

## **ALGORITMOS DE COMPARACION DE IMAGENES: UN METODO PARA EL ANALISIS DE IMAGENES MULTITEMPORALES EN TELEDETECCION**

**Salvador GIRO; Xavier CATASUS y Jesús BARRIUSO**  
Microm España. Bertrán 35. 08023 Barcelona

### **RESUMEN**

El diseño de un algoritmo de comparación basado en la transformación geométrica de imágenes, utilizando métodos interactivos de selección de puntos de control, o puntos homólogos entre dos imágenes a comparar, permite la evaluación de los cambios ocurridos en una zona concreta durante un periodo de tiempo comprendido entre los momentos de la obtención de las imágenes.

Este algoritmo diseñado en MICROM ESPAÑA para su programa JARS de Teledetección, se puede utilizar con imágenes tomadas desde cualquier medio aerotransportado, y permite, por tanto, la evaluación comparativa entre imágenes de cualquier satélite e imágenes de foto área. Del mismo modo, permite la comparación de estas imágenes con cualquier tipo de mapas o planos de la zona a estudiar.

Mediante este algoritmo y diversas funciones del programa JARS, se ha realizado el estudio evolutivo del delta del Ebro desde el año 1946 hasta la actualidad.

Este estudio se basa en la medida de la variación del área ocupada por el delta durante el transcurso de los años, tanto en sentido positivo como negativo. Se refleja en la variación de la línea de costa y la modificación de las flechas del propio delta.

Las modificaciones más destacadas dentro del estudio son aquellas que corresponden a la evolución de la zona de la desembocadura donde se aprecian claramente las variaciones en el tiempo de la propia desembocadura y de las barras de arena ligadas a procesos de progradación deltaica.

En zonas de estudio como las del delta del Ebro, donde las variaciones topográficas son mínimas, se puede hacer una evaluación aproximativa del volumen de material depositado o erosionado.

Estudios similares en zonas costeras son de gran interés para la evaluación rápida y objetiva de la regresión de la línea de costa por efectos antrópicos, como es el caso de la zona del Maresme en Cataluña, o la evolución y relleno de lagunas costeras (Albufera de Valencia, ...)

**Palabras clave:** Comparación de imágenes, Proceso de imágenes, Delta del Ebro

### **ABSTRACT**

The design of a comparative algorithm based on image geometric transformation, using interactive methods for selection of control points of homologous points between two images to be compared, allows the evaluation of changes that have occurred in a zone of study during the time involved in the obtention of two images.

This algorithm designed by MICROM ESPAÑA for its JARS-remote sensing programme can be used with images taken by any airborne means and, therefore, allows comparative evaluation between any satellite and aerial photo images. In the same way, it allows comparison between these images and any type of map or plan of the zone.

This algorithm and several JARS functions have been utilized to make an evolutionary study of the Delta del Ebro from 1946 up to now.

Such a study is based on the measurement of the variation of the area taken up by the delta, in both positive and negative senses, throughout the years. This is shown in the variation of the shore line and the modification of the arrows of the delta itself. In addition, changes in the river flow have also been evaluated, together with inner lagoons of the delta.

The most remarkable variations within the study are those corresponding to the evolution of the mouth zone, where you can clearly see time variations of the mouth itself and the sand bars connected to delta progradation processes. Similar studies on shore zones are of a great interest for the quick, objective regression of the shore line by antropic effects, such as in the zone of Maresme in Catalonia, or the evolution and filling of such shore lagoons like in the Albufera in Valencia.

**Key words:** Image comparison, Image processing, Ebro delta

## 1. METODOLOGIA

A partir de algoritmos utilizados desde antiguo en proceso y análisis de imagen se pueden hacer estudios cualitativos y cuantitativos de procesos geológicos de corta duración o de carácter catastrófico, partiendo de una secuencia de imágenes multitemporales obtenidas mediante distintos métodos.

En ciencias como la sedimentología y geomorfología se estudia el impacto de los fenómenos de la naturaleza sobre el hábitat humano, así como la influencia de los procesos antrópicos sobre la propia naturaleza. El análisis de series multitemporales de imágenes de una zona, obtenidas por cartografía (mapas actuales o antiguos), por fotografía aérea, o por métodos más modernos, tales como las imágenes tomadas desde satélite, nos facilitan en gran manera la observación de la evolución de una determinada zona de la superficie terrestre. Evidentemente, y debido al corto espacio de tiempo en que nos movemos en la escala geológica, sólo pueden evaluarse mediante estos métodos los fenómenos geológicos de más corto período. Estos fenómenos, pueden ser, entre otros, los efectos de inundaciones, de desplazamientos de tierras, así como la evolución de la línea de costa.

En este estudio nos hemos centrado en una serie de métodos utilizados en análisis de imagen para el estudio cuantitativo de estos fenómenos. Así:

- La obtención de las imágenes.
- El uso de métodos de mejora y preparación.
- Los algoritmos de comparación que permitan resituar las imágenes según coordenadas conocidas.
- Los procesos finales de evaluación cuantitativa de los fenómenos utilizando los métodos de análisis morfológico y morfométrico.

Hemos evaluado, en concreto, la evolución del delta del Ebro desde los primeros momentos en que se conocen documentos históricos hasta la actualidad. Esta zona del territorio español es objeto de estudio desde los últimos veinte años por numerosos expertos, con el fin de conocer el desarrollo del delta de mayores dimensiones del territorio nacional y sus zonas adyacentes.

### 1.1. ALGORITMOS DE PREPARACIÓN DE LAS IMAGENES

Para poder realizar un estudio comparativo correcto de una zona a través del tiempo, mediante imágenes obtenidas de distintas fuentes, es necesario aplicar un proceso continuado de investigación, incorporando tanto conceptos geológicos como recursos del proceso y análisis de imagen.

Es prácticamente imposible llegar a conclusiones concretas si no se dispone de una serie de técnicas de obtención de imágenes susceptibles de ser analizadas de forma digital. Igualmente, es muy difícil hacer un trabajo correcto si las imágenes que se tiene no presentan la suficiente calidad a la hora de ser evaluadas.

Una de las necesidades fundamentales, dentro de este tipo de trabajos, donde se tienen imágenes obtenidas desde distintas fuentes, es poseer todos los posibles métodos de lectura necesarios, rápidos y efectivos.

Mediante el programa JARS realizado por MICROM ESPAÑA, se consigue leer cualquier imagen en cualquier tipo de formato. Como se ha mencionado anteriormente, para el estudio de la evolución del delta del Ebro se ha recurrido al análisis de mapas antiguos, y a fotografía aérea y de satélite. Para incorporar las imágenes fotográficas a la memoria de imagen del ordenador se utiliza un método rápido y efectivo como es la captura de imagen a través de cámara de televisión. Esta captura nos permite, entre otras ventajas, ver la imagen en la misma forma en que va a ser captada, lo cual facilita la rápida obtención

de la zona exacta de imagen que interesa. Asimismo, posibilita la capacidad de orientar la imagen de manera que los algoritmos de comparación de imagen sean más efectivos y rápidos. La captura por cámara de televisión permite, adicionalmente, la entrada en memoria de imágenes en color o en blanco y negro con la mayor facilidad. El programa JARS lleva también incorporadas una serie de funciones que permiten hacer la lectura de las imágenes a partir de un scanner (B/N o Color).

Las imágenes de satélite, así como otras procedentes de medios aéreotransportados (p.e., DEDALUS), pueden llegar a nuestras manos, de dos formas: mediante soporte fotográfico o, habitualmente, mediante soporte magnético en cinta de 8 mm. El programa JARS presenta en su menú de entrada la posibilidad de lectura de cintas en los formatos normales de los distintos satélites comerciales, así como la posibilidad de lectura de cintas no formateadas. Esta lectura incorpora un cómodo sistema que permite seleccionar interactivamente ventanas de interés sobre toda la escena (imagen) compactada.

Una vez cargadas las imágenes en la memoria activa (memoria de imagen) del ordenador, pueden realizarse diversas técnicas de "mejora" y "realce" de las imágenes, para facilitar la posterior evaluación de la evolución o cambio en una zona. En este estudio en particular, se han realizado una serie de procesos selectivos y continuados de mejora. Primeramente, se ha realizado en la mayoría de imágenes un proceso de normalización del histograma de la imagen (figura 2), que produce una expansión de los niveles de gris (o color) hacia los límites del espectro, lo cual equivale a una ganancia en el contraste y definición.

Es muy difícil, en ocasiones, delimitar la zona de transición entre el final de la línea de costa o playa y el inicio del mar. Como consecuencia de la acción del oleaje o incluso la diferencia de profundidad, se crea una zona de transición que dificulta la delimitación precisa de este umbral. Esto ocurre sobre todo en imágenes procedentes de fotografía aérea donde sólo se dispone de una banda espectral lo que imposibilita la realización de combinaciones con distintas bandas para delimitar con mayor precisión el límite tierra-agua. De todos modos, este trabajo se orienta más a un estudio a grandes rasgos de la evolución del delta que a una cuantificación a pequeña escala de esta evolución, la cual se debe llevar a cabo combinando estos métodos con estudios de campo. Para eliminar al máximo estos posibles errores de límites, se han aplicado sobre las imágenes una serie de algoritmos (filtros de paso alto) que permiten suprimir al máximo estos errores. Estos algoritmos han sido aplicados en este orden: Mejora de contornos (se trata de un filtro que mejora el enfoque de la imagen perfilando las indiferencias aparentes entre niveles de gris) y Filtro de delineación que marca de forma notable las mínimas diferencias entre píxeles con distintos niveles de gris. En general, cualquiera de los muchos filtros o convoluciones de imágenes basados en paso alto pueden dar un resultado apreciable para delimitar al máximo y de forma objetiva los límites de la línea de costa.

En ocasiones y debido a la mala calidad de la fotografía como es el caso de las imágenes pertenecientes al vuelo de 1946 (con abundante presencia de nubes), se ha tenido que delimitar una pequeña parte de la línea de costa de forma interactiva (a mano), atendiendo a las referencias obtenidas de mapas de la zona de la misma época. Es evidente, por tanto, que las funciones de edición gráfica de la imagen pueden ayudar, en ocasiones, siempre que se tengan referencias bibliográficas.

## 1.2. ALGORITMOS DE COMPARACION

Después de los procesos de mejora, se procede a la comparación de las imágenes con una imagen patrón. En esta imagen patrón deben conocerse perfectamente las dimensiones, y debe estar corregida geométricamente para poder posteriormente hacer las medidas superficiales con la mayor precisión.

Los algoritmos de comparación de imagen se basan en la selección de puntos homólogos entre dos imágenes (figura 3). El algoritmo se inicia con la selección de las dos imágenes a comparar. Una vez seleccionadas estas dos imágenes pasan de forma reducida a los dos primeros cuadrantes de la imagen de trabajo. Sobre el primer cuadrante (imagen de referencia), se selecciona de forma interactiva una ventana rectangular y, a partir de esta ventana, se realiza un zoom o ampliación que pasa a ocupar el tercer cuadrante de la imagen de trabajo. En el segundo cuadrante, donde se encuentra la imagen a comparar, se selecciona también una ventana que coincida de forma aproximada con la previamente elegida. Como en el caso anterior esta ventana se amplía automáticamente, pasando a ocupar el cuarto cuadrante de la imagen de trabajo. A partir de este momento, se trabaja sobre los cuadrantes ampliados seleccionando alternativamente puntos homólogos sobre las zonas ampliadas de la imagen de referencia e imagen a comparar. Después de haber seleccionado dos parejas de puntos, el algoritmo sitúa automáticamente el punto seleccionado en la imagen de referencia sobre el lugar calculado de la imagen a comparar. Una vez obtenidos los diferentes puntos homólogos de una ventana, se tiene la posibilidad de escoger nuevas ventanas dentro de los dos primeros cuadrantes (imágenes de referencia y a comparar) y continuar la selección de puntos homólogos.

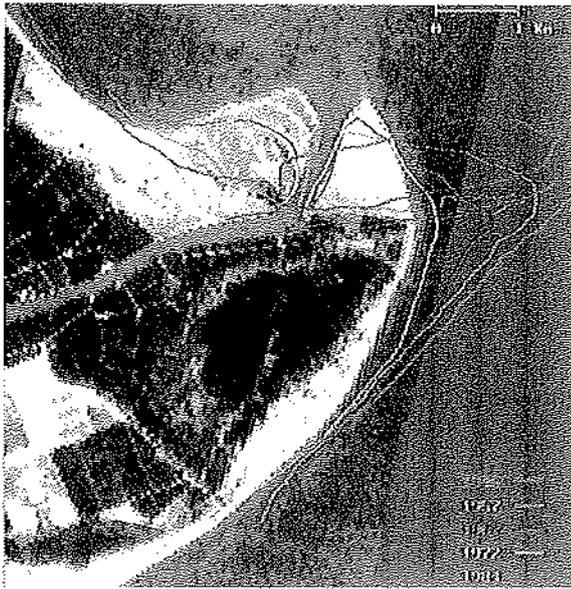


Figura 1.— Evolución de la desembocadura del delta del Ebro (1946, 1957, 1967, 1972, 1984). Superposición de líneas de costa.

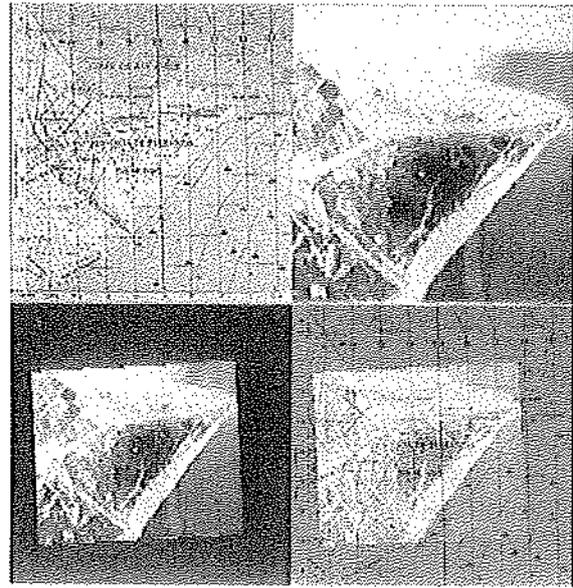


Figura 2.— Imagen original del delta del Ebro tomada desde LANDSAT (1984) con efectos de proceso restaurador.



Figura 3.— Proceso del Algoritmo de Comparación. Imágenes de Referencia y a comparar con selección interactiva de ventanas y zoom.

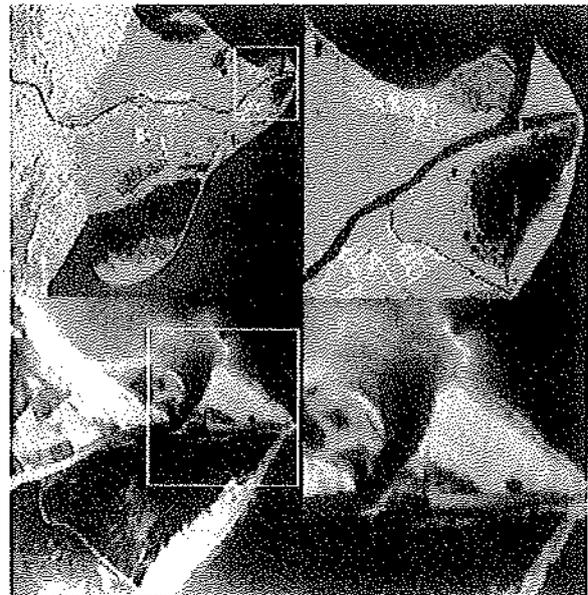


Figura 4.— Mapa del Instituto Geográfico Nacional y su superposición con imagen aerotransportada (1957).

A partir de esta serie ilimitada de puntos homólogos, la función realiza la transformación geométrica de la imagen a comparar mediante la selección del polinomio de orden 1 a 7. Una vez transformada la imagen pasa a ocupar el tercer cuadrante en la imagen de trabajo y la diferencia entre la imagen referencia y la imagen comparada pasa a ocupar el cuarto cuadrante. Estas dos imágenes ocupan, asimismo, dos recintos de memoria previamente seleccionados.

### 1.3. ALGORITMOS DE MEDIDA

Una vez comparadas las distintas imágenes, se obtiene una imagen resultado en la que se reflejan las diferencias. Estas atienden a cambios de niveles de gris y, a partir de ellos, puede procederse a una selección de regiones por discriminación de niveles de gris. Partiendo de esta discriminación o segmentación, se tienen ya de forma binarizada las diferencias entre dos imágenes susceptibles de cuantificación.

El programa de teledetección JARS posee un potente apartado de medida que permite, a partir de una imagen binarizada o de una imagen clasificada, obtener los parámetros morfométricos (área, perímetro, posición en el espacio, dimensiones máxima y mínima, orientación, ...). La medida puede realizarse de forma interactiva, seleccionando de forma manual los objetos a medir, o bien de forma automática, midiendo todos los objetos o clases representados en pantalla. A partir de estos valores se calcula de forma objetiva el rango de evolución de la línea de costa durante largos periodos de tiempo.

## 2. EVALUACION DE LA EVOLUCION DEL DELTA DEL EBRO MEDIANTE ALGORITMOS DE COMPARACION DE IMAGENES

Detallamos, a continuación, la metodología aplicada según los criterios expuestos para el control y evaluación de la evolución del delta del Ebro.

Primeramente, se ha realizado la comparación de una serie de mapas para ver la evolución desde el siglo XV (de esta fecha procede el mapa más antiguo que se ha encontrado) hasta el siglo XVIII (Sorribes, et al. 1984). Este estudio previo ha servido, básicamente, para ver de forma cualitativa la evolución de delta.

Es evidente que los mapas antiguos no poseen suficiente información para poder hacer una evaluación detallada, dado que su realización ha sido hecha sin suficiente precisión. Por otra parte, la situación de los puntos homólogos, no es fácil de localizar en algunas imágenes hasta el extremo de que, en ocasiones, pueden darse por supuestos puntos homólogos en posiciones que difieran apreciablemente con respecto a su localización. Los puntos que se han tomado como referencia de control son las ciudades o pueblos y, en algunos casos, accidentes geográficos. Mediante este proceso se ha podido ver la evolución del delta desde los inicios del siglo XV hasta finales del siglo XVIII.

La primera referencia escrita de la desembocadura del río Ebro se atribuye a Plinio el Viejo (Siglo I). Este describe que: "el río es navegable hasta Varea" (entre Calahorra y Logroño), lo cual confirma que el lecho del río estaba a mayor profundidad que en la actualidad y que, probablemente, la desembocadura debía ser un estuario o una bahía.

Los primeros mapas de los que se tiene conocimiento son del siglo XIII, y en ellos se aprecia ya la desembocadura en forma de delta en un estadio de formación incipiente. Los siguientes mapas de los siglos XV al XVIII ya muestran claramente la progradación. La desembocadura del delta evolucionó desde el siglo XV hasta el XVIII de forma que la llanura deltaica avanzó sobre la plataforma continental y creció la flecha sur, a la vez que se cerraba.

La evolución del delta del Ebro al igual que la de todos los deltas actuales, se inicia al final de la transgresión Flandriense cuando se estabiliza el nivel del mar.

Debido a las características de la zona y del río Ebro en particular, el delta del Ebro se considera un delta dominado por la influencia del río y, en menor manera, por la acción del oleaje y las corrientes (Maldonado, 1972), según la definición evolutiva de los deltas descrita por Coleman y Wright, 1975.

A causa del aporte sedimentario, el delta fue extendiéndose hacia la plataforma continental. La acción antrópica de la tala de árboles en toda la cuenca del Ebro realizada durante varios siglos, provocó una

deforestación excesiva que aumentó la erosión. Este fenómeno incorporó un gran aporte de sedimentos al río y, por tanto, un crecimiento rápido del delta.

La acción de las corrientes de dirección sur hicieron evolucionar el delta, en un primer momento, en forma de flecha hacia el sur y, posteriormente, el dominio del aporte sedimentario generó la forma del delta que conocemos.

A principios del siglo XX y con la construcción de los diferentes embalses en el río Ebro, el aporte sedimentario disminuye al quedar frenado por los propios embalses. Esto contribuye, a partir de este momento, a una retrogradación de delta hasta nuestros días. Por otra parte, la evolución de la desembocadura ha ido paulatinamente migrando hacia el norte con la colmatación de las antiguas desembocaduras.

Durante los últimos cincuenta años la retrogradación del delta ha sido cada vez más importante. Por este motivo, este estudio incluye desde las primeras fotografías aéreas tomadas de esta zona hasta nuestros días.

La información fotográfica de que se dispone se inicia con el vuelo realizado en el año 1946. El estudio evolutivo ha sido realizado con imágenes procedentes de fotografías aéreas de los años 1946, 1957, 1967. Con imágenes de satélite LANDSAT, años 1972, 1981, 1984 y SPOT, año 1987. La base de la información ha sido referenciada sobre el mapa del delta del Ebro del Instituto Geográfico Nacional de 1957 basado en el vuelo del mismo año (figura 4).

La captura de las imágenes de fotografía aérea y mapas se ha realizado con una cámara de TV donde se ha corregido la deformación por deflexión. Las imágenes de satélite han sido obtenidas a partir de la lectura de bandas CCT.

La evolución del delta durante los últimos cuarenta y cinco años ha sufrido notables transformaciones, si bien, en este estudio nos centraremos exclusivamente en la zona de la desembocadura. En el año 1946 la desembocadura tiene una dirección Este claramente definida y se aprecia ya la presencia de una pequeña apertura a poco menos de dos kilómetros hacia el Noroeste. En el año 1957, la desembocadura ya ha cambiado, colmatándose por una barra de arena la zona de la desembocadura anterior y abriéndose la desembocadura actual, con el crecimiento de lo que actualmente se conoce como isla de Buda. En el año 1967, la desembocadura del delta ya posee una forma muy similar a la actual y se ve perfectamente formada la isla de Buda. La evolución sigue hasta nuestros días con el cambio de forma de la isla.

Los cambios más notables suceden por tanto en lo que actualmente es la isla de Buda que ha pasado de tener una forma más o menos alargada en sus orígenes hasta la triangular que presenta en la actualidad. Se desarrollan, asimismo, una serie de flechas en la parte Noreste de la desembocadura actual. Sin embargo, se aprecia un claro retroceso de la línea de costa tanto al norte como al sur de la desembocadura.

Podemos concluir que, a grandes rasgos, se observa la regresión del delta desde el año 1946 hasta la actualidad (ver figura 1, con la superposición de las líneas de costa realizada con los algoritmos de comparación).

En la tabla adjunta se resumen las variaciones del área ocupada por la zona frontal del delta, especificando el entorno analizado. En la zona Norte, frente a la actual desembocadura, se han desarrollado una serie de barras que provocan una progradación evaluada en 1.67 km<sup>2</sup> desde el año 1946 hasta 1984. Durante este mismo período de tiempo, la costa sur de la desembocadura ha retrogradado 2.52 km<sup>2</sup>. Mientras tanto, la isla de Buda ha sufrido un cambio en su morfología, y se ha producido una variación en el área de 2.33 km<sup>2</sup> en el año 1946 a 0.98 km<sup>2</sup> en el año 1984.

TABLA 1

Variaciones del área de distintas zonas de la desembocadura del delta del Ebro desde 1946 hasta el año 1984

FECHA	DES. OESTE	ISLA BUDA	SUR DESEMB.	DIF. ISLA BUDA
1946-84	+ 1.67	-----	- 2.52	2.33 -> 0.98
1957-84	+ 1.47	-----	- 1.95	1.09 -> 0.98
1967-84	+ 0.56	- 0.24	- 1.66	1.22 -> 0.98
1972-84	+ 0.49	- 0.07	- 0.68	1.06 -> 0.98

### 3. CONCLUSIONES

A partir de los distintos algoritmos de proceso, comparación y análisis de imagen se puede evaluar de forma rápida y objetiva la variación de zonas donde ocurren cambios geológicos de muy corto período. Un ejemplo de una de estas zonas es el delta del Ebro.

La evolución histórica sólo se puede hacer sobre datos de mapas y planos antiguos. Aunque a partir de esta información no es posible hacer una evaluación cuantitativa de los cambios sufridos en una zona, si es posible, sin embargo, realizar un estudio comparativo de la evolución para conocer la existencia de una regresión o transgresión y de que forma ha ocurrido con relación al tiempo.

La evaluación cuantitativa sólo puede hacerse con datos fehacientes como las fotografías aéreas e imágenes de satélite. Así han podido observarse en el delta del Ebro los cambios ocurridos sobre todo en la zona de la desembocadura donde ha habido una retrogradación general.

Otras zonas costeras interesantes para este tipo de estudios son, en la costa mediterránea: la Albufera de Valencia, la Costa del Maresme (Cataluña) y el mar Menor en Murcia. En general, todas las zonas costeras factibles de tener una rápida evolución.

### BIBLIOGRAFIA

- Coleman, J.M., and Wright, L.D. 1975. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. In **Deltas, models for exploration**, M.L. Broussard (ed.): 99-149. Houston: Houston Geol. Soc.
- Maldonado, A., 1972. El delta del Ebro estudio sedimentológico y estratigráfico, **Boletín de Estratigrafía. Universidad de Barcelona**. 1: 486 p.
- Sorribes, J.; Grau, J.J.; Margarit, L.; Salvadó, R.; Pallarés, J.M. y García Rodríguez, A., 1984. **Gran Geografía Comarcal de Cataluña. El Baix Ebre i El Montsià** v. 13. (DOS.).

