



ESTABLECIMIENTO DEL RÉGIMEN DE FLUJO EN EL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE FORMAS DE FONDO CON SONDA MULTHAZ

S. Costa¹, J.M. Gutiérrez Mas¹ y J.A. Morales²

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra (Universidad de Cádiz), 11510 Puerto Real (Cádiz). silvia.costa@alumno.uca.es, josemanuel.gutierrez@uca.es.

² Departamento de Geología (Universidad de Huelva), 21007 Huelva, jmorales@uhu.es.

Resumen: Se ha establecido el régimen de flujo en el estuario del Guadalquivir, a través del análisis de los campos de formas de fondo presentes en el lecho del cauce mediante la utilización de la Sonda Multihaz. El estudio ha permitido deducir el régimen de flujo dominante en diferentes tramos del río y establecer el grado de hidrodinamismo que soporta el medio. Los resultados indican un régimen moderado con tendencia al equilibrio, caracterizado por la alternancia de tramos de alta, media y baja energía, consecuencia de las variaciones de la corriente media en cada tramo. El proceso deposicional dominante es el transporte, aunque la erosión y sedimentación también están presentes localmente. Aunque el régimen deposicional esté principalmente controlado por la acción fluvial, dominada ésta por las crecidas estacionales, la acción marina es también un factor esencial de la dinámica de la ría, dominada esencialmente por las mareas. Otro factor, como la acción antrópica, es actualmente determinante, debido a las grandes modificaciones realizadas en la cuenca y en cauce fluvial, tales como, presas y embalses, canales, diques, muelles, esclusas y dragados, que han alterado la fisiografía y el régimen hidráulico y deposicional natural del río.

Palabras clave: Régimen de flujo, formas de fondo, estuario del Guadalquivir, sonda multihaz.

Abstract: The flow regime of the Guadalquivir estuary has been established by means of the analysis of the bedform fields present on the riverbed, using a multibeam echo-sounder. This study allowed to deduce the hydrodynamic dominant regime maintained by the river current in its final tract. The results indicate a moderate flow regime with tendency to the equilibrium, and alternance of high, medium and fluvial low energy sectors. The dominant depositional process is the transport, although local erosion and sedimentation are also present. These processes are mainly controlled, as for the fluvial action, as for the marine one, essentially dominated by tides. The anthropic action is also a decisive factor, because the important modifications carried out in the fluvial basin and the riverbed, such as barrages, channels, dams, jetties, locks and dredging, which have altered the physiography and the natural regime of the river.

Key words: Flow regime, bedforms, Guadalquivir estuary, multibeam echo-souder.

Costa, S., Gutiérrez Mas, J.M. y Morales, J.A. (2009). Establecimiento del régimen de flujo en estuario del Guadalquivir, mediante el análisis de formas de fondo con sonda multihaz. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22 (1-2): 23-42

Edita: *Sociedad Geológica de España*
ISSN: 0214-2708



El objetivo de este trabajo es el establecimiento del régimen de flujo en el curso bajo del río Guadalquivir, como medida del grado de hidrodinamismo que soporta este medio, a través del análisis de los campos de formas de fondo presentes en el cauce del río. Respecto al Régimen de Flujo, se entiende por tal, el nivel de energía que soporta el medio, en función de la corriente. Depende del medio y de los procesos que tienen lugar en el mismo, así como del conjunto de características dinámicas que dan lugar a la formación de unas determinadas formas de fondo o a la ausencia de estas (Swift y Thorne, 1991).

El estudio se ha realizado mediante el registro y medida de los parámetros geométricos y morfológicos de las diferentes formas presentes en el cauce. Se ha utilizado como técnica de registro una ecosonda multihaz. Este sistema, ya utilizado en estudios realizados en el Canal de Bristol y la Bahía de Carmanthen, permite caracterizar el lecho marino a partir de la descripción de las formas de fondo como, olas de arena y megaripples (James y Mackie, 2004).

Estas formas son la consecuencia de la acción de procesos sedimentarios que tienen lugar en el medio (Swift y Thorne, 1991). Brush *et al.* (1966) definen las formas de fondo, como la desviación del sedimento desde un fondo plano visualmente detectable. Dado que existe

una relación entre las los rasgos de fondo y el grado de hidrodinamismo que soporta el medio, el régimen deposicional se ha establecido a partir de los campos de formas presentes en cada tramo estudiado del estuario. Según este modelo, se puede decir que, de acuerdo con el tipo de fondo y la velocidad de flujo, existe un campo de estabilidad para cada forma de fondo (Southard y Boguchwal, 1990). Su estudio se basa en el análisis de las características geométricas de las formas y la medida de parámetros geométricos característicos.

Cada forma o campo de formas, representa unas determinadas condiciones hidrodinámicas, de forma que su presencia refleja la acción de un determinado régimen de flujo (Grant y Madsen, 1982; Van Rijn, 1993; Niesden, 1986; Lee y Hares, 1996). En ese sentido, en ausencia de datos directos de corriente, el análisis de las formas de fondo, puede proporcionar información sobre la velocidad y dirección del flujo y grado de hidrodinamismo que soporta el medio.

Contexto geológico

La zona está localizada en el curso bajo del río Guadalquivir, en su parte navegable, desde la esclusa del puerto de Sevilla a la desembocadura, con una longitud total de 89,156 Km. (Fig. 1). Este río discurre

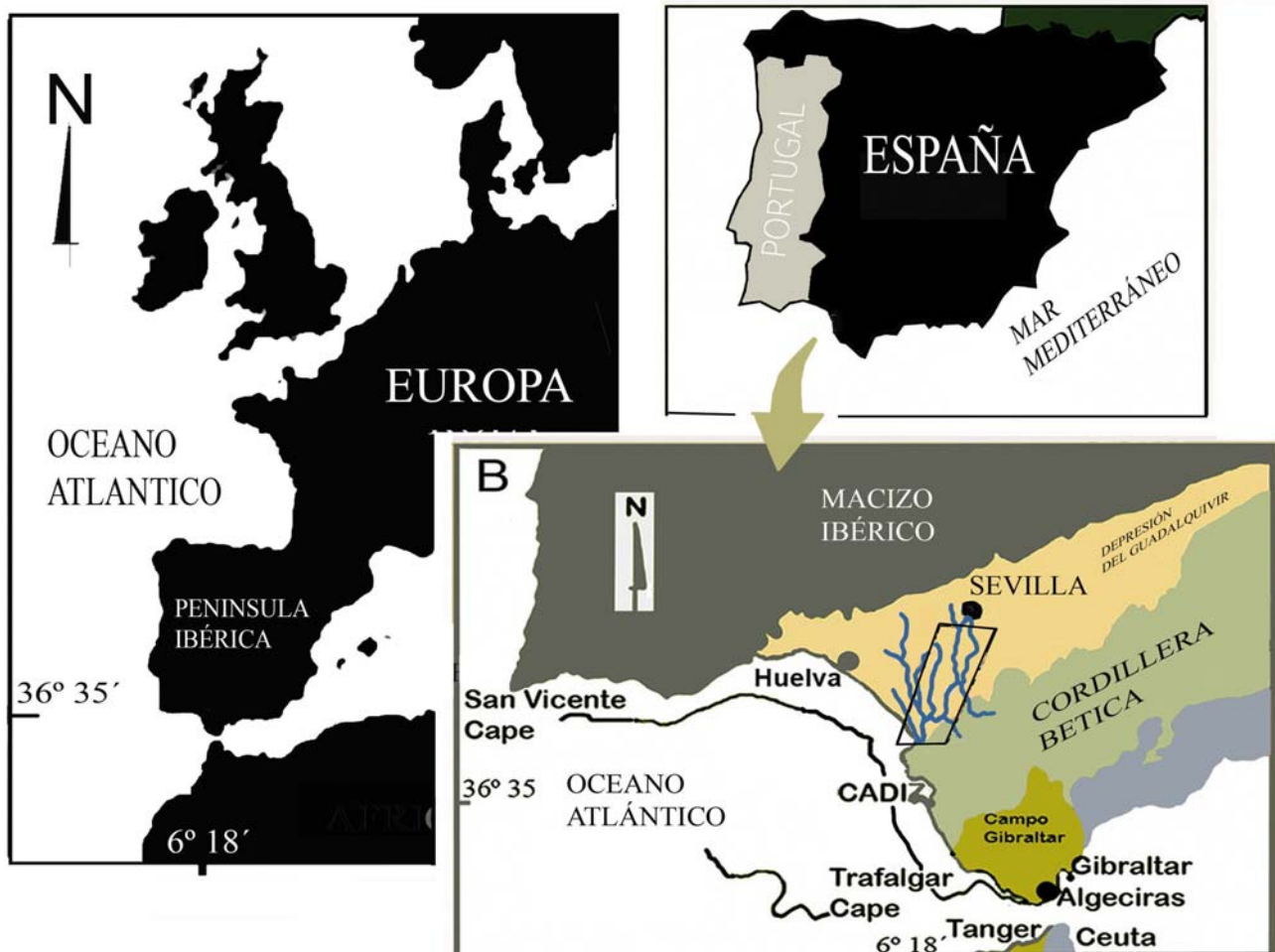


Figura 1.- Mapa de localización de la zona de estudio y marco geológico

por el flanco septentrional de la Cordillera Bética y tiene una longitud de 656 km, desde su nacimiento en la Sierra de Cazorla (Jaén) a Sanlúcar de Barrameda, donde desemboca en el océano Atlántico. En el curso bajo, desde Palma del Río a la desembocadura, el río presenta una pendiente muy suave, y en el último tramo, en la zona de la desembocadura conforma un amplio estuario en el que se ubica el Parque Nacional de Doñana, con anchuras de más 4 km. en la parte distal y de 500 m. en la parte interior.

Bajo el punto de vista geológico, la zona se encuentra en la Cuenca del Guadalquivir, que es considerada una cuenca de antepaís situada al Este de la Cordillera Bética (Fig. 1). En esta cordillera se pueden diferenciar varias unidades (Viguié, 1974). La más próxima a la zona de estudio se encuentra constituida por materiales prerogénicos pertenecientes a diferentes unidades de las Zonas Externas de la Cordillera Bética. Sobre ésta aparecen depósitos sinorogénicos, de relleno de la cuenca, representados por margas de edad Mioceno medio a superior que amalgaman grandes bloques olistolíticos, restos de unidades de la cordillera. Encima, en discordancia sobre los materiales pre y sinorogénicos, aparecen materiales postorogénicos de edad Mioceno superior a Plio-Pleistoceno (Viguié, 1974).

En esta unidad Viguié (1974), diferencia dos sub-unidades separadas por una discontinuidad: una inferior de edad Mioceno Superior, constituida por margas y calcarenitas y conglomerados, y una superior Plio-Pleistocena, constituida por arenas, calcarenitas y conglomerados conchíferos. Estos materiales, a pesar de su carácter postorogénico, están afectados por varias fases neotectónicas reconocidas: una distensiva Miocena-Pliocena, y una compresiva Pliocena-Pleistocena (Viguié, 1974; Benkheilil, 1976; Estevez and Sanz de Galdeano, 1980; Sanz de Galdeano y Lopez Garrido, 1991; Cloething *et al.*, 1992).

Respecto al medio deposicional actual, el estuario del Guadalquivir está controlado, tanto por la acción fluvial, especialmente en momentos de crecidas, como por la marina, dominada por las mareas y el oleaje, que tienen mayor incidencia en las zonas distales de la desembocadura, donde controlan las corrientes litorales y el transporte de arena a lo largo de la costa, que ha dado lugar a la formación de un sistema de flecha-contraflecha litoral (Fig. 2) que limita y protege la parte externa del estuario, lo que permite clasificarlo como un estuario de tipo barrera (Fairbridge, 1980). La progradación apical de la flecha litoral (Punta del Malandar) ha dado lugar al desplazamiento de la desembocadura del río hacia el SE.

Marco hidrodinámico

El régimen hídrico del río Guadalquivir se caracteriza por su carácter estacional, con crecidas en otoño e invierno y estiajes muy marcados. En el curso bajo, el régimen hidrodinámico está controlado por las mareas, gran anchura del cauce fluvial y una menor

pendiente. Por otra parte, en esta zona la influencia antrópica es muy intensa y ha dado lugar a importantes modificaciones del cauce, construcción de la esclusa y los dragados, que mantienen una profundidad constante de 6,5 m. Otros factores antrópicos son la construcción del embalse de Alcalá del Río y la presencia de las cortas y pequeños diques que abastecen de agua fluvial a los arrozales.

El caudal fluvial máximo en crecida es de 5.000 m³/s., y de 183 m³/s. en estiaje. No obstante, se alcanzarían caudales superiores, de no ser por el control que, aguas arriba, ejercen los embalses situados en la cuenca del Guadalquivir.

Las mareas son de tipo semidiurno y de rango mesomareal, atenuándose la onda de marea por efecto de la resonancia provocada por la esclusa del puerto de Sevilla (Álvarez *et al.*, 2001). La máxima velocidad del flujo se alcanza en condiciones de marea viva coincidente con crecidas fluviales, pudiendo alcanzarse hasta 3,21 m/s. (Molini, 1903). En situación de caudales fluviales normales o estiaje, la velocidad de flujo es de 1,54 m/s., con mínimas en situación de marea muerta.

El viento también ejerce una importante acción hidrodinámica. En situación de vientos del Sur y Suroeste, generalmente causantes de precipitaciones en la zona, el río incrementa su caudal (Molini, 1903). El viento ejerce también una acción directa sobre la superficie del agua, provocando oleaje y corrientes que pueden contraponerse o incrementar la fuerza de la corriente mareal.

La temperatura del agua se mantiene entre 10 y 28°C, y no presenta estratificación vertical. No obstante, debido a la proximidad del mar, existe un gradiente salino horizontal desde la desembocadura hasta la conexión sur con la Corta de los Jerónimos, zona a partir de la cual el agua es dulce (Baldó *et al.*, 2000).

Métodos

Campañas de registro y equipos utilizados

Las campañas se realizaron entre Junio y Octubre de 2006, con objeto de realizar la batimetría y obtener los registros. Previamente se realizó un reconocimiento de los hitos topográficos para la medición de la marea y realizar los enlaces altimétricos y batimétricos necesarios. Se ha utilizado la red topográfica de la que dispone la Autoridad Portuaria de Sevilla a lo largo del estuario.

Las campañas se planificaron en función del horario de mareas, fundamentalmente de la pleamar, debido a que el incremento de la altura de la columna de agua, provoca en el registro Multihaz un incremento del ancho de barrido.

Para la realización de los registros, se ha utilizado un transductor multihaz Reson 8125, controlado por una interfase gráfica y dotado de haces enfocados y de 240 haces separados 0,5°. El ancho de barrido es de



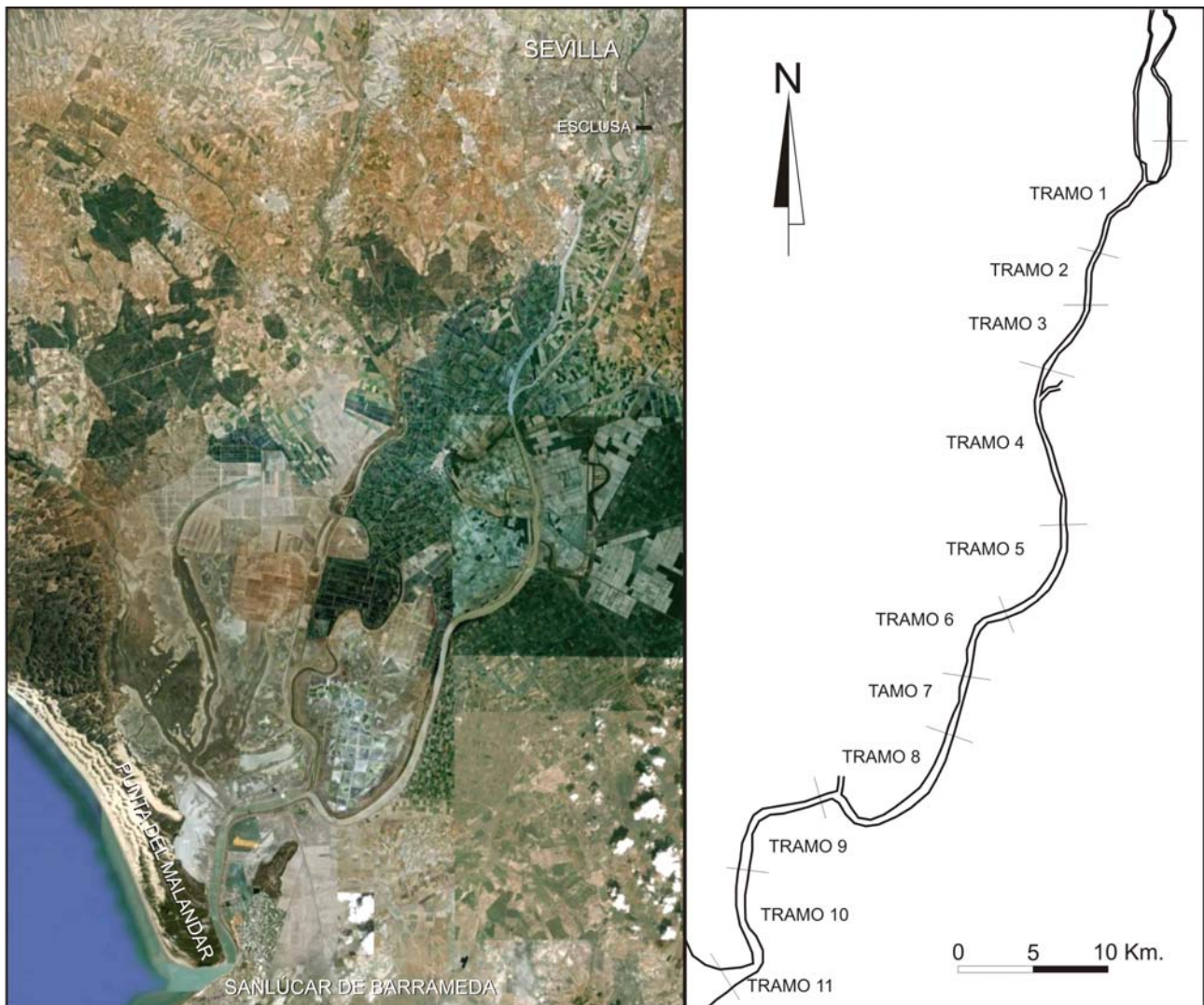


Figura 2.- A) Imagen de la esclusa del puerto de Sevilla (inicio Tramo 1). B) Localización de los tramos diferenciados en el río. C) Imagen de satélite de la zona de estudio.

120° y el ancho longitudinal de 1°, lo que permite un ancho de barrido 3 veces superior la profundidad del fondo que se desea registrar. El procesado se realiza mediante un potente software (Programa PDS2000), que procesa los datos desde su adquisición a la edición y elaboración de planos y cálculo de volúmenes.

Se utilizó un compensador de oleaje y un perfilador de velocidad del sonido. Como sistema de geo-referenciación, se utilizó un sistema diferencial (DGPS). El equipo utilizado ha sido el Trimble DSM-232, de precisión submétrica, que dispone de un amplio espectro de salida de datos como, el NMEA, que soporta el software PDS2000, que combina datos de posicionamiento geográfico con los proporcionados por el transductor multihaz. El compensador de olas TSS Marsh, utilizado, está dotado de giroscópica y permite corregir el movimiento del oleaje, que puede provocar errores de medida de profundidad. El Perfilador de sonido de la columna de agua, modelo SVP 14, permite corregir variaciones de velocidad debidas a la temperatura y salinidad.

Los tramos se han diferenciado en función de los puntos kilométricos (PK), siendo el inicial el PK 0 (cero), localizado en la desembocadura del río. El final se encuentra en el PK 89.156, localizado en la esclusa del puerto de Sevilla. El estuario se ha dividido en 11 tramos (Fig. 2 y Tabla I), y cada tramo en subsectores, éstos seleccionados en función de los campos de formas de fondo encontrados.

Tramo	Punto kilométrico (PK) inicial	Punto kilométrico (PK) final	Longitud del tramo (Km)	Cero hidrográfico (m)	Posición Geográfica Coordenadas UTM (Huso 30S: X,Y)
1	79,05	89,156	10,106	0,571	766267 4136113
2	74,05	79,050	5,000	0,57	760506,69 4125253,11
3	69,1	74,050	4,950	0,57	758335,43 4114318,53
4	58,5	69,100	10,600	0,6	758335,43 4114318,53
5	49,3	58,500	9,200	0,71	741172,14 4087278,13
6	44,7	49,300	4,600	0,83	741172,14 4087278,13
7	38,25	44,700	6,450	0,89	
8	25,15	38,250	13,100	0,95	
9	18,2	25,150	6,950	1,08	741172,14 4087278,13
10	1,7	18,200	16,500	1,17	741172,14 4087278,13
11	0	1,700	1,700	1,54	

Tabla I.- Longitud y límites de los Tramos estudiados y posición geográfica de los ceros hidrográficos de la Ría del Guadalquivir.

Análisis de formas de fondo

El análisis de formas de fondo ha consistido en el reconocimiento de campos de formas de fondo en distintos tramos del río, y el análisis morfológico e hidrodinámico de las mismas. El registro de las formas de fondo se ha realizado a lo largo del eje del canal del estuario. Una vez registrados los datos batimétricos, se realizó un modelo digital del terreno mediante el programa PDS2000, con resolución de 20 cm.

Para tipificar las formas se ha usado la clasificación de Ashley (1990), que incluye la mayor parte de las formas transversales registradas en el cauce (Tabla II), aunque presenta el inconveniente de que sólo distingue entre estructuras de tipo ripple o duna, dejando aparte formas como, antidunas o fondo plano. Esta clasificación utiliza esencialmente dos parámetros: altura (H) y longitud de onda (L), fáciles de medir en el registro multihaz. La división principal se produce entre ripples y dunas, a partir de una altura de cresta (H) de 0.0677 m. y de una distancia entre crestas (L) de 0.8098 m, conocida como relación de Fleming (1988): $H = 0.0677 \times L^{0.8098}$.

Ashley (1990), jerarquizó las formas de fondo transversales basándose en las condiciones del flujo y propiedades del sedimento (Tabla II): a) Las grandes formas transversales, excepto los *small ripples*, tienen un único origen. Su variabilidad refleja la respuesta del fondo a la canalización y fluctuaciones de velocidad, dirección de la corriente y altura de la columna de agua. b) Las formas de fondo mayores se presentan en una sucesión continua de tamaños y no en grupos discretos, es decir, en un mismo fondo se puede encontrar una secuencia de formas. c) La superposición de formas de fondo no implica una diferenciación genética, sino variaciones (estacionales, cíclicas o eventuales) del régimen de flujo.

Para el establecimiento de los rangos de velocidad de flujo correspondientes a cada forma, se ha utilizado el modelo de Rubin (1987), que asocia cada forma de fondo con un rango de velocidad de flujo, altura dinámica de éste y tamaño de grano del sedimento del fondo (Fig. 3A y B). Los cálculos se han realizado para una altura dinámica del flujo de 6 m, ya que, salvo unos pocos casos en los que existen pozas, ésta es la máxima profundidad de la que puede disponer el flujo, debido al control batimétrico que los dragados realizados ejercen sobre el perfil del río. En este sentido, según el modelo de Rubin, en el caso del Guadalquivir, no se dan las condiciones para que se formen antidunas, ya que, para su formación se requiere, además de una gran velocidad de flujo, una altura dinámica inferior a los 6 m. (Fig. 3).

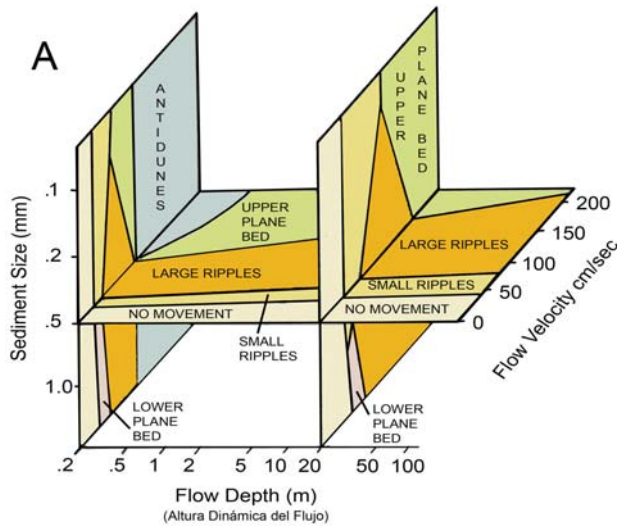
Resultados

En función de los distintos campos de formas de fondo encontrados, cada tramo de río estudiado se ha dividido en sectores. A su vez, cada sector se ha dividido en subsectores (Fig. 2 y Tabla I), que corresponden a un campo de formas de fondo determinado y limitado por formas de fondo diferentes, pertenecientes a subsectores adyacentes. Cada tramo estudiado se ha representado en una figura independiente (Figs. 4 a 14), que incluye, la posición de tramo en el río, el perfil batimétrico longitudinal del cauce, un mapa de campos de formas de fondo dominantes en cada sector, leyenda explicativa e imágenes 3D representativas de las principales formas de fondo. A continuación se describen las características físicas y morfológicas pertenecientes a cada tramo.

DESCRIPTOR DE PRIMER ORDEN				
Tamaño	Pequeño (<i>Small</i>)	Medio (<i>Médium</i>)	Grande (<i>Large</i>)	Muy grande (<i>Very large</i>)
Espaciado (L)	0.6.5 m	5-10 m	10-100 m	> 100 m
Altura (H)	0.075-0.4	0.4.0.75 m	0.75-5 m	< 5 m
Forma	2D (2Dimensional)			
	3D (3Dimensional)			
Descriptor de Segundo Orden				
Superposición	Simple			
	Compuesta			
Descriptor de Tercer Orden				
Perfil (longitud e inclinación de las pendientes de barloflujos y sotaflujos)				
Recubrimiento (<i>Fullbeddedness</i> : Fracción del lecho cubierta por las formas de fondo)				
Estructuras de flujo (Características de Tiempo y Velocidad)				
Esfuerzos relativos de flujos opuestos				

Tabla II.- Clasificación de Ashley de las formas de fondo transversales (modificado de Ashley, 1990)





B

Formas de fondo registradas	Altura dinámica	Velocidad de flujo deducida	Régimen de Flujo
Fondo plano de baja energía (Low Plane Bed)	6 m	0-25 cm/s	Muy bajo
Ripples (Small ripples)	6 m	25-50 cm/s	Bajo
Dunas (Large ripples)	6 m	50-75 cm/s	Alto
Fondo plano de alta energía. (High Plane Bed)	6 m	>75 cm/s	Muy alto

Figura 3.- A) Diagrama de Rubin (1987). B) Deducción de la velocidad de la corriente y del régimen de flujo en función de las formas presentes en la ría del Guadalquivir (modificado de Rubin, 1987).

Tramo 1

Corresponde al canal de Alfonso XII y tiene una longitud de 10.106 m, desde la esclusa (PK 89.141) al PK 79.138 (Fig. 4). Se orienta de Norte a Sur y mantiene una profundidad media de 6 m, excepto en el PK 82, 500 donde se alcanzan los 9 m. Este punto se corresponde con la conexión del canal con el cauce natural del río. En planta, presenta morfología meandriforme, salvo en la zona septentrional, correspondiente al canal de Alfonso XII, que es la entrada al puerto de Sevilla.

El sector septentrional (1A), tiene una longitud de 5035 m, y se caracteriza por la presencia de fondo plano de baja energía (Low Plane Bed). El único flujo posible es el que se genera con la apertura de la esclusa, siendo el proceso deposicional dominante la decantación del sedimento fino en suspensión.

El sector meridional se subdivide en varios subsectores (1B a 1G). El subsector 1B se caracteriza por la presencia de dunas medianas con crestas en fase, de 0,26 m. de altura y distancia entre crestas de 8,90 m. Se observan varias zonas de morfología diferente como, dunas rectas a sinuosos en fase, dunas sinuosas desfasadas y dunas bifurcadas y linguoides (Fig. 4).

El subsector 1C se caracteriza por la presencia de surcos erosivos paralelos a la dirección de la corriente, con profundidad de 20 cm. En el subsector 1D las

formas de fondo dominantes son las dunas grandes, con altura de 0.44 m. y distancia entre crestas de 11,83 m, ligeramente inferior a los valores indicados por Ashley (1990).

Tramo 2

Se han diferenciado 3 subsectores (Fig. 5). El subsector 2A tiene una longitud de 46 m. Las formas dominantes son dunas medianas de 0,28 m. de altura y una longitud de onda de 10 m, sinuosas, en fase, desfasadas y bifurcadas.

El subsector 2B se caracteriza por el predominio de fondo plano de baja energía (Low Plane Bed) aunque también están presentes, dunas en cúspide y montículos alineados. En el subsector 2C las forma dominantes son las dunas medianas, con altura de 0,3 m. y distancia entre crestas de de 9 m, con crestas bifurcadas, e incluso, trifurcadas (Fig. 5).

Tramo 3

Tiene morfología meandriforme y una longitud de 4,973 km, desde el PK 73.949 al 68.976 (Fig. 6). Su profundidad oscila entre 6 y 9 m. Se divide en tres

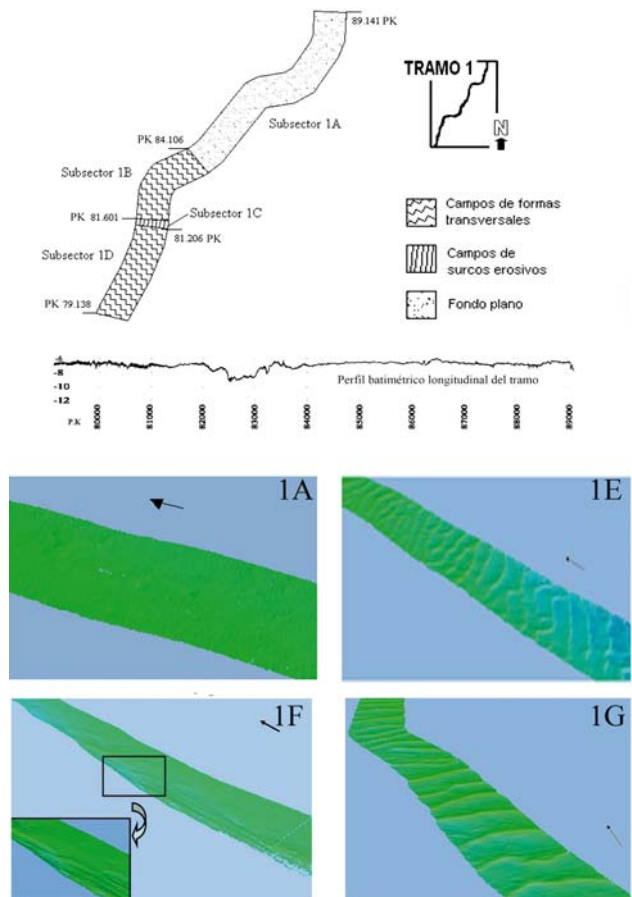


Figura 4.- Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 1 y campos de formas de fondo presentes en los subsectores: 1A, fondo plano de baja energía. 1E, dunas medias sinuosas en fase. 1F, surcos erosivos; a la derecha, fondo plano de alta energía. 1G, dunas grandes.

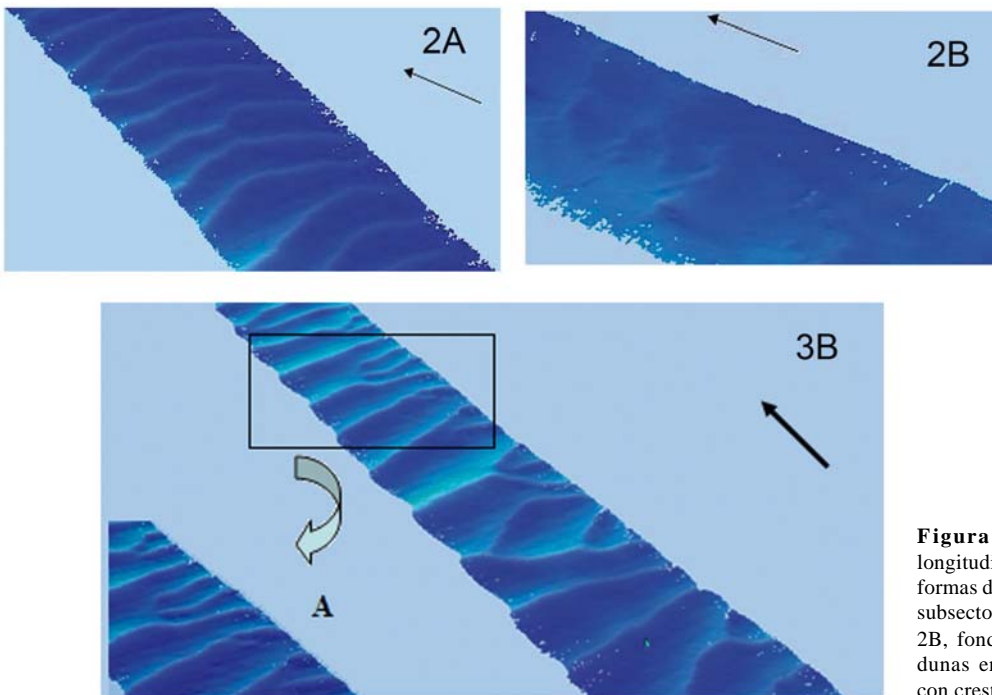
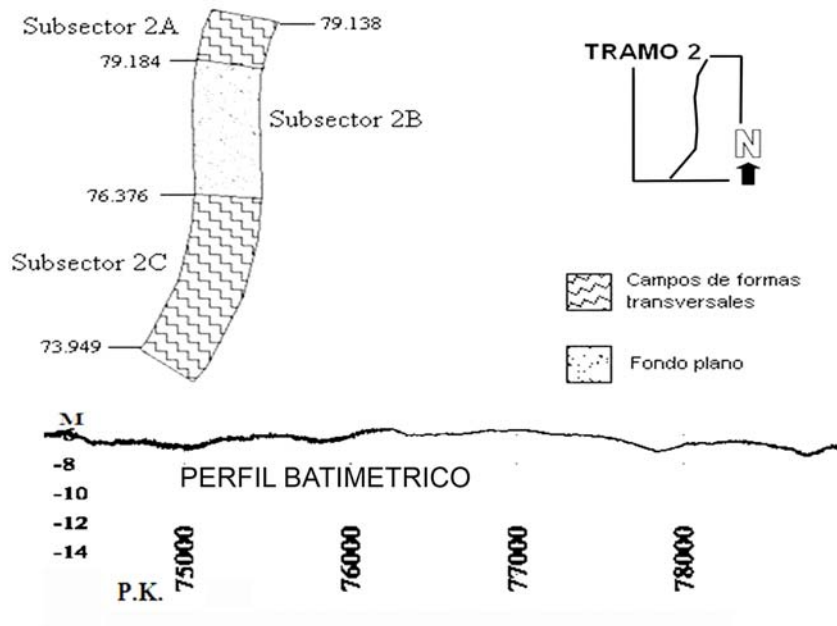


Figura 5.- Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 2 y campos de fondo presentes en diferentes subsectores: 2A, imagen del subsector. 2B, fondo plano de baja energía, con dunas en cúspide. 2C, dunas medias con crestas bifurcadas.

sectores: uno septentrional, con abundantes rasgos erosivos, incluyendo una poza de 9 m. (subsector 3A), uno intermedio caracterizado por formas transversales y uno meridional, caracterizado por la alternancia de *fondos planos de baja energía* y campos de formas transversales. En el segundo subsector, aparece una alternancia de campos de ripples y fondo plano. En los subsectores 3B, 3D, 3F y 3H, las formas dominantes son dunas de tamaño medio, de 0,24 m. de altura, y longitud de onda de 7 a 10 m. En el subsector 3B, las crestas son rectilíneas y en fase, mientras que en el 3D, las crestas son muy sinuosas y bifurcadas. Los subsectores 3F y 3H, presentan campos de dunas con longitud de onda superior a las de los tramos anteriores,

incrementándose la bifurcación de las crestas hacia el sur. Además, se observa la disminución de la altura de las crestas. Los subsectores 3C, 3E, 3G y 3I, se caracterizan por el predominio de fondo plano de baja energía (*Low Plane Bed*).

Tramo 4

Tiene morfología meandriforme y una longitud de 10,906 Km, desde el PK 68.976 al 58.069 (Fig. 7). El perfil batimétrico longitudinal presenta una profundidad media de 8 m, excepto en el PK 65,500 donde se alcanzan 12 m. de profundidad. Se divide en dos sectores: uno septentrional, con alternancia de



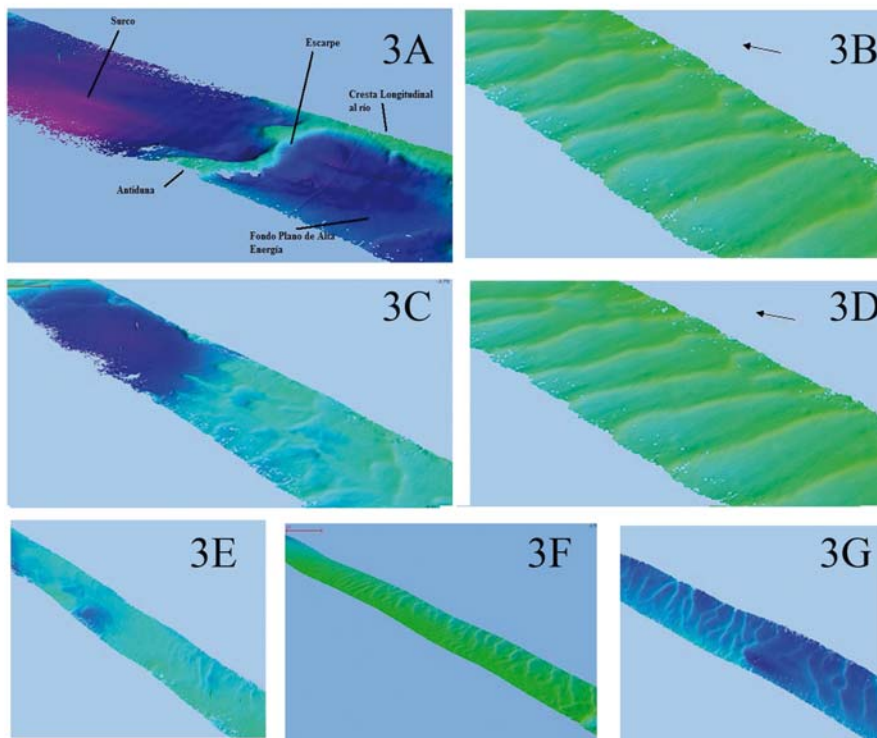
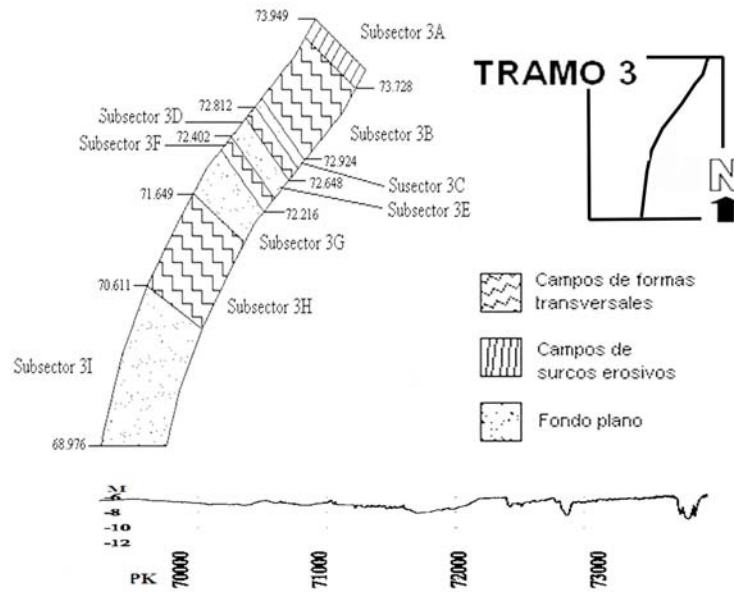


Figura 6.- Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 3 y campos de formas presentes en los diferentes subsectores: 3A, poza. 3B, campo de ripples. 3C, fondo plano de baja energía. 3D, ripples rectos y bifurcados. 3E, ripples y fondo plano de baja energía. 3F, campo de ripples sinuosos y bifurcados y fondo plano de alta energía. 3G, campo de ripples sinuosos y bifurcados.

campos de *fondo plano* (subsectores 4A, 4C, 4E, 4G, 4I y 4K) y campos de formas transversales (subsectores 4B, 4D, 4F, 4H, 4J y 4L) y otro meridional, caracterizado por la presencia de rasgos erosivos y desniveles de hasta 50 cm. (subsector 4M).

El sector septentrional presenta alternancia de campos de dunas sinuosas y en fase con campos sin formas de fondo definidas. Se han diferenciado 12 subsectores. El subsector 4A se caracteriza por la presencia de fondo plano de baja energía (*Low Plane Bed*). El subsector 4B presenta dunas medianas de 0,18 m. de altura y distancia entre crestas de 8,13 m, con

crestas sinuosas en fase, incluyendo algunas pequeñas. En el subsector 4C se observa la presencia de algunas pozas, aunque predomina el fondo plano (Fig. 7). El subsector 4D, se caracteriza por la presencia de campos de dunas pequeñas, de 0,15 m. de altura y distancia entre crestas de 4,84 m, con crestas sinuosas desfasadas y bifurcaciones. En el subsector 4E se observa una pequeña poza, y ausencia de rasgos erosivos. El Subsector 4F se caracteriza por la presencia de campos de formas de pequeñas dunas con bifurcaciones y crestas sinuosas, cuya altura es de 0,11 m. y longitud entre crestas de 3,44 m. En el subsector 4G predomina

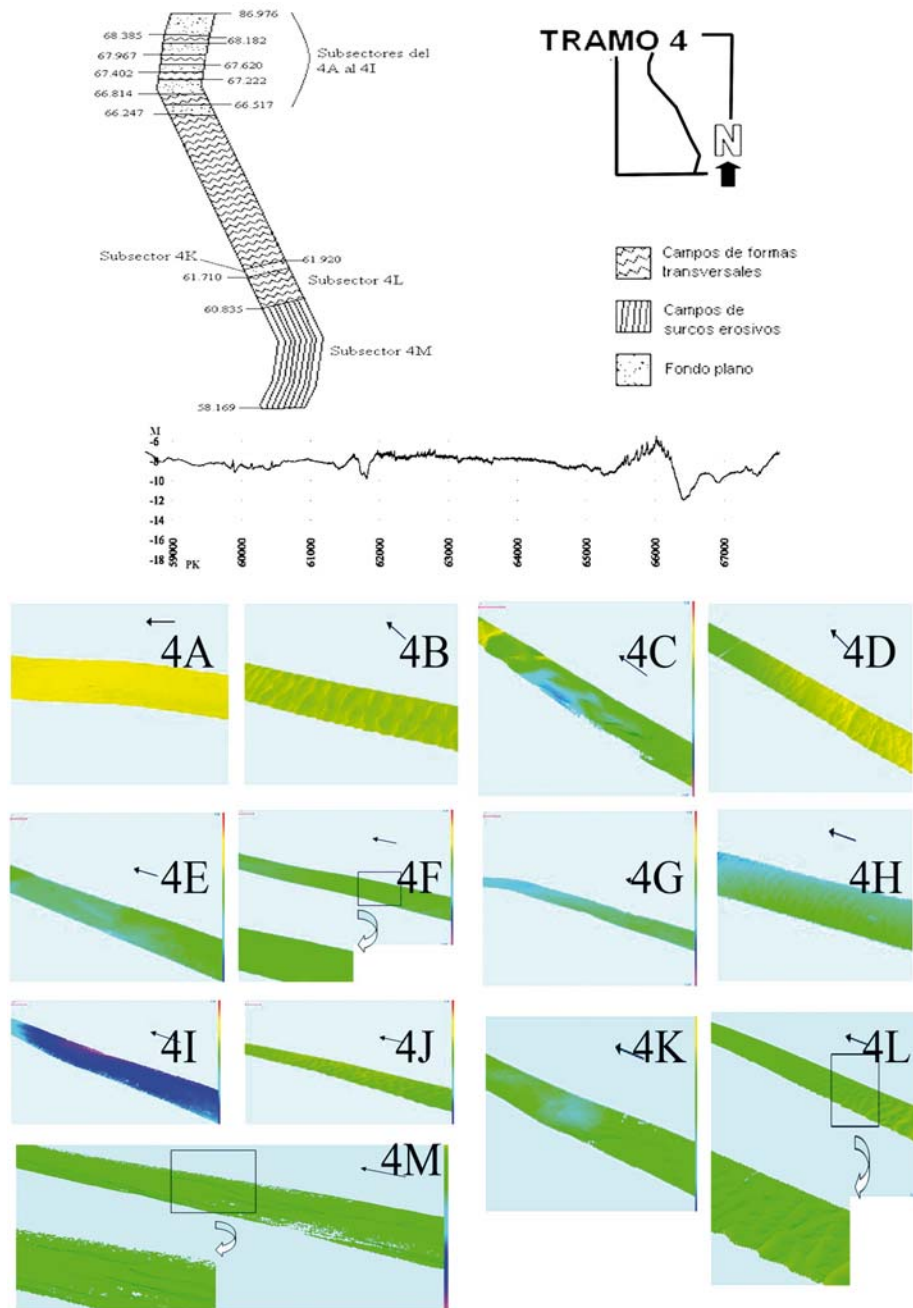


Figura 7.- Perfil batimétrico del tramo 4 y campos de formas presentes en diferentes subsectores: 4A, fondo plano de baja energía. 4B, dunas. 4C, poza y fondo plano de baja energía. 4D, campo de pequeñas dunas de crestas sinuosas desfasadas. 4E, fondo plano de baja energía. 4F, campo de dunas pequeñas sinuosas y bifurcadas. 4G, fondo plano de baja energía, 4H, dunas sinuosas en fase. 4I, fondo plano de baja energía. 4J, campo de dunas medianas con crestas sinuosas en fase. 4L, campo de dunas con crestas bifurcadas. 4K, fondo plano de baja energía. 4M, detalle de los surcos erosivos.

el fondo plano. En el subsector 4H se observan dunas de 0,13 m. de altura y longitud entre crestas de 7,33. En el subsector 4I aparece una poza, pero el resto del subsector está dominado por fondo plano. El subsector 4J, el más extenso de los subsectores del tramo, se caracteriza por un campo de dunas de tamaño medio, con alturas de 0.28 m, y longitud entre crestas de 5,55 m. El subsector 4K tiene una longitud de 210 m. y morfología dominada por la presencia de una poza, así como por la ausencia de rasgos erosivos (Fig. 7). En el subsector 4L las formas dominantes son campos de grandes dunas, con altura de 1 m. y longitud entre

crestas pequeñas, que da lugar a que no se cumplan las proporciones indicadas por Ashley (1990). Finalmente, el subsector 4M tiene morfología meandriforme, con predominio de las formas erosivas, con alturas de hasta 0.50 m.

Tramo 5

Se orienta de Noreste a Suroeste, con una longitud de 8,844 km, desde el PK 58,069 al 49,225 (Fig. 8). Su perfil longitudinal se caracteriza por una suave pendiente y profundidad entre 6 y 8 m. Las formas de

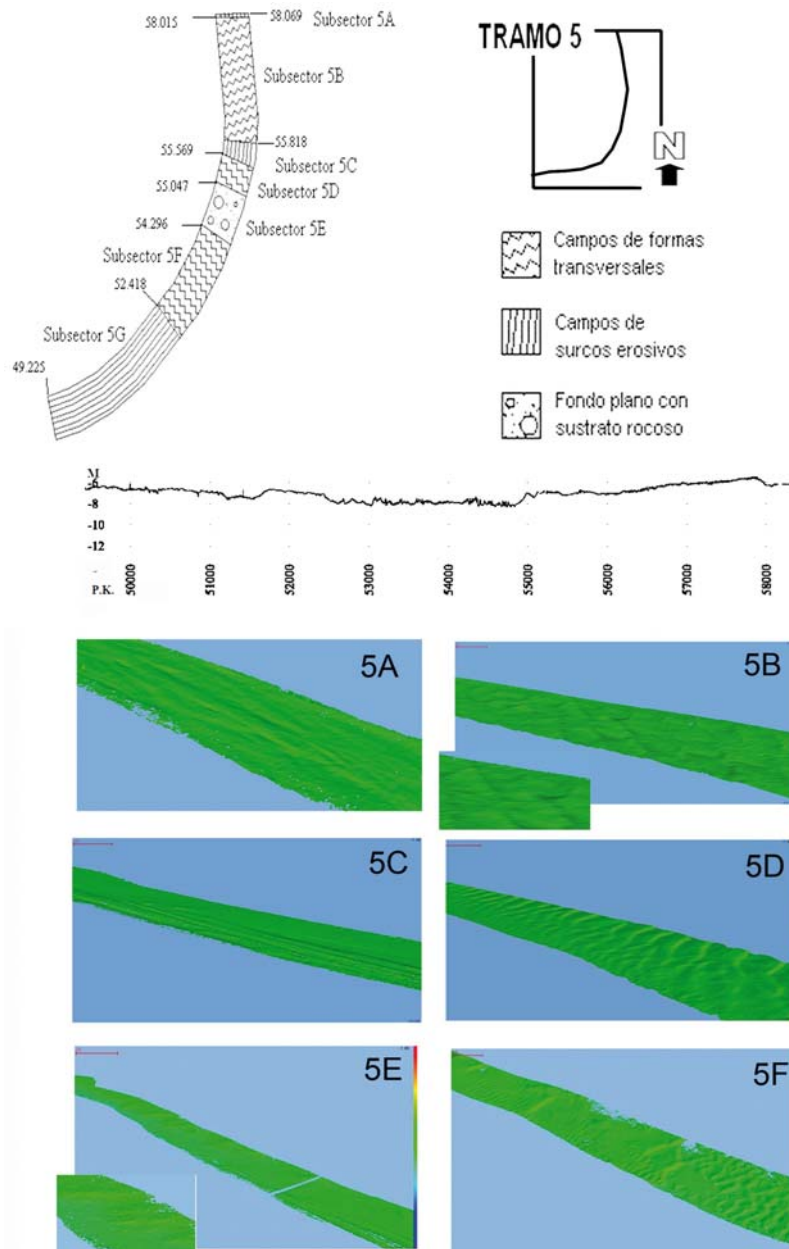


Figura 8.- Perfil batimétrico del Tramo 5 y campos de formas presentes en los diferentes subsectores: 5A, surcos erosivos. 5B, campo de pequeñas dunas sinuosas en fase. Detalle de interferencias entre dunas paralelas al cauce y dunas oblicuas. 5C, surcos erosivos. 4D, dunas medianas. 5E, fondo rocoso. 5F, campo de dunas de tamaño medio. 5G, surcos erosivos.

fondo están representadas por la alternancia de campos de dunas y fondo plano con surcos erosivos. En algunos puntos falta el sedimento y el sustrato rocoso aflora en superficie. Se han diferenciado varios subsectores.

El subsector 5A, está dominado por la presencia de surcos erosivos de unos 20 cm. de profundidad y una longitud de 54 m. El subsector 5B se caracteriza por un campo de dunas. Las dunas tienen una altura de 0,14 m. y distancia entre crestas de 6,13 m, y no cumplen la relación de Ashley (1990). El subsector 5C se caracteriza por ser un campo con rasgos erosivos, con surcos de 20 cm. paralelos a la corriente. El subsector 5D se caracteriza por la presencia de un campo de dunas de crestas sinuosas en fase, de 0,22 m. de altura y distancia entre crestas de 6,43 m. Esta altura clasificaría según Ashley (1990), como una duna pequeña

pero la longitud de onda está dentro del rango de las dunas medianas. El subsector 5E presenta numerosos afloramientos rocosos. El subsector 5F muestra un campo de dunas de de 0,13 m. de altura y distancia entre crestas de 4,12 m. En el subsector 5 G aparecen surcos erosivos (Fig. 8).

Tramo 6

Longitud de 4,724 Km., del PK 49,225 al 44,501 (Fig. 9). Su profundidad varía entre 6 y 11 m. El fondo se caracteriza por la presencia de campos de dunas de tamaño medio con crestas bifurcadas, sinuosas y algo desfasadas. Se encuentran zonas con rasgos erosivos como pequeños lineamientos paralelos a la dirección de la corriente. Se diferencian 6 subsectores.

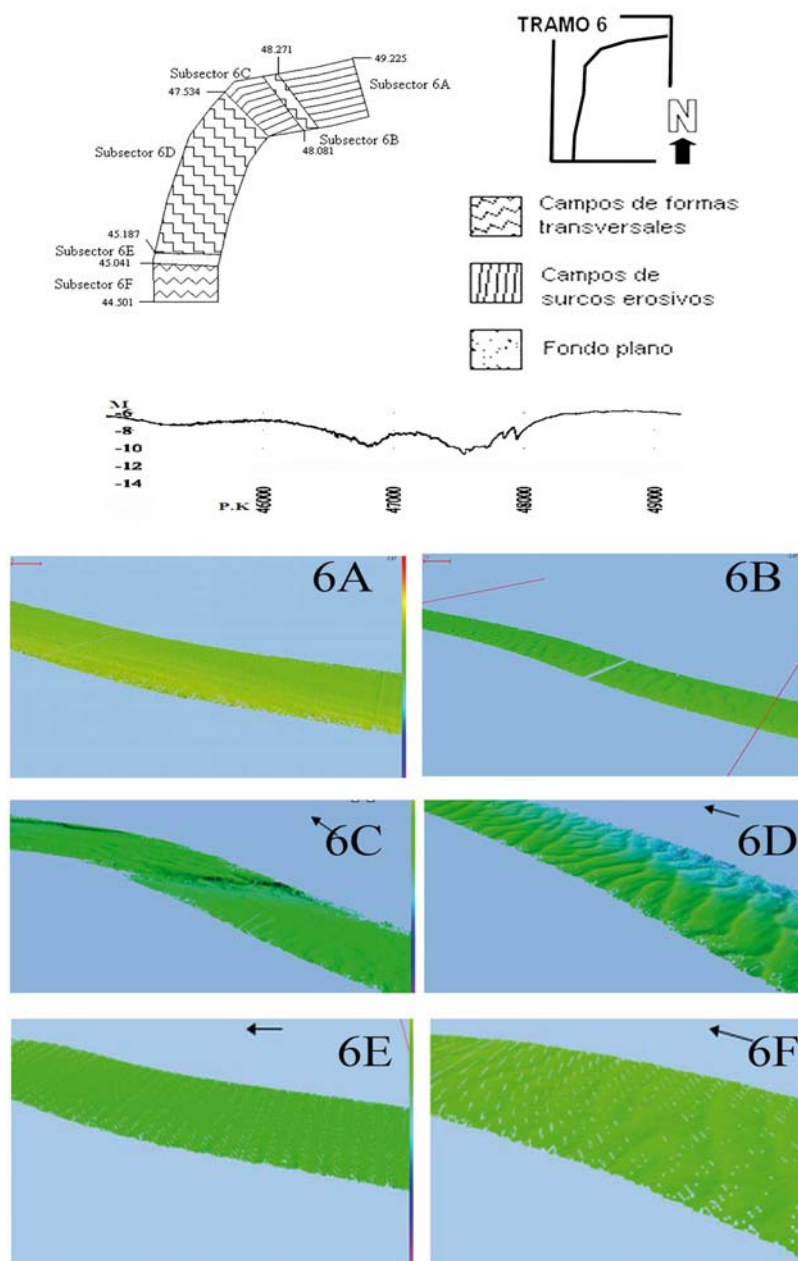


Figura 9.- Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 6 y campos de formas presentes en diferentes subsectores: 6A, surcos erosivos. 6B, campo de dunas pequeñas. 6D, campo de dunas medianas. 6C, surcos erosivos paralelos al cauce del río. 6E, fondo plano de baja energía. 6F, campo de dunas.

El subsector 6A se caracteriza por la presencia de surcos erosivos, como el tramo anterior. El subsector 6B se encuentra al principio del meandro y se caracteriza por un campo de dunas de tamaño medio, con alturas de 0,13 m. y distancia entre crestas de 6,15 m, con crestas sinuosas en fase. En el subsector 6C aparecen surcos erosivos de 0,80 cm. de escarpe paralelos a la corriente. El subsector 6D contiene dunas de tamaño medio con crestas sinuosas desfasadas de 0,23 m. alto y una distancia entre crestas de 6,24 m. (Fig. 9). El subsector 6E no muestra formas erosivas evidentes en el fondo. El subsector 6F muestra un campo de dunas pequeñas, de 0,10 m. de altura y distancia entre crestas de 6,54 m.

Tramo 7

Este tramo va desde el PK 44,501 al 38,112, con orientación Norte-Sur y una longitud de 6,389 Km. (Fig. 10). El perfil batimétrico longitudinal comienza con una profundidad de 6,5 m. y pendiente suave hasta los 9 m. Se caracteriza por campos de *dunas* de tamaño medio, con alturas de 0,20 a 0,30 m. y distancias entre crestas de 4,3 a 7,56 m. También se observa un incremento de la sinuosidad de las crestas y las bifurcaciones.

Tramo 8

Tiene una longitud de 11,986, desde el PK 38,112 al 26,136 (Fig. 11). Su perfil batimétrico muestra una



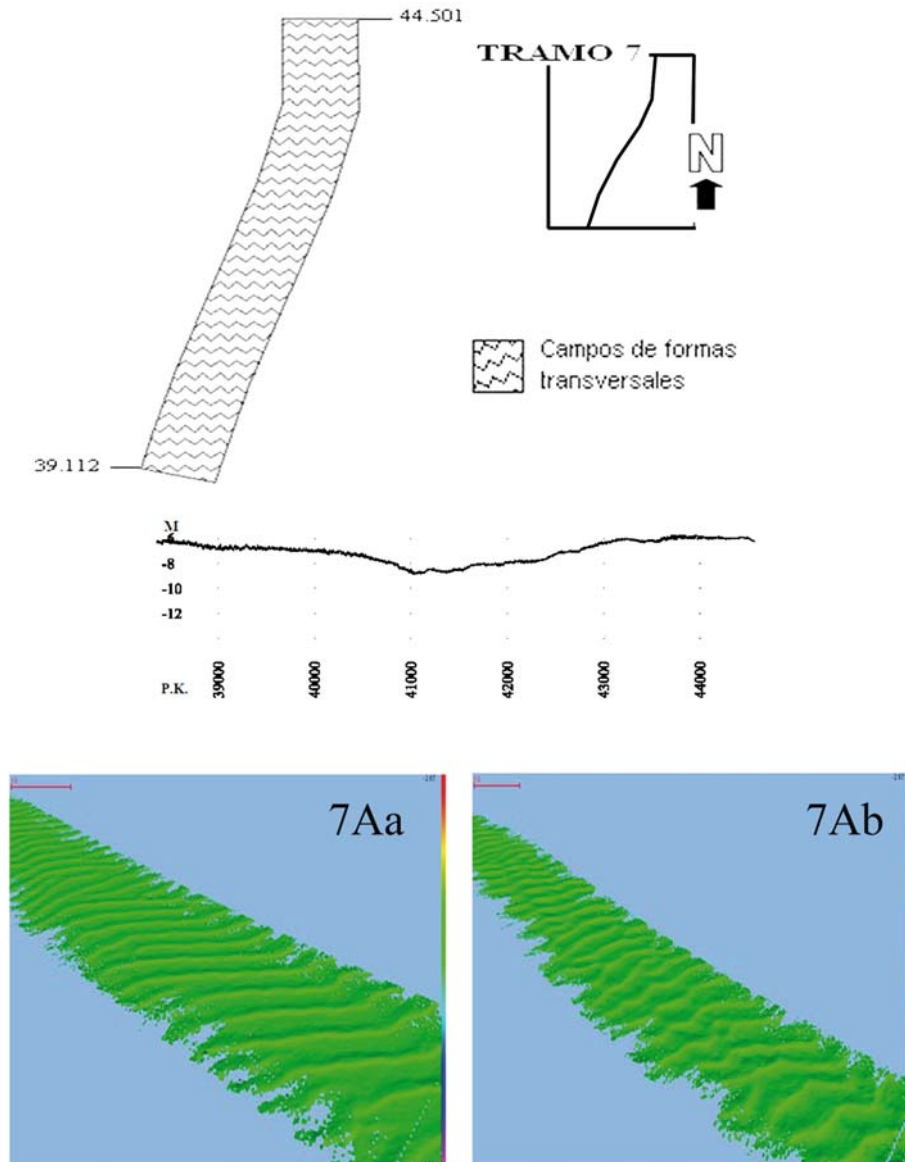


Figura 10.- Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 7 y campos de formas de fondo presentes en los diferentes subsectores: 7Aa, campo de dunas medias sinuosas en fase. 7Ab, campo de dunas sinuosas con crestas bifurcadas.

profundidad media de 7 m. Este tramo se divide en dos sectores: uno septentrional, caracterizado por una pendiente suave desde 7 a 8 m. y otro más abrupto donde aparecen 2 pozas, de 14 y 19 m. de profundidad máxima. La morfología es meandriforme con un arco pronunciado de 90° de Norte a Oeste. Un factor condicionante es la desembocadura del afluente “Brazo de la Torre” en el PK 38,700. En cuanto a la morfología del fondo, están presentes campos de ripples, surcos erosivos y, cerca de la desembocadura del “Brazo de la Torre”, afloramientos rocosos.

Se divide en 8 subsectores. En el subsector 8A se presentan campos de dunas de tamaño medio con altura de 0,26 m. y distancia entre crestas de 5,17 m., con crestas sinuosas en fase. El subsector 8B está dominado por surcos erosivos paralelos a la corriente, con escarpes de 60 cm. (Fig. 11). El subsector 8C presenta campos de dunas de tamaño pequeño y medio, con

altura de 0,24 m. y distancia entre crestas de 5,66 m., con crestas sinuosas desfasadas y con bifurcaciones. El subsector 8D presenta fondo plano de baja energía y fondo rocoso. En el subsector 8E se observa un campo de dunas con altura de 0,18 m. y distancia entre crestas de 6,17 m., con crestas poco sinuosas en fase.

Tramo 9

Se inicia en el PK 26,136 y termina en el 13,655, con una longitud de 7,481 Km. (Fig. 12). En el primer tercio, el calado del río disminuye hasta los 4 m., mínimo del estuario (PK 23,000). En el segundo tercio, la profundidad se incrementa hasta los 14 m. (PK 19,500), pero recupera los 7 m. en el tramo final. Su morfología en planta es inicialmente rectilínea pero termina con un meandro de 100° de arco al final del tramo.

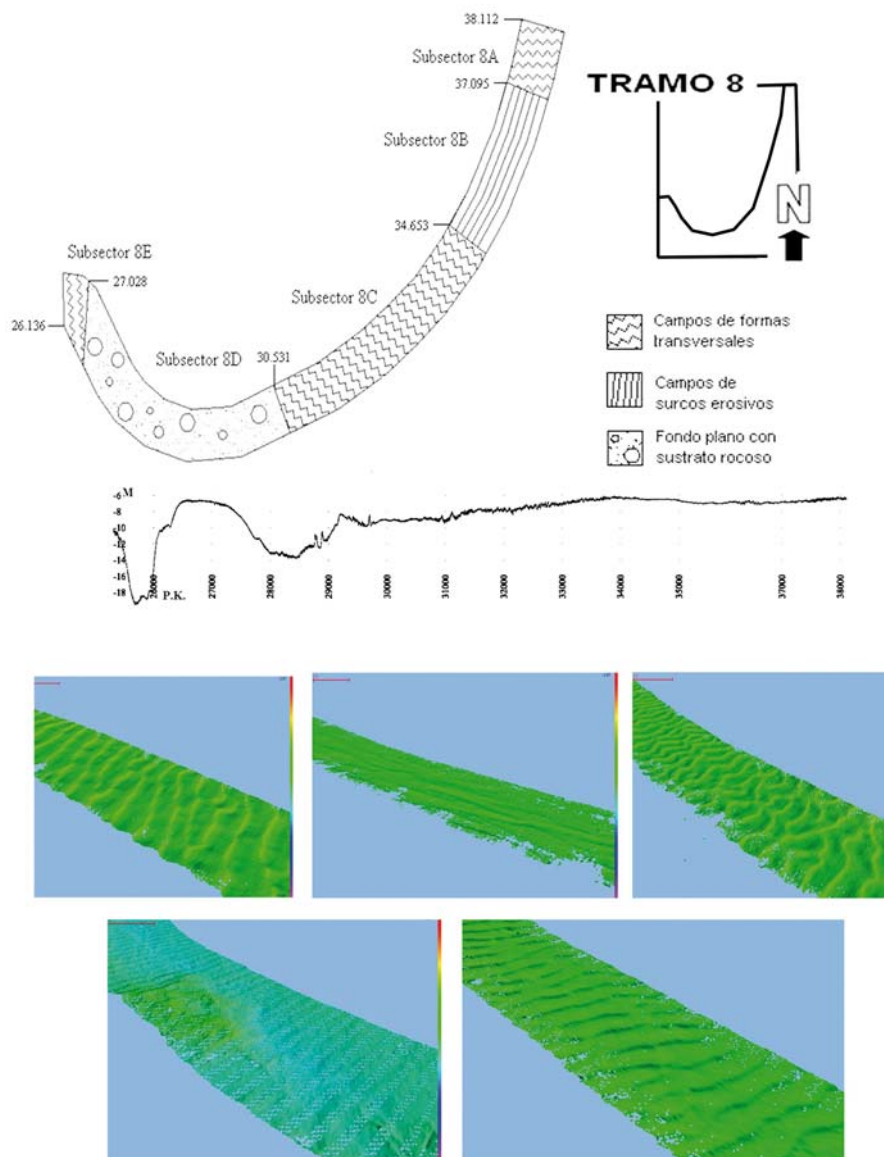


Figura 11. - Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 8 y campos de formas de fondo en los diferentes subsectores: 8A, campo dunar (continuación del campo anterior. 8B, surcos erosivos. 8C, campo de dunas pequeñas sinuosas. 8D, afloramiento rocoso. 8E, campo de dunas.

En el subsector 9A predominan los campos de formas de fondo transversales, como *dunas* de tamaño medio y pequeño con altura de cresta desde 0,17 a 0,29 m. y distancia entre crestas desde 4,87 a 7,28 m. La dirección de las crestas es constante en todo el tramo y las crestas son ligeramente sinuosas e incluso se bifurcan pero su tren de dunas se mantiene en fase. En el subsector 9B dominan los surcos erosivos de 0,90 m. de profundidad, paralelos al canal. El subsector 9C se caracteriza por un campo de dunas medias, con altura de 0,29 m. y distancia entre crestas de 5,76 m.

Tramo 10

Se encuentra en la zona de inicio de la desembocadura, siendo el tramo más largo del estuario, con una longitud de 16,686 Km, desde el

PK 18,655 al 1,965 (Fig. 13). Su perfil batimétrico es muy regular sosteniendo la profundidad de 6 m., aunque al final del tramo se alcanzan los 14 m. En la margen derecha el canal está limitado por un sistema de dunas eólicas costeras, perteneciente al Parque Nacional de Doñana. El tramo se ha dividido en 2 sectores bien diferenciados. Uno septentrional, en el que dominan los campos de ripples y otro meridional, con surcos erosivos y afloramientos rocosos.

El subsector 10A es un gran campo de dunas de tamaño medio, con altura de 0,25 a 0,30 m. y distancia entre crestas de 5 a 8 m. En el sector 10B la morfología del fondo está dominada por surcos erosivos de 10 a 20 cm, paralelos a la corriente y al eje del canal. Además, aparecen afloramientos rocosos en el fondo, debido, probablemente a las recientes operaciones de dragado realizadas.

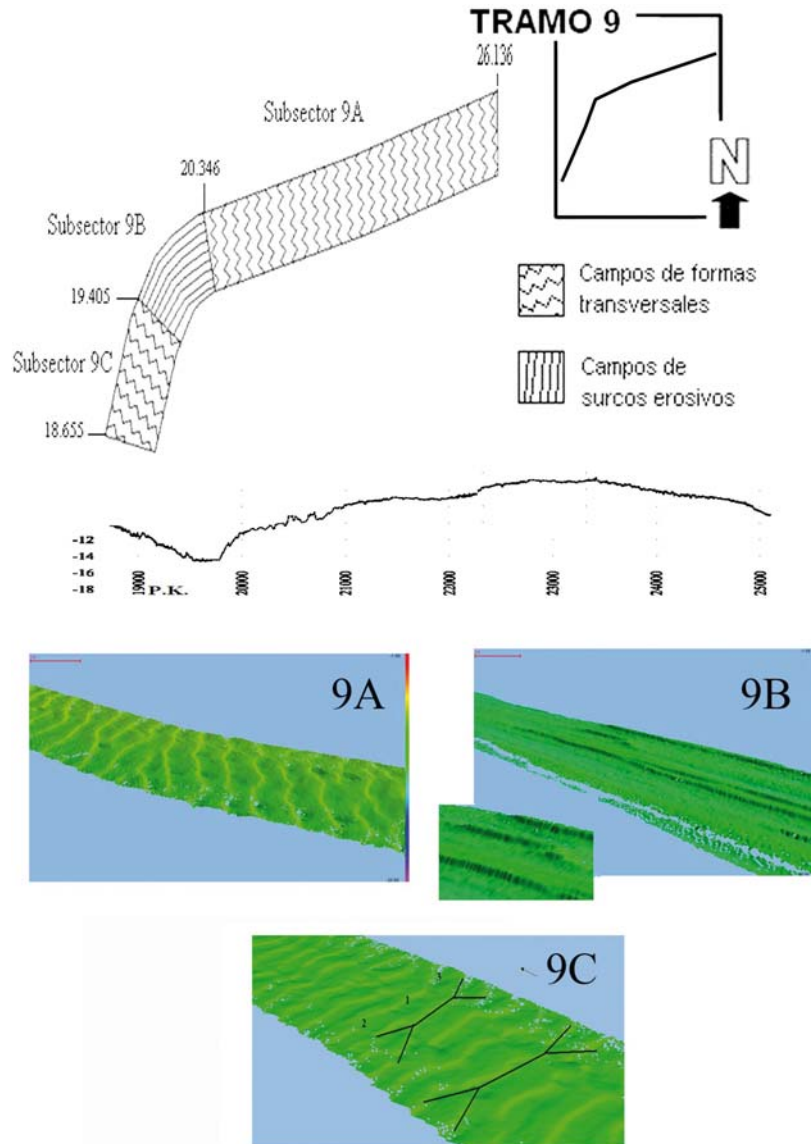


Figura 12.- Perfil batimétrico del Tramo 9 y campos de formas presentes en diferentes subsectores: 9A, campo de dunas. 9B, surcos erosivos. 9C, campo de dunas medias. Las zonas 1, 2 y 3 representan zonas de diferente régimen de flujo.

Tramo II

Este tramo, de morfología rectilínea, es el más corto, con 1,965 Km. de longitud y finaliza en la desembocadura (Fig. 14). Su perfil batimétrico comienza con una poza de 9 m. de profundidad y termina con un fondo plano de 7 m. de profundidad, con 3 tramos bien diferenciados.

En el subsector 11A dominan los *surcos erosivos* y los afloramientos rocosos. El subsector 11B se caracteriza por un campo de *dunas* medianas con altura de 0,34 m. y distancia entre crestas de 5,86 m., con crestas rectas poco sinuosas y en fase. El subsector 11C está dominado por fondo plano sin marcas de erosión.

Interpretación y discusión

El estudio de los campos de formas de fondo es una herramienta eficaz para establecer el régimen de flujo de un medio, cuando no se disponen de datos directos

de la corriente (Fig. 3). Su uso se basa en el principio de uniformitarismo, ya que éstas son resultado de la acción de un determinado flujo, caracterizado por unas determinadas propiedades físicas, tales como, velocidad, viscosidad, densidad y altura dinámica, y unas determinadas características del fondo. La permanencia o evolución de las formas de fondo dependerá de la relación entre la magnitud del flujo que las produzca y de los eventos posteriores. La preservación será alta si las formas las produjo un flujo muy energético y posteriormente no hay otros de superior o igual intensidad, que destruya o modifique las formas preexistentes. En este sentido, puede ser una herramienta eficaz para establecer el régimen de flujo cuando no se disponen de datos directos sobre las corrientes que actúan en el medio.

En el caso de los fondos del cauce del estuario del Guadalquivir, los resultados muestran el predominio de campos de dunas (Figs. 4 a 14). Estas formas son típicas de los sistemas muy energéticos, tales como los

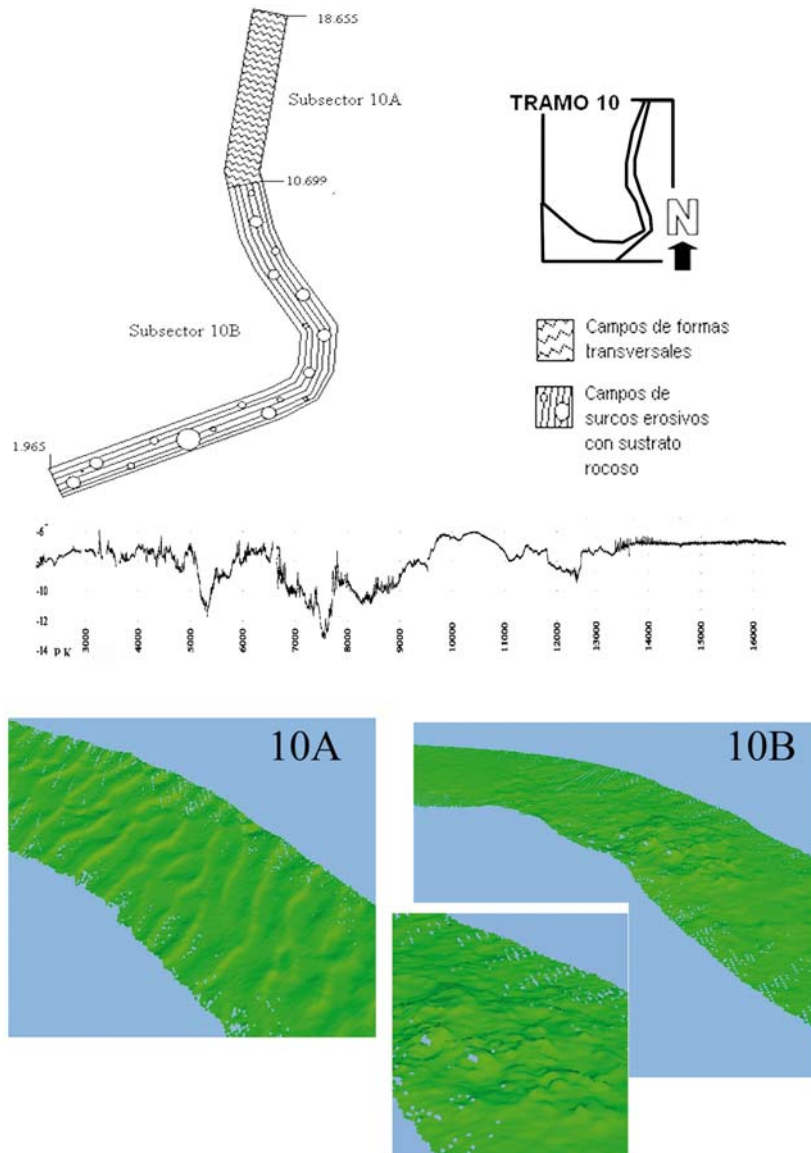


Figura 13.- Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 10 y campos de formas de fondo en diferentes subsectores: 10A, imagen. 10B, afloramiento rocoso y detalle.

fluviales de tipo trenzado (*Braided*), es decir, cursos de agua de múltiples canales de baja sinuosidad o también los canales costeros de sistemas macromareales. Los canales *braided* con carga en suspensión de arena, suelen mostrar, tanto formas simples como complejas de gran tamaño, megaripples de crestas sinuosas, con altura media de 1,5 m. (Arche, 1989), los canales mareales de alta energía muestran igualmente megaripples y olas de arena de dimensiones parecidas a las estudiadas en el presente trabajo (e.g. Chappel y Woodroffe, 1994; Perillo, 1995).

En el caso del Guadalquivir, los resultados indican que la mitad sur del estuario, por su comportamiento hidrodinámico y formas de fondo observadas, se aproxima a este tipo de canales en cuanto a la energía. No obstante, existen diferencias significativas respecto a los canales de tipo trenzado, ya que el curso bajo del río Guadalquivir no es un sistema multicanal. En este sentido, en tiempos pasados, la ría del Guadalquivir fue un complejo sistema de canales que discurrían por

la actual zona de marismas, de los que actualmente sólo quedan dos: el Brazo de la Torre y el Brazo del Este, aunque la morfología de estos canales por su elevada sinuosidad sería más parecida a la de un sistema anastomosado. Otras diferencias están relacionadas con un calado y pendiente diferente a las de los sistemas *braided*, debido a las continuas operaciones de dragado periódicamente realizadas. Respecto a los sistemas canalizados macromareales, se presenta una mayor similitud, salvo por el hecho de que esta costa es mesomareal, sin embargo, el alto grado de canalización hace que la relación entre sección de canal y rango mareal pueda ofrecer corrientes elevadas, especialmente en el sentido del refujo.

Formas de fondo y Régimen de Flujo

Los procesos deposicionales dominantes en medios fluviales son los de fricción con el fondo, que dan lugar al transporte de sedimentos y formación de formas de

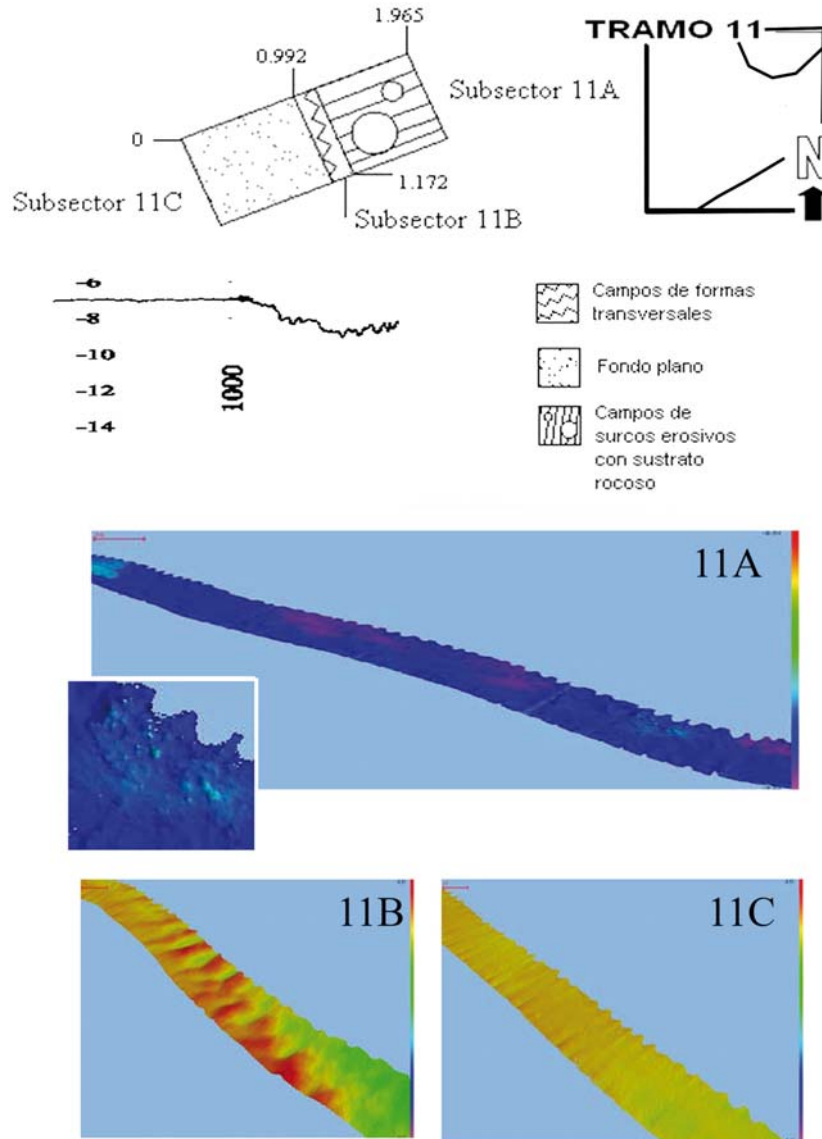


Figura 14.- Perfil batimétrico longitudinal del Tramo 11 y campos de formas en diferentes subsectores. 11A, detalle de un afloramiento rocoso. 11B, campo dunar. 11C, fondo plano.

Formas de Fondo (Bedforms)	Parámetros geométricos			Parámetros del flujo								
	Distancia Wavelength (m)		Altura Height (m)	Índice de rizadura Ripple Index (L/H) ¹	Velocidad Speed (cm/s) ²	Tamaño de grano Grain size (mm.)	Altura dinámica Flow Depth	Tensión de cizalla Bed Shear Stress ³				
Fondo plano de Baja Energía Low Plane Bed	-		-	-	0-25	>0,5	-	0,1-0,8				
Ripple	<0,6		<0,06	0-40	25-50	0,05-1,5	0,25-0,45	0,1 – 2				
Mega-ripple ⁴	Dunas pequeñas ⁵ Small Dune	0,6-10	0,6-5	0-50	40 -170	0,2-1,5	>0,25	0,7 – 10				
	Dunas medianas Medium Dune	5-10	0,25-0,5									
Sand-wave	Dunas grandes Large Dune	10->100	10-100	0-50					40 -170	0,2-1,5	>0,25	0,7 – 10
	Dunas muy grandes Very Large Dune	>100	>100									
Grandes formas Sandbanks o Sandbars	-		5-500	30-90	-	-	-	-				
Fondo Plano de Alta Energía Upper Plane Bed	-		-	-	100-180	0,2-1,3	-	>2				
Antidunas Antidunes	0,1-1		0,01-1	-	>180	-	0,25-2	-				

Tabla III.- Clasificación de las formas de fondo según sus parámetros geométricos y de flujo. ¹ Costello *et al.* (1974). ² Diagrama de Rubin y diagramas de campos de estabilidad de Southard y Boguchwal (1990). ³ Costello (1974), Guy (1966), Manz (1978) y Williams (1970), Leeder (1980). ⁴ Dalrymple (1978). ⁵ Ashley (1989).

fondo. Estas formas se distribuyen paralelas a la dirección del flujo y dan lugar a una secuencia de formas que indica la trayectoria y la fluctuación de la velocidad de la corriente.

En el caso de medios fluviales con influencia marina, como el estuario del Guadalquivir, las condiciones de flujo pueden cambiar en un corto periodo de tiempo, debido a la acción mareal, pero, también en periodos más largos, debido a las variaciones de caudal de carácter estacional. Así, factores como, caudal fluvial, rango mareal, variaciones de temperatura y salinidad del agua, pueden afectar al régimen de flujo, a través de los cambios que provocan en la velocidad de la corriente y en la densidad y viscosidad del agua.

Si se tiene en cuenta el conjunto del estuario del Guadalquivir, éste se caracteriza por el predominio de formas de fondo de tipo duna con alturas de 0,10 a 0,40 m. y distancia entre crestas de 4 a 17 m. (Figs. 4 a 14), que indican una velocidad media del flujo para el conjunto de 69.47 cm/s (Fig. 3). Esta velocidad promedio, indica un régimen de flujo medio para el conjunto del sistema estudiado.

Régimen de Flujo en los diversos tramos del río

El Tramo 1 se caracteriza por el predominio de *dunas medianas*, aunque al principio del tramo aparece *fondo plano de baja energía* que indica una velocidad de flujo en el primer subsector (1A) de 25 cm/s (Fig. 4). Esta baja velocidad, puede estar relacionada con la existencia de una parte canalizada y separada del cauce natural del río, que es por donde se produce la navegación fluvial hacia la esclusa del puerto de Sevilla, siguiendo la Corta de Alfonso XIII, que no está afectada por los agentes hidrodinámicos habituales, sino solamente a la velocidad adquirida por el flujo de agua durante las mareas. En el resto, predominan las dunas de tamaño medio, que indican velocidad de flujo de 75 cm/s, con alternancias de *fondo plano de alta energía*, que indican puntas de velocidad del flujo de 100 cm/s. La velocidad media del flujo es de 68.75 cm/s, y el régimen de flujo de tipo medio, ligeramente por debajo del régimen medio del río, carácter oscilante y tendencia a incrementarse aguas abajo.

El Tramo 2 (Fig. 5), se caracteriza por la presencia de campos de *dunas medianas*, con velocidad de flujo asociada de 75 cm/s, y zonas de predominio de *fondo plano de baja energía* (subsector 2B) que indica baja velocidad de flujo (25 cm/s). La velocidad de flujo media es de 58.3cm/s, ligeramente inferior al régimen medio del río.

El Tramo 3, inicialmente presenta *fondo plano de alta energía* con surcos erosivos, que indica una velocidad de flujo de 100 cm/s (Fig. 6). A continuación, se observa la alternancia de campos de formas de fondo de *dunas medianas* y *fondo plano de baja energía*, que representan velocidades de flujo de 75 y 25 cm/s respectivamente. Los resultados indican un régimen de

flujo alto, en el primer subsector, relacionado con la presencia de un meandro y la unión con un brazo muerto del río. La velocidad promedio del flujo es de 55,55 cm/s, y el régimen de flujo de tipo medio, con picos de alta energía, carácter oscilante y un descenso de la energía del medio desde el subsector inicial hacia la desembocadura.

El Tramo 4 muestra continuidad con el tramo anterior y la alternancia de *dunas* y *fondo plano de baja energía*, representantes de velocidades de flujo de 75 y 25 cm/s respectivamente (Fig. 7). En este tramo se observa un incremento sucesivo del tamaño de las formas tipo *duna*, desde subsectores 4B, 4D, 4F y 4H, que muestran dunas pequeñas, a los subsectores 4L y 4J, que muestran dunas grandes y medianas respectivamente. El final del tramo se caracteriza por *fondo plano de alta energía* con presencia de surcos erosivos, indicador de velocidades de flujo altas (100 cm/s). La velocidad media del tramo es 53.84 cm/s, y el régimen de flujo de tipo medio, inferior al régimen medio de la ría, aunque de carácter oscilante y con tendencia a incrementar la energía aguas abajo (Fig. 7).

El Tramo 5 muestra una alternancia de campos de *dunas* de tamaño medio y pequeño y *fondo plano de alta energía*, indicadoras de velocidades de flujo de 75 y 100 cm/s, respectivamente (Fig. 8). No obstante, en el subsector 5E aparece *fondo plano de baja energía*, que indica una velocidad de flujo baja (25 cm/s). La velocidad promedio es 78.57 cm/s, que indica un régimen de flujo de medio a alto, pero con carácter oscilante y superior al régimen de flujo medio del río.

El Tramo 6 se caracteriza por la presencia de campos de *fondo plano de alta energía* que indican una velocidad de flujo máxima de 100 cm/s (Fig. 9). En el resto del tramo predominan las *dunas* (75 cm/s), excepto en dos subsectores 6C y 6E, caracterizados por *fondo plano de alta energía* y *fondo plano de baja energía* que indican velocidades de flujo de 100 y 25 cm/s respectivamente. El tramo finaliza con un incremento de velocidad (75 cm/s) en el subsector F. En su conjunto, el tramo muestra una velocidad media de flujo de 66.66 cm/s, inferior a la media del río.

El Tramo 7 se caracteriza por el predominio de campos de *dunas medianas* con crestas bifurcadas, que indican una velocidad de flujo de 75 cm/s (Fig. 10). El régimen de flujo es de tipo medio y muy constante a lo largo de todo el tramo, aunque más alto que el régimen medio del curso de río estudiado.

En el Tramo 8 alternan campos de *dunas* con *fondo plano de alta energía*, que indican velocidades de flujo de 75 a 100 cm/s (Fig. 11). La velocidad media del flujo resultante es de 70 cm/s, superior a la media del río, y el régimen de flujo intermedio a alto.

El Tramo 9 se caracteriza por el predominio de formas de fondo de tipo *duna*, indicadoras de velocidades de flujo de 75 cm/s, con un subsector de alta velocidad (100 cm/s), donde aparece *fondo plano de alta energía* (Fig. 12). La velocidad media del tramo es de 83,33 cm/s, superior a la media del río. El régimen



de flujo muestra oscilaciones de medio a alto, aunque con predominio del primero.

El Tramo 10 se caracteriza, inicialmente, por la presencia de campos de dunas que indican velocidades de flujo máximas de 75 cm/s (Fig. 13). Aguas abajo, se incrementa la velocidad de flujo hasta 100 cm/s, tal como muestra la presencia de *fondo plano de alta energía* y *surcos erosivos* de 10 a 20 cm. La velocidad de flujo media es de 87,5 cm/s, que indica un régimen de flujo de tipo medio a alto, pero superior al resto del río. Esto puede estar relacionado con la influencia de las corrientes mareales en la zona de la desembocadura.

En el Tramo 11 predominan formas de fondo de baja velocidad (como 25 cm/s con un subsector de dunas (11B) (Fig. 14). La velocidad media de flujo es de 66.66 cm/s, por tanto, el régimen de flujo es medio. Las características del tramo pueden estar influenciadas por la existencia de los continuos dragados bianuales del canal navegable en este tramo.

Los resultados del análisis de formas de fondo y el establecimiento de las velocidades del flujo en los tramos estudiados, indican que el régimen de flujo del estuario del Guadalquivir es de tipo medio, aunque no constante (Fig. 15). Al inicio del curso bajo del río, el régimen de flujo es bastante estable y energéticamente por debajo del régimen medio del conjunto del estuario. La zona cercana a la esclusa de Sevilla, se caracteriza por un frecuente cambio del régimen deposicional y predominio de las zonas de sedimentación y transporte con velocidades de flujo entre 25 y 75 cm/s. Pero, a partir del Tramo 5, el régimen de flujo se hace más oscilante y con tendencia a un régimen alto, por encima del régimen medio de la ría (Fig. 15).

En conjunto, el régimen de flujo tiende a incrementarse hacia la zona de la desembocadura. Este incremento del régimen de flujo aguas abajo, es detectable a partir de la relación entre la altura y distancia entre crestas de las dunas. A partir del punto de inflexión donde aumenta el régimen de flujo, la distancia entre crestas disminuye conforme a los campos de dunas encontrados en tramos anteriores, mientras que la altura de la duna se mantiene constante. Esto puede ser debido a que el aumento del régimen de flujo se refleja en la disminución de la distancia entre crestas al no poder desarrollarlas en altura debido a la acción de flujo de marea, que retrabaja las crestas de las dunas en cada ciclo mareal.

En la mitad sur del curso bajo, con velocidades medias de flujo de 75 cm/s, el proceso deposicional dominante es el transporte de sedimentos y la formación de formas de fondo de tipo *duna*, que alternan con zonas donde predomina la erosión, así como velocidades de flujo de 100 cm/s, deducidas a partir de los *surcos erosivos* presentes.

Por otra parte, es de destacar que en el curso bajo del Guadalquivir las dunas no mantienen la relación entre altura y distancia entre crestas indicada por Ashley (1990). Estas dunas tienen altura inferior, lo que puede ser debido a la acción de un flujo en la parte

superior de la columna de agua, que impide el desarrollo habitual de las dunas en otros ambientes sedimentarios. Otra causa puede ser el retrabajo de antiguas dunas, por acción de las corrientes mareales tras la formación de las formas dominantes.

En algunos tramos del río, el equilibrio entre la corriente y el fondo está alterado a causa de la intervención antrópica. Entre los factores antrópicos cabe destacar el desvío de agua para canales de regadío, presencia de la esclusa, así como las continuas operaciones de dragados. Estas actuaciones provocan pérdida de hidrodinamismo de los flujos actuantes debido por una parte al descenso del caudal y menor altura dinámica de los flujos, aumento de la profundidad y decremento de los aportes sedimentarios por quedar éstos retenidos en embalses.

Conclusiones

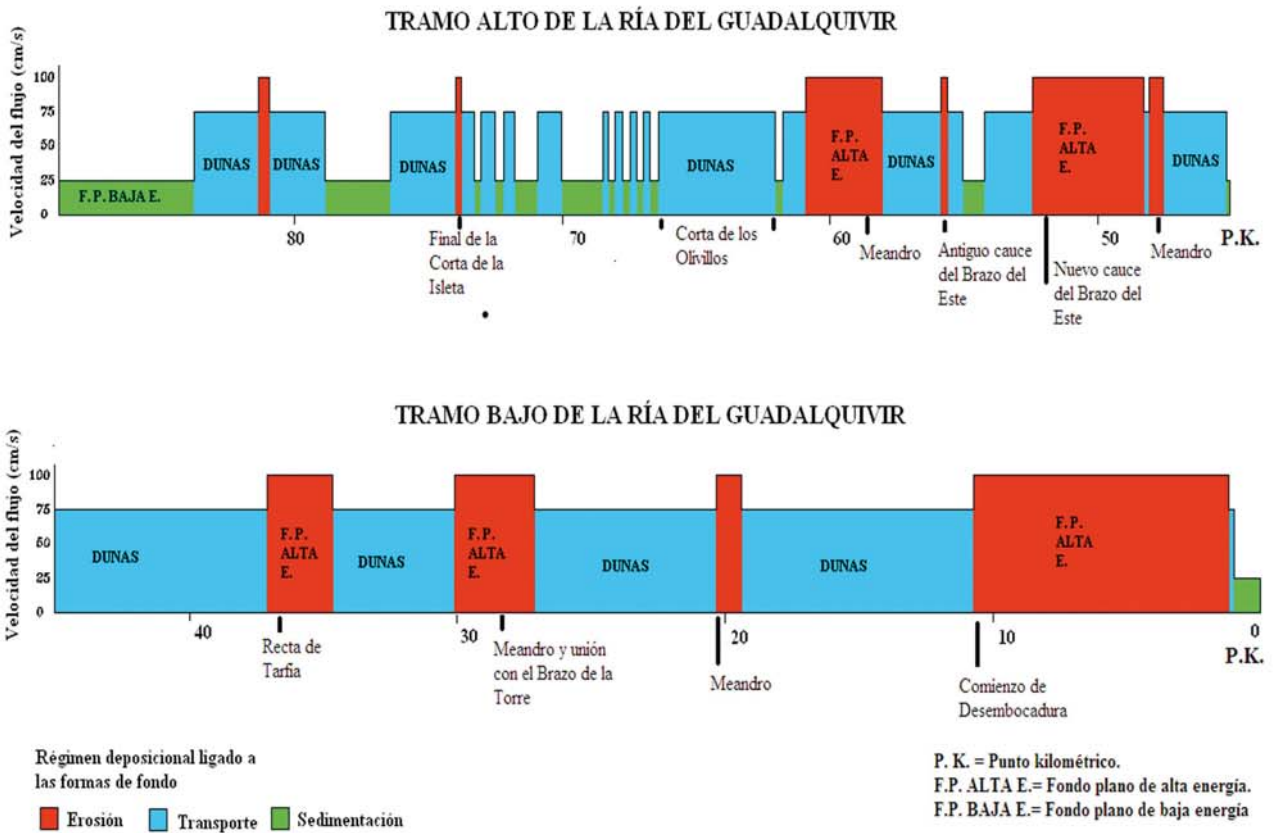
Respecto a la metodología utilizada cabe destacar la visualización de los modelos tridimensionales de los datos batimétricos, así como, la facilidad de reconocimiento de las formas de fondo y la facilidad y rapidez del procesado de datos. Los principales inconvenientes están relacionados con el número de aparatos que componen el equipo, así como, la disminución del ancho de barrido conforme disminuye la profundidad del fondo de estudio.

Se ha establecido el *régimen de flujo* en el curso bajo del estuario del Guadalquivir, mediante el reconocimiento de formas de fondo como medida del grado de hidrodinamismo que soporta el cauce. Los procesos deposicionales están afectados tanto por la acción fluvial como por las mareas. El régimen de flujo se caracteriza por un nivel de energía medio, con sectores de alta y baja energía. Las zonas de menor energía se caracterizan por *fondo plano de baja energía* y *ripples*, las de energía media por *dunas* medianas y pequeñas, mientras que en las zonas de alta energía predomina el *fondo plano de alta energía* y los *surcos erosivos*.

El régimen deposicional está controlado por las crecidas y la morfología del cauce fluvial, las mareas y la acción antrópica, siendo esta última determinante, debido a las importantes modificaciones realizadas, tales como, embalses, obras portuarias, esclusas, canalizaciones y dragados, que han modificado el régimen natural del río.

En el sector septentrional del río, el régimen de flujo se caracteriza por una alternancia de zonas con predominio de procesos deposicionales y zonas con predominio del transporte. En esta zona, las continuas operaciones de dragado realizadas, han eliminado gran parte del sedimento depositado y alterado el régimen deposicional natural del río, cuya tendencia al depósito, está falseada por una aparente situación de equilibrio, provocada por los dragados. Respecto al sector meridional, se caracteriza por un régimen variable, con tramos en los que dominan los procesos erosivos y otros

A



B

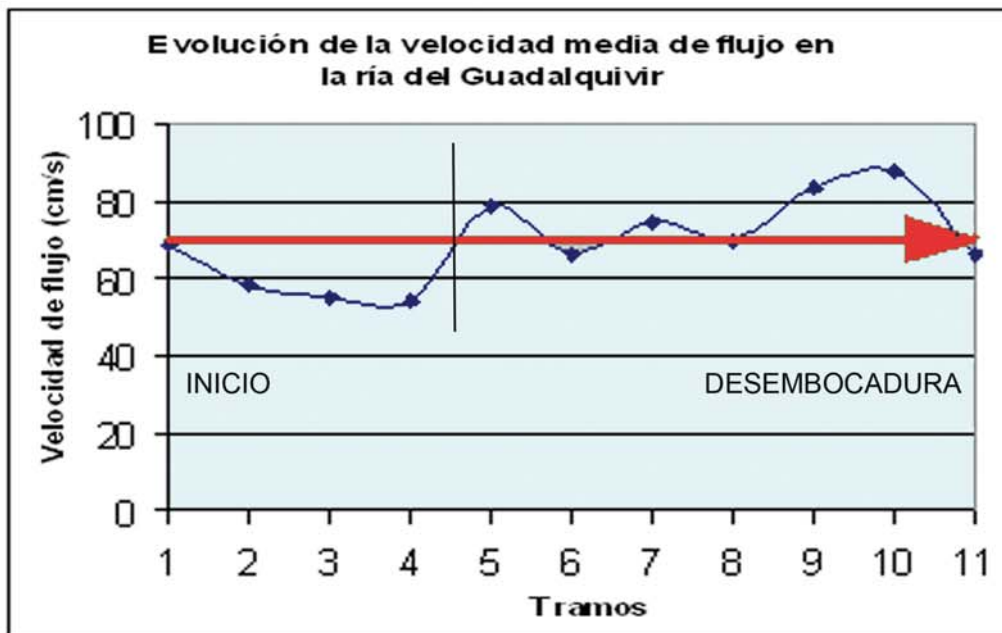


Figura 15.- A) Esquema gráfico del régimen deposicional y las formas de fondo asociadas en el curso bajo del Guadalquivir. B) Evolución de la velocidad media de flujo a lo largo del cauce del río.

tramos donde dominan los procesos de transporte. La acción antrópica ha generado cambios en el régimen de flujo y consecuentemente del régimen deposicional en el medio. La presencia de las cortas, la esclusa, los dragados bianuales son parte responsable de estos cambios.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a las facilidades proporcionadas por las empresas Fondemar y Tecnoambiente, la Autoridad Portuaria de Sevilla y el Proyecto de Investigación CTM2006-06090/MAR, de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT).

Referencias

- Álvarez, O. Tejedor, B. y Vidal, J. (2001): La dinámica de marea en el estuario del Guadalquivir: un caso peculiar de "resonancia antrópica". Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz. 10 pp
- Ashley, G. (1990): Classification of large scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Research*. Vol 60. 161-172
- Autoridad Portuaria de Sevilla (2008): www.apsevilla.com. Última visita en Abril de 2008
- Baldó, F. Arias, A. M. y Drake, P. (2001): La comunidad macrobentónica del estuario del Guadalquivir. Boletín I. E. O. 17, 137-148
- Benkhelil J. 1976. *Étude Néotectonique de la Terminaison occidentale du Cordillères Bétiqes*. Thèse 3 eme cycle. Université de Nice.
- Chappell, J., Woodroffe, C.D., 1994. Macrotidal estuaries, pp. 187-218. In: Carter, R.W.G., Woodroffe, C.D. (Eds.), Coastal Evolution. Cambridge University Press, 517 pp.
- Cloetingh S, Van der Beek PA, Van Rees D, Biermann C, Stephenson RA. 1992. Flexural interaction and the dynamics of Neogene extensional basin formation in the Alboran-Betic region. *Geo-Marine Letters*, 12. 66-75.
- Costello, W.R. (1974): Development of bed configuration in coarse sands. Cambridge, Mass: *Earth and Planet. Sci. Dept*, Mt 74.
- Estevez A, Sanz de Galdeano C. 1980. La néotectonique des environs de la Sierra Arana. *Cuadernos de Geología*, 11. 7-29.
- Fleming, B.W. (1988): Zur klassifikation subaquastischer, stromungs transversaler transportkopper. *Bochumer geologiskhe un Tektonischearbeiten*, 29. 44-47
- Grant, W.D. y Madsen O.S. (1982): Movable bed roughness an unsteady oscillatory flow. *Journal Geophysic Resources*. Vol 87. Issue C1
- Guy, H. P. Simons, D. B. y Richardson, E. V. (1966): Sumary of alluvial channel data from. flume experiments. USGS Prof. Pap, nº 462-1
- James C. y Mackie A., 2003-2004. The outer Bristol Channel Marine Habitat Study: Addressing the lack of regional-scale biological and geological data for de outer Bristol Channel.
- Lee, T. H. y Hanes, D.M. (1996): Comparación of fields observation of the vertical distribution of suspended sand and its prediction vy models. *Journal of Geophysical Research*, 101. 3561-3572
- Molini, L. (1903): Ría del Guadalquivir. *Revista de Obras Públicas*. 349-351
- Niedsen, P. (1986): Suspended sediment concentration underwaves. *Coastal Engineering*. 23-31
- Perillo, G.M.E., 1995. Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Elsevier, Amsterdam.
- Rubin, D.M. (1987). Cross-bedding Bedforms and Paleocurrents. Society of Economic Paleontologist and Mineralogist. Concept in Sedimentology, Volume 1. Ed: Barbara Lidz, Editor of Special Publications, 183 pp.
- Sanz de Galdeano C, López Garrido AC. 1991. Tectonic evolution of the Malaga basin (Betic Cordillera). Regional implications. *Geodinamica Acta* 5: 209-250.
- Southard, J.B., Boguchwal L. A. (1990): Bed configuration in steady unidirectional water flows: part 2. Synthesis of flume data. *Journal of Sedimentary Petrology* 60. 658-679
- Swift, D.J.P. and Thorne, J.A. (1991): Sedimentation on continental margins, I: a general model for shelf sedimentation. Spec. Publis Int. Ass. Sediment (Edited by D.J.P. Swift, G.F. Oertel, R.W. Tillman and J.A. Thorne. Blackwell Scientific Publications), Vol. 14. 3-31.
- Viguier C. 1974. *Le Néogène de l'Andalousie Nord-occidentale (Espagne)*. *Histoire géologique du bassin du bas Guadalquivir*. Thèse Bordeaux, 449 pp.
- Van Rijn, L. C. (1993): Principles of sediments transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Deft, The Netherlands. 110
- Williams, G. P. (1970): Flume Width and water detph effects in seidment transport experiments. USGS Prof. Pap, nº 256

Manuscrito recibido el 9 de mayo de 2009

Aceptado el manuscrito revisado el 9 de noviembre de 2009

