llevado a cabo en estos protocolos se efectuó para periodos de cada aproximadamente 5 años que se corresponde con la frecuencia establecida en las prescripciones técnicas del proyecto. No obstante, se aplicaron también a fechas anteriores con objeto de determinar cambios sustanciales en la dinámicas examinadas en periodos más extensos y poder así valorar la idoneidad de las metodologías.

La fecha de referencia que constituye el origen de análisis para todos los seguimientos de este protocolo es el 25 de agosto de 1984, año de la primera imagen Landsat TM disponible para Doñana.

### **Objetivos**

- Generar el banco de datos que permita conocer la dinámica de la sedimentación de materiales finos en el sistema de marisma.
- Conocer la dinámica de erosión, transporte y sedimentación de arenas que afecta a áreas concretas de la marisma.
- Orientar las actuaciones restauradoras que en cada caso procedan.

### ***B3.1. Protocolo para el seguimiento de la dinámica de conos de deyección de arenas y de los procesos sedimentarios de la marisma.***

El procedimiento de análisis es similar al descrito para línea de costa basado en la óptima discriminación espectral entre arcillas y vegetación frente a las arenas de la banda 7. Consta de los siguientes pasos:

4. Segmentación de la banda 7 empleando como valores mínimo y máximo de reflectividad 0.33-0.64. Estos valores se corresponden con los valores de reflectividad media de las arenas calculadas para la totalidad de la serie. El mínimo de población de píxeles usado para pertenecer a un segmento es de 10 (dada la reducida superficie de alguna de las cubiertas objeto de estudio) y el número de píxeles a considerar para la conectividad de los segmentos es 8.
5. Aplicación de la máscara del área de estudio.
6. Vectorización de las superficies resultantes.
7. Cuantificación de la superficie de arenas para cada fecha analizadas y para cada una de las cubiertas objeto de seguimiento.

Para esta tarea se emplearon igualmente las imágenes de satélite y las 2 ortofotografías aérea digitales de Andalucía editadas por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en los años 1998 y 2002.

#### **Localidades (Conos de deyección)**

Los conos de deyección seguidos son, de mayor a menor importancia de aportes:

- Cono del Arroyo del Partido y Caño Marín,
- Cono del Arroyo de la Laguna de los Reyes y,
- Conos formados en la desembocadura de Soto Grande y Soto Chico y el canal de los Mimbrales.

## Calendario

Deben escogerse escenas de fechas en época seca (baja inundación) con objeto de optimizar la discriminación de las superficies de deposición de arenas y valorar así los aportes recibidos y sedimentados en torno a la desembocadura a lo largo de cada ciclo hidrológico.

Para descartar la confusión espectral con zonas urbanas y otras cubiertas presentes en el área de estudio, se ha establecido una máscara de trabajo que no solo recoge las superficies de sedimentación, si no también la cuenca con mayor incidencia de estos fenómenos y excluye el puente de la Canariega, el Rocío y Matasgordas (Figura 3).

El periodo de análisis mínimo es quinquenal.



**Figura 3: Límites establecidos para el análisis de la dinámica de sedimentación en la marisma del PND.**

## Material

Los métodos aplicados emplean como fuente de datos las imágenes de reflectividad corregistradas y normalizadas obtenidas aplicando los protocolos

auxiliares para el tratamiento de la serie temporal de imágenes de Landsat TM y ETM+, para adquisición de datos de campo como verdad-terreno.

Con respecto al software de tratamiento de las imágenes, para la aplicación de los protocolos aquí expuestos, se requieren licencias de MiraMon, ENVI y ArcGis.

## Personal

El personal dedicado deberá poseer conocimientos de teledetección y fotointerpretación y digitalización en pantalla.

## Resultados

Se seleccionaron 4 escenas de verano captadas en los meses de agosto y setiembre de los años 1984, 1996, 1999 y 2002, recogiendo diferentes periodos de tiempo para una primera aplicación del protocolo (Tabla 6).

**Tabla 6: Fechas escogidas para el análisis de los cambios en la dinámica de sedimentación en la marisma del PND.**

Fechas	Periodo (años)
25/08/1984	
27/09/1996	12.10
27/08/1999	2.92
19/08/2002	2.98

La tabla de resultados muestra la superficie absoluta en hectáreas de los aportes sedimentarios para cada una de las fechas analizadas (columnas) en las localidades de estudio (filas).

Como interpretación general se aprecia un incremento espectacular de la extensión cubierta por el cono del Arroyo del Partido en los últimos 10 años a una tasa media anual entre 1984 y 1999 de 31 ha/año. Esta tasa es ligeramente superior a la calculada por Sendra Arce (2002) para el periodo 1982-1998 de 23 ha/año. Puede apreciarse así mismo una aparición de fenómenos de sedimentación en torno a las cuencas de Soto Grande y Soto Chico a partir del año 1999, de la misma manera que ocurre en el canal de los Mimbrales.

## *Referencias bibliográficas*

Sendra Arce, P.J. 2002. Investigación cuantitativa del transporte de sedimentos no cohesivos en avenidas torrenciales : Aplicación al caso del Arroyo del Partido. Huelva. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid. Pp. 400.

White, K. y El Asmar, H.M. 1999. Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta. *Geomorphology* 29 1999 93–105.