

REPRESENTACION DEL PERFIL DE EQUILIBRIO EN LAS PLAYAS DEL LITORAL CATALAN

J.P. Sierra, A. Lo Presti y A. Sánchez-Arcilla*
Dres. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

En el presente trabajo se han utilizado los datos de 82 perfiles correspondientes a distintos tramos de la costa catalana, para evaluar la bondad del perfil de equilibrio de Dean, que es el más difundido y empleado en la práctica. Se ha llegado a la conclusión de que dicha formulación no es la más adecuada en esta zona. Se han analizado otras dos expresiones originales, propuestas por los autores de este trabajo, observándose que en la mayoría de los 82 perfiles, dichas expresiones se ajustan a los datos de forma mucho más precisa que las formulaciones tipo Dean. Por consiguiente, es recomendable tener en cuenta las nuevas ecuaciones en el caso de estudios a realizar en el litoral catalán.

In this work, data belonging to 82 beach profiles collected at different points of the Catalan Coast, have been utilized in order to evaluate the fitness of Dean's profile, which is the most widely employed. It has been concluded that this formulation is not the more suitable in this zone. Other two profile expressions, proposed by the authors of this work, have been analyzed. In the major part of the 82 profiles, it has been observed that both proposed expressions fit much better to the measured data than Dean-type equations. Therefore the use of both new expressions is recommended in the Catalan Coast.

1. Introducción

El conocimiento de las características del perfil de equilibrio de una playa es fundamental para la resolución de muchos problemas que se presentan en la ingeniería costera. En particular, en las regeneraciones de playa, en las que grandes cantidades de sedimentos son vertidos para hacer avanzar la línea de orilla, las olas y las corrientes moldearán dichos sedimentos hasta alcanzar una situación con un perfil más o menos estable. También en los modelos de evolución de costas de una línea, en los que se pretende estudiar los cambios en la línea de costa al introducir nuevas condiciones en la playa (un espigón, el dique de un puerto etc.), debe especificarse una forma del perfil.

Por estas razones, la caracterización de los perfiles de equilibrio ha suscitado interés, tanto desde el punto de vista de los geólogos como del de los ingenieros, por lo que a lo largo de las últimas décadas se han realizado numerosos estudios orientados a obtener una expresión analítica representativa de los perfiles de equilibrio de las playas. Como consecuencia de estos estudios, se han propuesto diversas ecuaciones empíricas, que han gozado de distinto grado de aceptación. En el siguiente capítulo se efectúa una revisión de las más representativas de dichas expresiones.

2. Antecedentes

Los antecedentes sobre el tema se remontan a las primeras especulaciones cualitativas sobre diversos mecanismos relacionados con el perfil de equilibrio, realizadas por Fenneman (1902). De las mismas, concluye que el perfil sumergido debería ser cóncavo en la zona aguas arriba, cerca de la costa, y convexo en el tramo más offshore.

*Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM/UPC)
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de
Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña
Recibido en ROP: septiembre 1993

Bruun (1954), sobre la base de estudios realizados en la costa danesa del Mar del Norte y en Mission Bay, California, propuso una ecuación empírica para describir la geometría del fondo de los perfiles bajo la acción del oleaje, llegando a una expresión del tipo:

$$h = A y^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

donde h es la profundidad referida al nivel medio del mar y la distancia horizontal desde la línea de costa. Bruun sugirió dos mecanismos que podrían conducir al perfil de equilibrio. En primer lugar consideró uniforme la componente *onshore* (hacia la playa) de la tensión tangencial y constante la componente *onshore* del gradiente de energía del oleaje, lo que dió lugar a una ecuación aproximadamente de la forma de la 1. El segundo mecanismo está basado en la consideración de que la pérdida de energía de onda es debida únicamente a la fricción por fondo y que su valor por unidad de área es constante. Incorporando los resultados de los estudios de laboratorio hechos por Bagnold (1946) y usando una teoría no lineal del oleaje, llega a un modelo para el perfil del fondo, dependiente del periodo de onda, de la forma

$$h = A' \frac{y^{2/3}}{T^{4/3}} \quad (2)$$

Eagleson et al. (1963) propusieron una relación para el perfil de equilibrio en la zona *offshore*, (más allá de la zona de rotura), basada en un análisis entre las fuerzas gravitacionales y las del fluido, y en los mecanismos del transporte por fondo inducido por el oleaje, en playas de arena de granulometría uniforme. Los resultados experimentales mostraron un buen ajuste con la teoría y parecen indicar que los mecanismos de transporte por fondo tienen cierta importancia en la determinación de las características del perfil de equilibrio, al menos en la zona *offshore*.

Dean (1976) considerando la teoría lineal del oleaje en su análisis, identifica los posibles mecanismos que conducen al perfil de equilibrio. Sus consideraciones físicas reconocen la existencia de fuerzas "constructivas" y "destructivas" en la zona de *surf*, por las cuales, la primera manifestaría una tendencia del transporte de arena en dirección *onshore*, y la segunda en sentido

offshore. Sus estudios centran la atención en las fuerzas "destructivas", y señala que en términos generales, una arena de cierto tamaño y peso específico dado, es estable bajo un cierto nivel de las fuerzas "destructivas". Sin embargo, no realiza una identificación manifiesta de las fuerzas "constructivas". Como resultado de este estudio llega a una expresión del tipo:

$$h = A y^m \quad (3)$$

para el perfil de equilibrio, donde A es un factor de forma, que depende de las características de estabilidad del material del fondo, y m varía en función del tipo de fuerza "destructiva" considerada.

Continuando con esta línea de investigación, y tras el análisis de 504 perfiles de la costa atlántica y el Golfo de México, subdivididos en diez grupos, Dean (1977) establece correspondencias para A en función del diámetro del sedimento y sugiere un valor de $m=2/3$.

Bowen (1978) también obtuvo una expresión del perfil proporcional a la distancia *offshore* elevada a $2/3$, a partir de un análisis del balance entre el transporte pendiente abajo debido a la gravedad y el transporte *onshore* producido por el arrastre del oleaje para el sedimento en suspensión.

Walton y Chui (1979) sugieren que el exponente igual a $2/3$ en el modelo de perfil propuesto por Bowen, basado en el transporte en suspensión, es más aplicable bajo condiciones de tormenta, cuando los niveles de turbulencia en la zona de *surf* son altos. Según ellos, esto se debe a que para pequeños ángulos de incidencia del oleaje, el transporte en suspensión es más importante que el de fondo y que esta importancia relativa se incrementa a medida que aumenta la altura de ola.

McDougal y Hudspeth (1983) efectúan un análisis del perfil tipo Bruun o Dean en su versión adimensional

$$H = A Y^{2/3} \quad (4)$$

donde todas las variables (escritas en mayúsculas en este caso) han sido adimensionalizadas me-

diante la variable y_b (ancho de la zona de *surf*), de forma que:

$$Y = y/y_b, \quad H = h/y_b \quad y \quad A = a/y_b.$$

Estos autores señalan que la dificultad de la aplicación de esta expresión está en la singularidad que se presenta en $Y=0$, ya que, en la naturaleza, las playas no presentan ningún punto de pendiente infinita. No obstante, sostienen que este tipo de perfil es un buen modelo (en el sentido de que da el mejor ajuste por mínimos cuadrados) para numerosas playas naturales.

Hanson y Kraus (1989), para el uso del programa GENESIS, un modelo generalizado para la simulación del cambio de línea de costa debido al transporte longitudinal de sedimentos, especifican el perfil de playa mediante la expresión de Dean (1977) y aproximan la curva de Moore (1982) que expresa A en función de D_{50} . Su propuesta para A es:

$$A = 0.41(D_{50})^{0.94} \quad D_{50} < 0.4$$

$$A = 0.23(D_{50})^{0.32} \quad 0.4 < D_{50} < 10.$$

$$A = 0.23(D_{50})^{0.28} \quad 10. < D_{50} < 40.$$

$$A = 0.46(D_{50})^{0.11} \quad 40. \leq D_{50}$$

donde D_{50} está expresado en mm. y las unidades de A en $m^{1/3}$.

McDougal y Hudspeth (1989), en un intento de compatibilizar la singularidad matemática que presenta el valor de la pendiente en el origen en el perfil tipo Bruun, con la pendiente recta que a menudo presentan los perfiles de playa "reflexivos" (también llamados tipo *swell* o de verano), proponen un perfil compuesto que combina una playa con pendiente recta en la zona *nearshore* con un perfil cóncavo en dirección *offshore*.

Siguiendo un razonamiento similar, Dean (1991) propone una modificación de su expresión de 1977 que daba lugar a pendientes infinitas en

el origen. Teniendo en cuenta que las grandes pendientes inducen grandes fuerzas gravitacionales y considerando este efecto conjuntamente con los de turbulencia, propone:

$$y = \frac{h}{m} + \frac{1}{A^{3/2}} h^{3/2} \quad (5)$$

donde h es la profundidad, m es la pendiente del estrán y A se expresa como

$$A = \left[\frac{24D_* D}{5\rho g^{3/2} k^2} \right]^2 \quad (6)$$

siendo D el diámetro de las partículas de sedimento, ρ la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad, k una constante que relaciona la altura de ola con la profundidad dentro de la zona de *surf* y D_* es la disipación de energía del oleaje por unidad de volumen, dentro de la zona de rompientes, que llamando E a la energía de onda y C_g a la celeridad de grupo, viene dada por

$$D_* = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} (EC_s) \quad (7)$$

En aguas poco profundas el término $h = my$ es el que domina, mientras que en aguas más profundas predomina la simplificación $h = Ay^{2/3}$.

Expresiones similares fueron propuestas por Larson (1988), Larson y Kraus (1989) y Kriebel, Kraus y Larson (1991), que combinaban un tramo de perfil rectilíneo con otro de forma curva.

Bodge (1992) presentó una formulación exponencial que, a su entender, aproxima mejor las formas del perfil de equilibrio, en el litoral Sudeste de los Estados Unidos y el Caribe, que la propuesta por Dean (1977) para la misma base de datos. Su expresión tiene la siguiente forma:

$$h = B(1 - e^{-ay}) \quad (8)$$

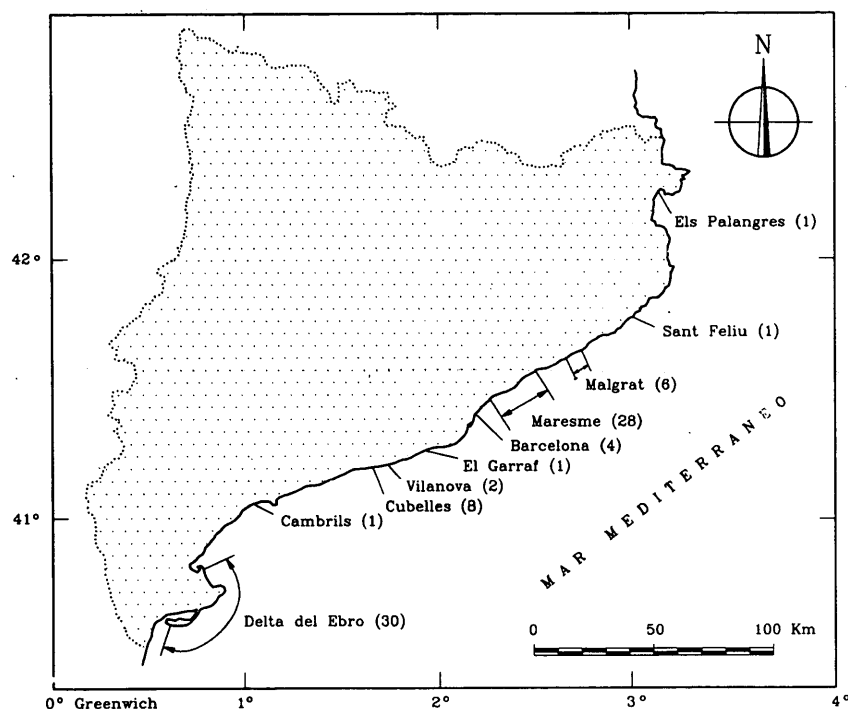


Figura 1. Situación general de los perfiles

donde B tiene dimensiones de profundidad y k de distancia elevada a -1.

3. Datos empleados

En el presente trabajo se ha efectuado el análisis de 71 perfiles de playa del litoral catalán pertenecientes a la zona del Maresme y del Delta del

Ebro y de 18 perfiles representativos de otras zonas de la costa catalana. Para evitar confusiones se ha mantenido la misma numeración de los perfiles establecida por los autores de los estudios batimétricos correspondientes. En la figura 1 se muestra la situación de los citados perfiles. Debido a la repetición de números en una y otra zona y aún dentro de la misma (Maresme), se ha hecho la siguiente sectorización:

En el Maresme se reconocen dos sectores, uno en su extremo Norte, en el área de Malgrat - Pineda y el otro hacia el Sur, desde Caldes d'Estrach hasta Mògat. Por simplicidad, en este estudio, al primer sector se lo ha denominado Malgrat, con 6 perfiles, y se ha reservado el nombre de Maresme, para el segundo, con 31 perfiles.

La zona de Delta del Ebro estudiada se extiende desde la Punta del Fangar hasta el extremo sur de la Península dels Alfaques, aunque sólo se ha considerado la costa exterior, con 34 perfiles.

Los 18 perfiles restantes se distribuyen de la siguiente manera: 4 en Barcelona, 8 en Cubelles, 1 en Cambrils, 2 en Vilanova i la Geltrú, 1 en Sant Feliu de Guíxols, 1 en Garraf y 1 en Roses.

La información utilizada para el sector de Malgrat corresponde a las campañas de obtención de datos morfológicos de playa emergida y sumergida realizadas entre junio de 1987 y mayo de 1990,

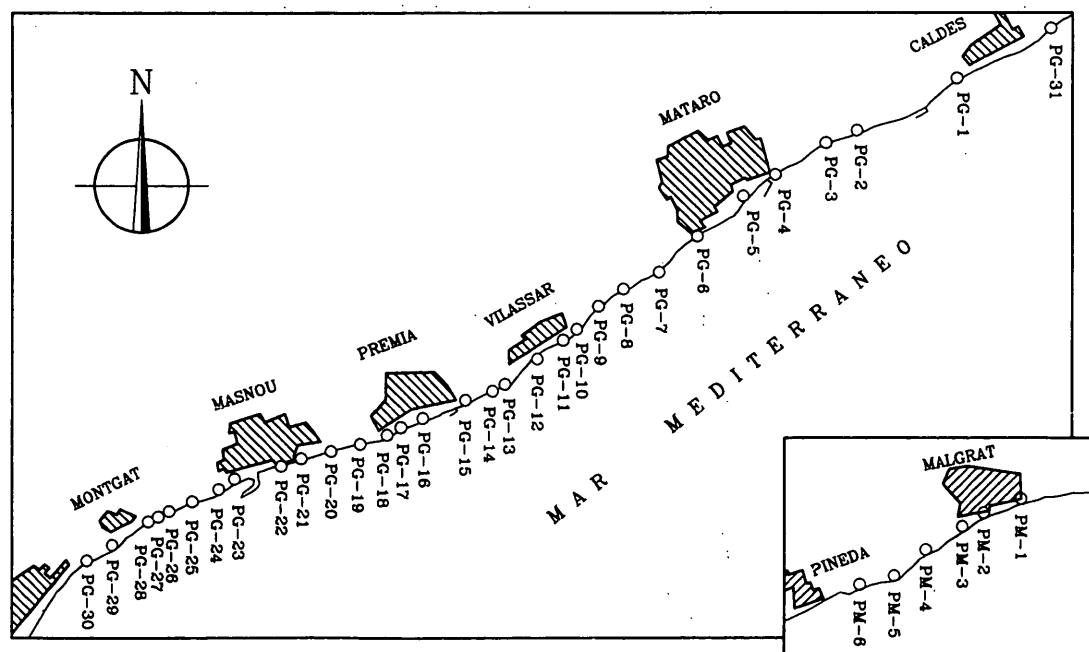


Figura 2. Situación de los perfiles del Maresme

las cuales están descritas en Gelonch et al. (1989 y 1990) y en Serra et al. (1990).

Las mismas fuentes de referencia arriba citadas pueden aplicarse al sector del Maresme. Las campañas de medida abarcan el periodo de mayo de 1989 a noviembre de 1990. En la figura 2 se muestran los perfiles de ambos sectores.

Los datos utilizados para la zona del Delta del Ebro corresponden a los levantamientos topográficos y batimétricos realizados entre abril de 1988 y marzo de 1989, y a las campañas efectuadas por el Instituto de Ciencias del Mar entre marzo de 1990 y marzo de 1991, procesadas ambas fuentes por Jiménez et al. (1992).

En la figura 3 se indican los perfiles de la costa exterior del Delta. Efectuado un primer análisis de la información, fueron eliminados los perfiles números 2, 9 y 14 del sector Maresme a causa de la presencia de errores gruesos de medición y los perfiles del 26 al 29 (ambos inclusive) de la zona de Delta del Ebro, por resultar atípicos y con una gran variabilidad debido a que corresponden a las inmediaciones de la desembocadura del río.

En cuanto a los 18 perfiles restantes, corresponden a campañas de medida realizadas por encargo de la Direcció General de Ports i Costes de la Generalitat de Catalunya o de algunas entidades privadas, con ocasión de realizarse proyectos o estudios locales. El nivel de referencia adoptado para los perfiles es el nivel medio del mar, no obstante algunos de ellos están referidos a niveles medios locales.

4. Metodología aplicada

Como se indicó anteriormente, Bruun (1954) basándose en el análisis de perfiles de playa del Mar del Norte y de la Costa de California, desarrolló una ecuación empírica del tipo potencial, entre la profundidad del agua h y la distancia desde la línea de costa y, a la que posteriormente él y otros autores encontraron justificativos teóricos en el marco de ciertas consideraciones. Dean (1976, 1977) centrando su estudio en la teoría lineal y suponiendo que es constante la relación entre la altura de ola en rotura y la profundidad desde donde ésta se produce en dirección *onshore*, justificó desde tres ópticas distintas un perfil de equilibrio de ese tipo y encontró un valor para el exponente

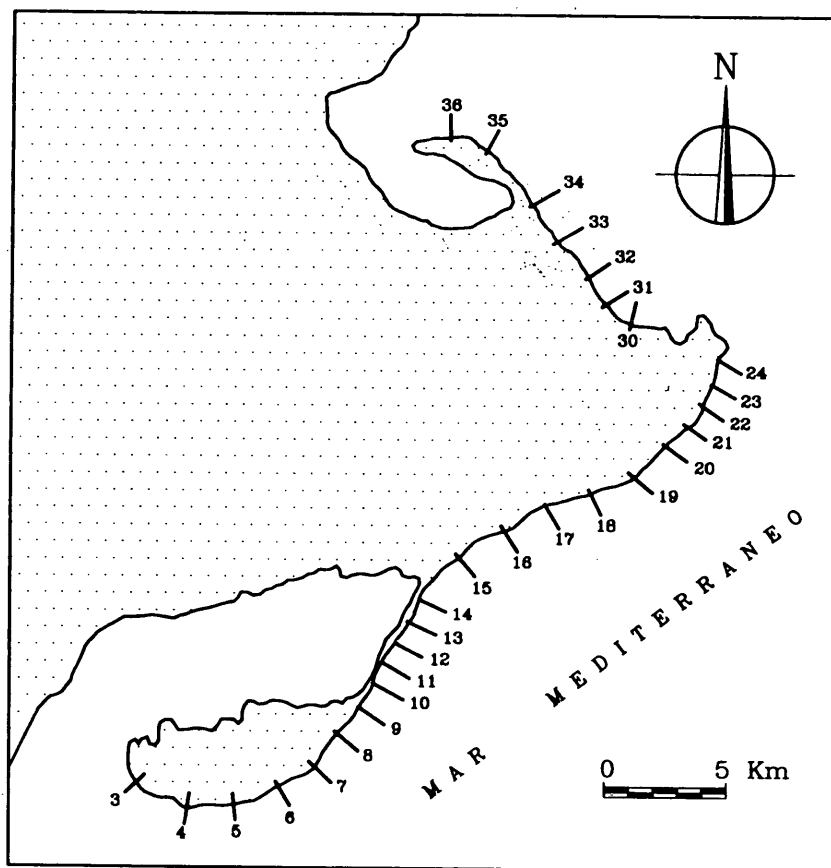


Figura 3. Situación de los perfiles del Delta del Ebro

B de 0.67. Posteriormente, Moore (1982) describió una relación potencial entre el parámetro de forma A y el tamaño del grano y Dean (1987) estableció una relación entre A y la velocidad de caída.

La amplia difusión que ha tenido este estudio de Dean y la simplicidad de la expresión propuesta ha llevado a que los resultados que él obtuvo para ese zona del litoral atlántico de EEUU y del Golfo de México hayan sido aplicados a playas de características muy diferentes a las del estudio original, lo que puede dar lugar a errores significativos.

En concreto, la Costa Catalana, al estar situada en el Mar Mediterráneo, presenta unos rasgos distintivos, tanto en su morfología como en los agentes dinámicos que intervienen en su modelado, que difieren notablemente de los de la región donde Dean efectuó su estudio. En consecuencia, la adopción de un perfil tipo Dean puede que no sea lo más apropiado en este caso, por lo que se

ha estudiado la bondad del mismo, comparándolo además con otras expresiones alternativas.

Obviamente, la naturaleza dista mucho de desarrollar un modelo de equilibrio en un sentido estricto. El término de perfil de equilibrio se refiere a una curva de forma fija y acotada en un intervalo, que representa adecuadamente la forma promedio del perfil, antes y después de cualquier perturbación de carácter estacional o debida a una tormenta, o alguna fluctuación temporal (Hands, 1983). Las propuestas que se efectúan y la metodología aplicada se desarrollan en el contexto de esta última interpretación.

Por otra parte, no se pretende predecir los parámetros reales de forma de la playa, sino que la observación de que los perfiles de playa a menudo aproximan mejor a otras formas de perfiles de equilibrio que la ofrecida por la ecuación potencial de Dean, conduce a presentar formulaciones alternativas para caracterizar perfiles de playa similares, que sean de utilidad para aplicaciones en lugares específicos.

Evidentemente, todas las formas de las expresiones propuestas ajustan con relativa pobreza aquellos perfiles que presentan barras o terrazas. En efecto, dada su configuración, sobrepredicen la zona anterior y posterior a la barra, como compensación del suavizado realizado en ésta.

En definitiva, aquí se pretende analizar otros tipos de expresiones que ofrezcan una mejor representación de las características morfológicas del litoral catalán, en el contexto de un estudio comparativo de dichas expresiones con la de Dean.

La expresión más simple para representar un perfil de playa es la línea recta. Esta simplificación del problema puede llegar a ser válida si se limita su extensión a una corta longitud a partir de la línea de costa en dirección offshore. Por el contrario, cuando el rango considerado es mucho más amplio, surge su tendencia marcadamente curvilínea. Para describir esta relación no lineal y encontrar la curva de mejor ajuste, se ha recurrido a una adecuada transformación de las variables para realizar luego un estudio de regresión lineal simple por el método de los mínimos cuadrados.

La elección de las expresiones se basa en un conocimiento previo de la forma general del perfil.

Aquí, para el modelado del perfil de equilibrio se proponen una expresión del tipo exponencial:

$$e^z = A(y+y_0)^B \quad (9)$$

y otra del tipo racional:

$$z = \frac{y}{A+By} \quad (10)$$

que se comparan con la expresión general de Dean

$$z = Ay^B \quad (11)$$

aunque en las figuras también se ha representado esta última formulación con $B = 2/3$.

La curva estimada que provee el mejor ajuste con los puntos correspondientes a los datos observados, es aquella cuya distancia vertical entre los puntos y la misma (desvío u error) es mínima. El error medio se ha definido como:

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_m - z_c)^2}{n-p}} \quad (12)$$

y el error porcentual relativo a la profundidad media, como

$$\delta = \frac{e}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_m^2}} \quad (13)$$

donde z_m son los valores de la profundidad medidos, z_c son los valores calculados y p es el número de parámetros libres que tiene la expresión que se ajusta.

En el estudio se ha analizado el comportamiento de los perfiles, tanto individualmente como por grupos. Los perfiles de playa se han agrupado de acuerdo con su proximidad geográfica y sus características físicas, lo que ha llevado prácticamente a respetar los entornos geográficos definidos en las campañas de medida. Se han establecido los siguientes grupos: Malgrat (con 6 perfiles), Maresme (31), Barcelona (4), Cubelles (8), Delta del Ebro (34) y por último se ha analizado el comportamiento global de los 82 perfiles.

5. Discusión de los resultados

Utilizando un ajuste del tipo Dean, pero con los dos parámetros libres (ecuación 11), se obtiene que el coeficiente A varía entre 0.023 y 0.520, aunque el 84.37% de los valores son inferiores a 0.2. El valor medio de A es de 0.125. Por su parte, el coeficiente B varía entre 0.417 y 0.987, con un valor medio de 0.699, que es ligeramente superior al hallado por Dean. En este caso, el error medio es de 0.75 m, mientras que un 73.44 % de los perfiles tiene un error comprendido entre 0.0817 y 1 m. (figura 4).

En el estudio de Dean en las costas de EEUU, al fijar $B = 0.67$, el 99 % de los valores de A fueron inferiores a 0.3 con una moda entre 0.1 y 0.2 (68 % de los casos en dicho intervalo). El error medio hallado fue de 0.65 m.

Resulta evidente, a la luz de esta primera comparación, que las características morfológicas de los perfiles estudiados por Dean, distan bastante de los del litoral catalán, como lo demuestran las diferencias encontradas para los valores de A. Ello es coherente con la idea de que las costas del Mar Mediterráneo están sometidas a un oleaje de características muy distintas a las del Océano Atlántico, por lo que es de esperar que su morfología, sea también diferente. Por otra parte, se comprueba que la calidad del ajuste es limitada, debido a que la expresión potencial no responde a las necesidades de forma de los perfiles en estudio.

El análisis de las dos expresiones siguientes tiene un carácter empírico y es un intento de presentar ecuaciones alternativas que respondan mejor a la forma del perfil en sí misma.

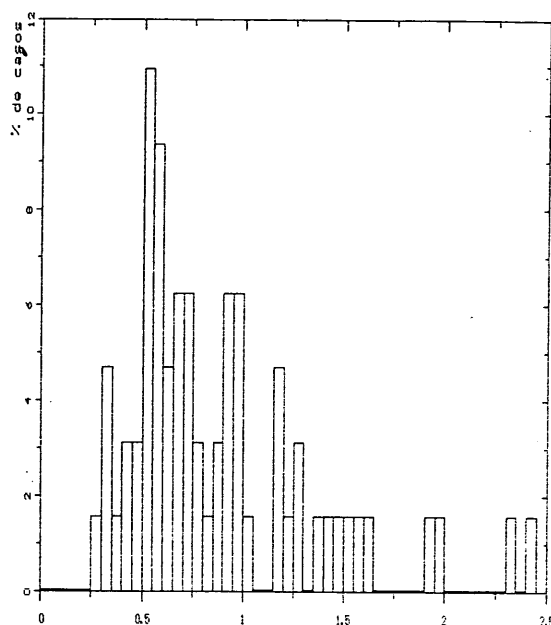


Figura 4. Errores ϵ .
Ajuste tipo Dean

Por razones prácticas, para el ajuste exponencial (9), debido a las características propias de la ecuación y a que el coeficiente A toma valores muy pequeños, es preferible trabajar con $\ln A$. Este coeficiente varía entre 0 y 38.491, pero el 76.56 % de los valores son inferiores a 20. El valor medio es de 14.518. B tiene un rango comprendido entre 1.171 y 7.642, con un valor medio de 3.46. El rango de y_0 es muy amplio, entre 5 y 155 con un valor medio de 85.63.

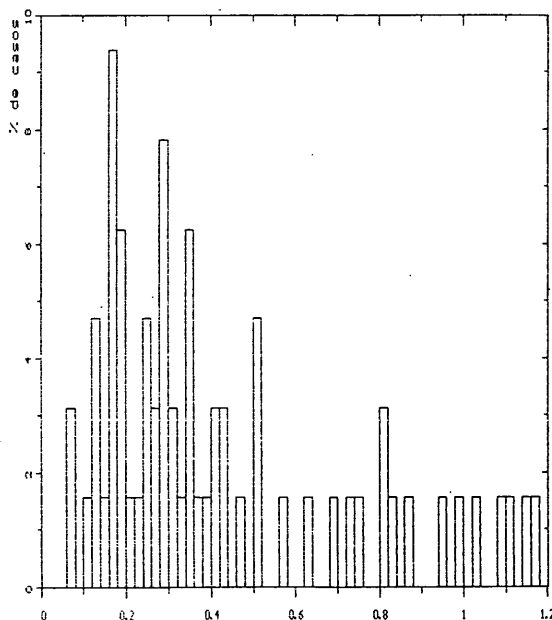
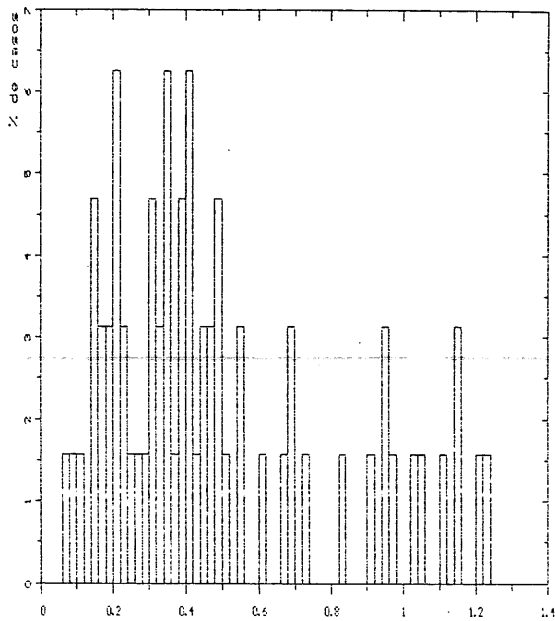


Figura 5. Errores ϵ .
Ajuste tipo exponencial

Figura 6. Errores ε. Ajuste tipo racional



El rango de los desvíos estándares de los errores, como muestra la figura 5, está comprendido entre 0.068 y 1.166. En el 92.18 % de los perfiles, dicho error es inferior a 1 y el error medio total es de 0.36 m, muy por debajo de los valores que se manejaban en el caso anterior. Esto indica que la expresión propuesta responde muy bien a las características de forma del perfil, aunque no presenta la simplicidad que ofrece la forma potencial.

En el ajuste de tipo racional (10), el rango de variación de A está entre 3.350 y 87.296, con un valor medio de 35.76. En cuanto al coeficiente B, tiene un rango comprendido entre 0.025 y 0.170, con un valor medio de 0.087. El error (figura 6) es levemente superior al del ajuste exponencial pero notablemente inferior al que se obtiene si se usa una expresión potencial. El valor medio del error es de 0.40 m, aunque en un 70.31% de los casos es inferior a 0.50 m.

En las tablas 1, 2 y 3 se resumen, para los distintos grupos de perfiles, los rangos de los parámetros y sus valores medios en cada uno de los tres ajustes realizados.

Teniendo en cuenta los errores ε de ajuste de las tres formulaciones en cada uno de los 82 perfiles, se obtiene la tabla 4. En ella se indica, para cada una de estas expresiones, el número de perfiles en los que dicha expresión ajusta mejor (bajo la columna 1), peor (columna 3) o de forma intermedia entre las otras dos (columna 2).

Se constata pues que la expresión exponencial es la que ajusta mejor en la mayoría de los casos (62.2%), mientras que la formulación de tipo potencial es la que peor ajusta en la mayoría de los perfiles (84.1%). La expresión de tipo racional funciona bastante bien, ya que en el 25.6% de los perfiles es la mejor y en el 64.6% es la segunda que mejor ajusta. No obstante, hay que añadir que el comportamiento de esta última formulación es también muy satisfactorio y prácticamente

TABLA 1. Expresión tipo Dean. $z + Ay^B$

Sector	A	$\bar{A}$	B	$\bar{B}$
Malgrat	0.157-0.520	0.263	0.417-0.620	0.541
Maresme	0.037-0.337	0.095	0.495-0.972	0.793
Barcelona	0.122-0.282	0.226	0.570-0.816	0.699
Cubelles	0.025-0.082	0.039	0.648-0.876	0.798
D. Ebro	0.035-0.227	0.125	0.467-0.789	0.592
C. Catalana	0.025-0.520	0.118	0.417-0.987	0.699

TABLA 2. Expresión tipo exponencial. $e^z = A (y+y_0)^B$

Sector	ln A	$\bar{\ln A }$	B	$\bar{B}$
Malgrat	0.00 - 0.30	0.12	1.17-4.14	2.16
Maresme	1.72-38.49	16.22	1.22-7.64	3.95
Barcelona	11.69-19.84	15.28	3.51-5.07	4.20
Cubelles	15.15-20.77	17.85	3.04-4.06	3.52
D. Ebro	3.85-25.57	15.81	1.41-4.90	3.27
C. Catalana	0.00-53.71	15.74	1.17-10.69	3.65

TABLA 3. Expresión tipo racional. $z = y/(A+By)$

Sector	A	$\bar{A}$	B	$\bar{B}$
Malgrat	3.35-25.51	13.39	0.126-0.170	0.145
Maresme	9.39-27.45	20.26	0.025-0.144	0.075
Barcelona	7.51-11.08	9.29	0.068-0.095	0.083
Cubelles	46.54-63.79	55.20	0.066-0.128	0.093
D. Ebro	33.47-87.30	52.57	0.051-0.132	0.087
C. Catalana	3.35-87.30	35.35	0.417-0.987	0.086

TABLA 4. Calidad del ajuste de los perfiles

Expresión	1	2	3
Exponencial	51(62.2%)	26(31.7%)	5(6.1%)
Racional	21(25.6%)	53(64.6%)	8(9.8%)
Dean	10(12.2%)	3(3.7%)	69(84.1%)

comparable al de la ecuación exponencial, ya que las diferencias en la calidad del ajuste entre ambas son mínimas en la inmensa mayoría de los perfiles, como puede comprobarse en la tabla 5, en la que se muestran los rangos de valores de los errores y el error medio (entre paréntesis) en cada una de las zonas estudiadas.

En las figuras 7 y 8 se muestran, a modo de ejemplo, los ajustes de las tres formulaciones a dos perfiles distintos. En línea continua se muestra el perfil medido. Con 1 se hace referencia a la expresión potencial y con D también se indica dicha expresión aunque fijando el exponente $B=2/3$. Finalmente, 2 y 3 son los ajustes obtenidos con las formulaciones exponencial y racional respectivamente.

Posteriormente se buscaron perfiles representativos de cada una de las zonas analizadas. Para ello, en primer lugar, se determinó el perfil medio del sector y posteriormente se le ajustaron los distintos tipos de curva propuestos. Como se desprende del análisis de los resultados de los ajustes individuales de cada perfil, las curvas de tipo exponencial y racional modelan notablemente mejor que la propuesta por Dean en prácticamente todos los casos. En consecuencia, la situación se repite con los perfiles medios de cada sector, como era lógico esperar.

Las figuras 9, 10 y 11 ilustran esta afirmación. En ellas puede observarse el ajuste de las tres expresiones al perfil medio representativo de todo el sector del Delta del Ebro.

TABLA 5. Errores por sectores

Sector	ϵ Dean	ϵ exponencial	ϵ racional
Malgrat	0.91-1.59 (1.20)	0.69-1.11 (0.88)	0.67-1.22 (0.92)
Maresme	0.33-2.41 (1.14)	0.06-1.17 (0.45)	0.09-1.20 (0.49)
Barcelona	0.23-0.52 (0.41)	0.01-0.09 (0.04)	0.01-0.22 (0.10)
Cubelles	0.02-0.10 (0.06)	0.02-0.04 (0.03)	0.01-0.07 (0.03)
D. Ebro	0.29-1.64 (0.63)	0.12-0.83 (0.36)	0.12-0.91 (0.40)
C. Catalana	0.02-2.41 (0.75)	0.01-1.17 (0.36)	0.01-1.22 (0.40)

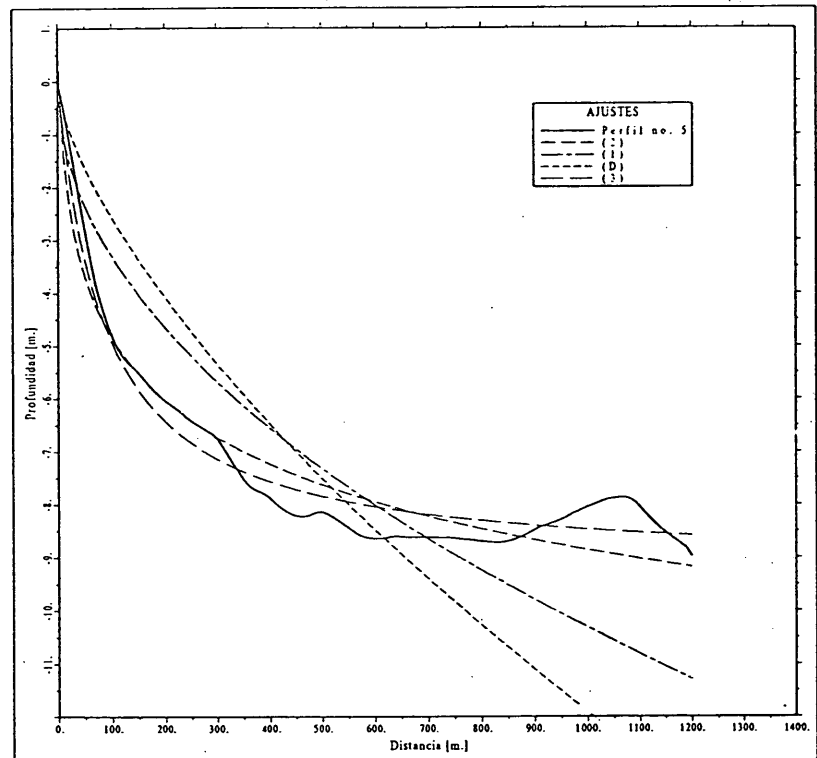


Figura 8. Ajuste perfil 5 Maresme

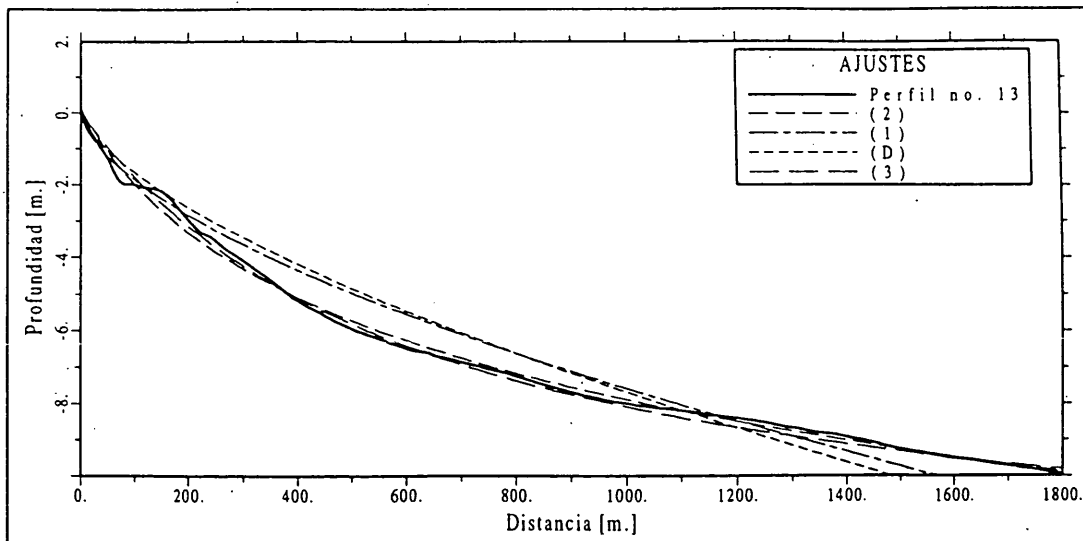


Figura 7. Ajuste perfil 13 Delta del Ebro

**Figura 9. Perfil medio
Delta Ebro.
Ajuste ecuación potencial**

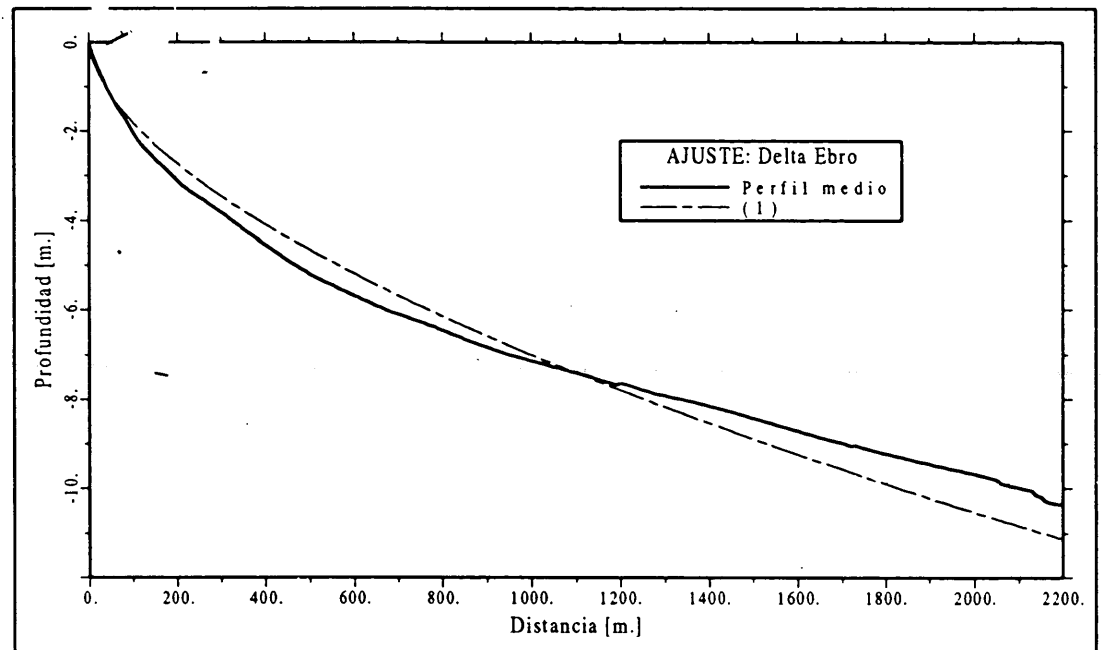


**Figura 10. Perfil medio
Delta Ebro.
Ajuste ecuación exponencial**

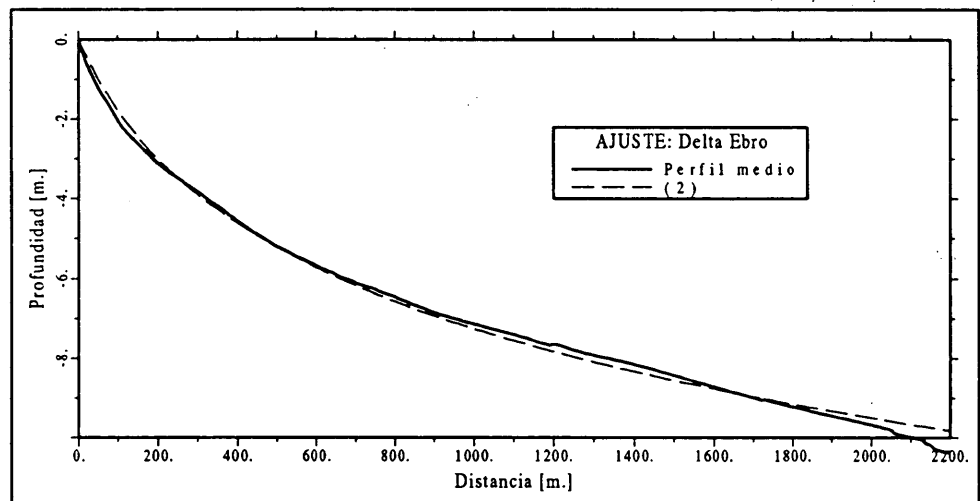
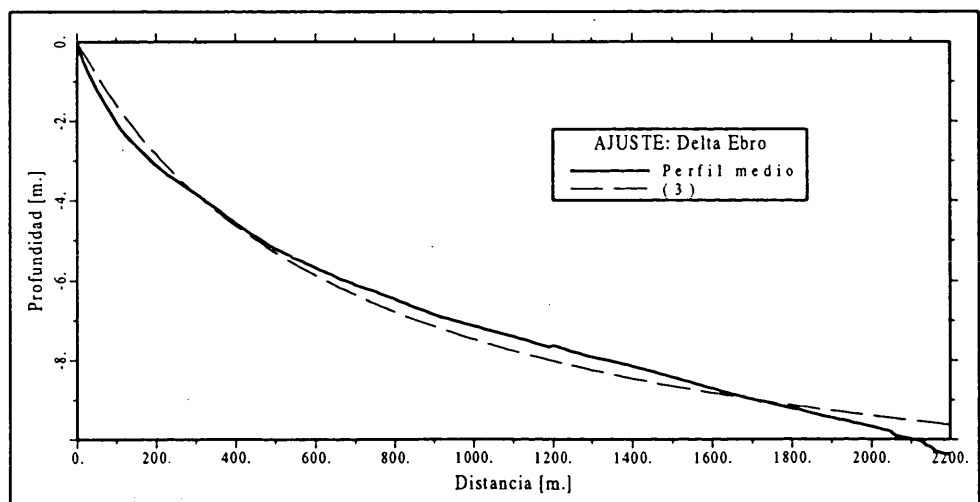


**Figura 11. Perfil medio
Delta Ebro.
Ajuste ecuación racional**



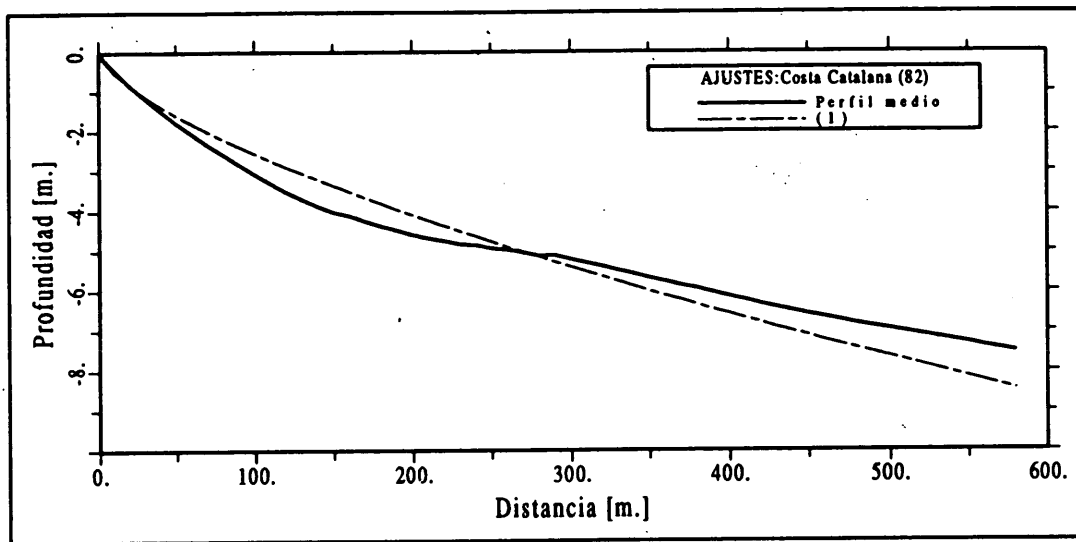


Figura 12. Perfil medio global.
Ajuste ecuación potencial

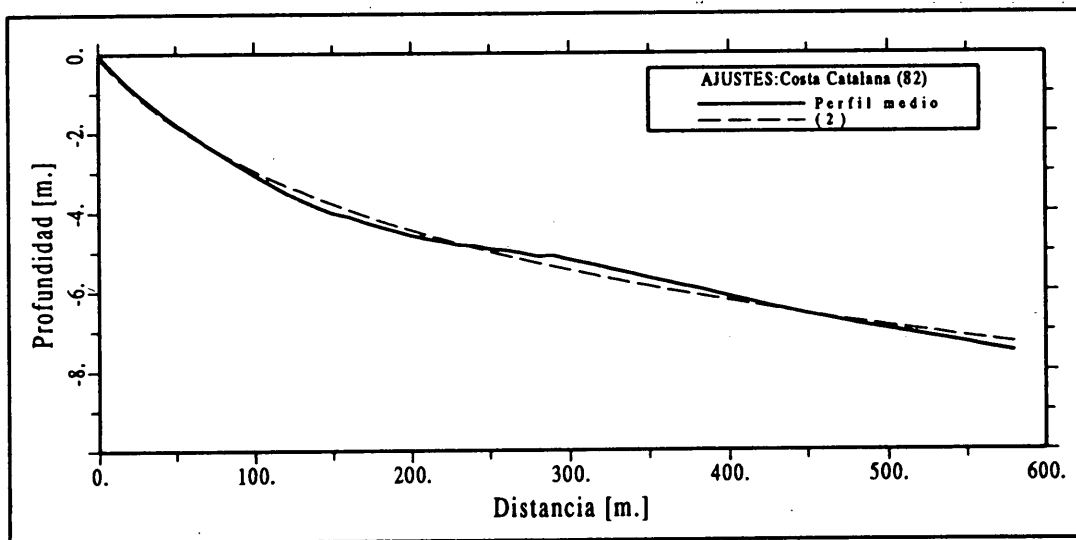


Figura 13. Perfil medio global.
Ajuste ecuación exponencial

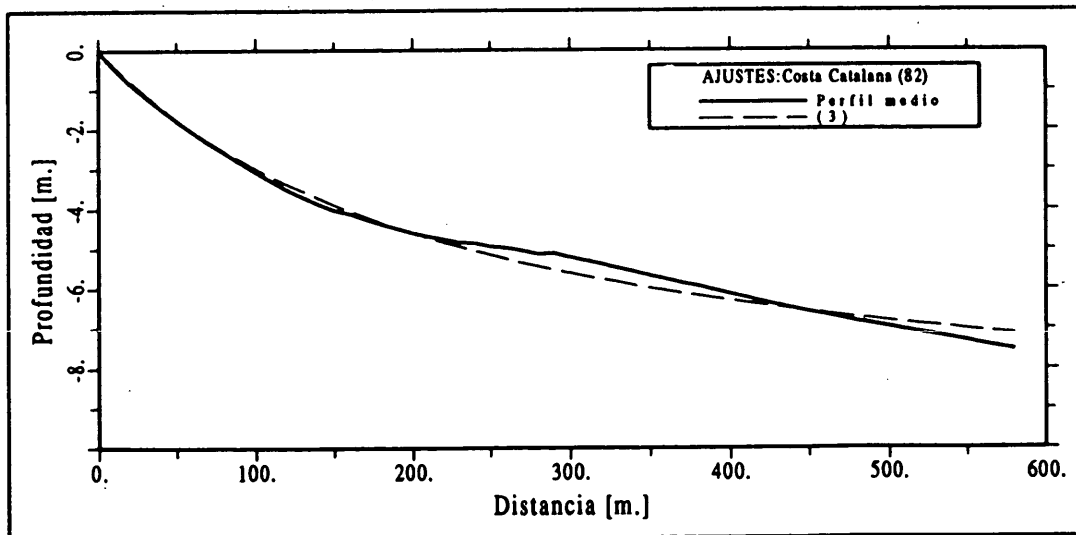


Figura 14. Perfil medio global.
Ajuste ecuación racional

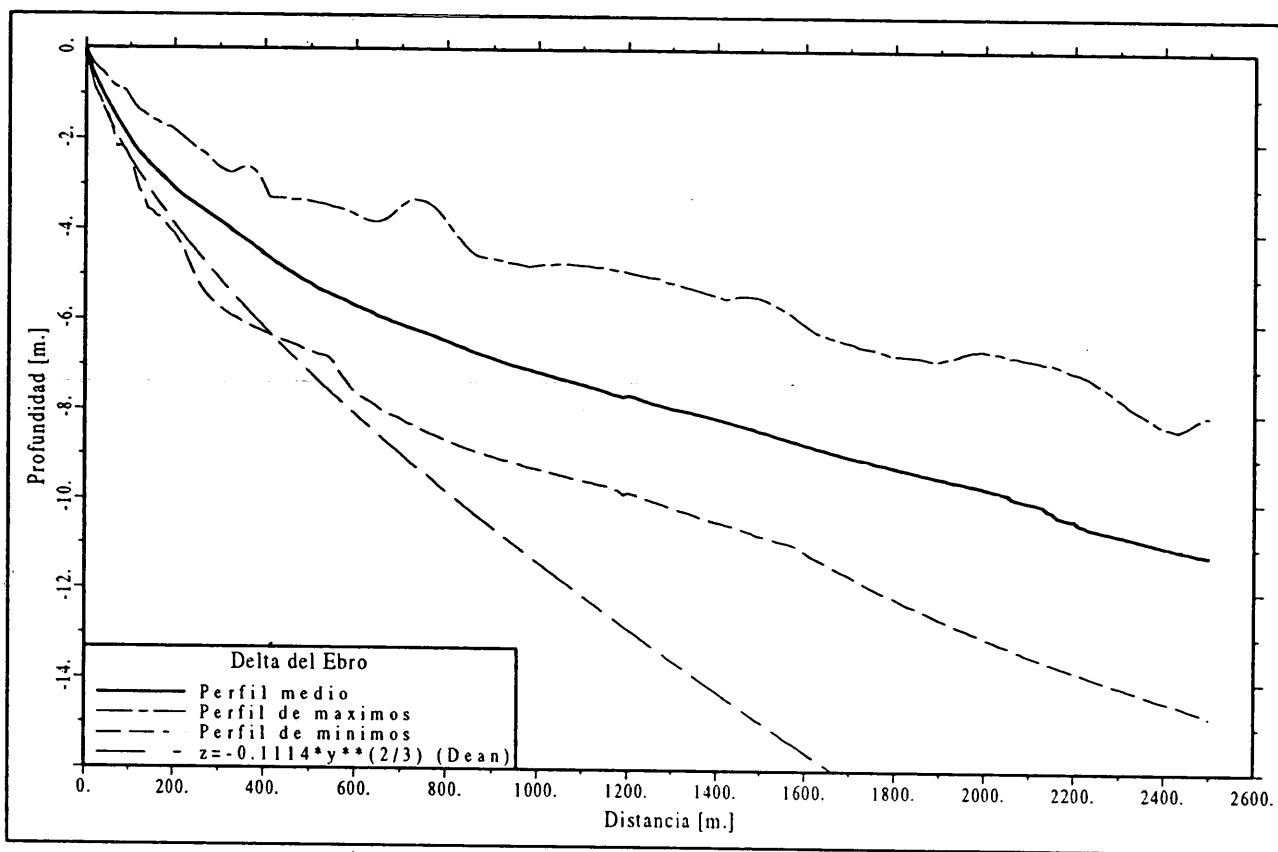


Figura 15. Curva de Dean-Moore. Delta del Ebro

También se ha hallado un perfil medio representativo de la Costa Catalana, promediando todos los perfiles analizados. A dicho perfil se le han ajustado las tres expresiones propuestas, comprobándose que se mantienen las tendencias observadas hasta ahora, es decir, que las ecuaciones exponencial y racional aproximan mejor dicho perfil que la expresión de Dean. En las figuras 12, 13 y 14 se muestran los tres ajustes.

Como ejemplo de las discrepancias entre las formulaciones existentes en la bibliografía y los perfiles de la Costa Catalana, en la figura 15 se ha dibujado, para el sector del Delta del Ebro, la curva propuesta por Dean (con el exponente $B = 2/3$), en la que A se ha evaluado teniendo en cuenta las expresiones de Moore (1982) mostradas anteriormente. En éstas, dicho coeficiente se obtiene en función del tamaño de grano del sedimento D_{50} . La mencionada curva se compara con el perfil medio del sector y con los perfiles de máximos y de mínimos (curvas que indican la mínima y la máxima profundidad respectivamente, en el conjunto de todos los perfiles del sector). Puede comprobarse que la curva obtenida, sobrepredice mucho las profundidades, de modo que con toda

ella queda incluso por debajo del perfil de mínimos.

La misma curva se ha representado para el conjunto de los perfiles de los sectores del Maresme y de Malgrat (figura 16). Puede apreciarse también una sobrepredicción de la profundidad, aunque no tan acusada como en el caso anterior, ya que aquí la curva teórica queda comprendida entre el perfil medio y el perfil de mínimos (salvo en un tramo en el que queda por debajo del perfil de mínimos). El hecho de que la curva teórica dé un resultado algo mejor que en el caso del Delta del Ebro puede ser debido a que las pendientes de la playa son mayores en la zona del Maresme (entre el 3 y el 4%) que en la del Delta (del orden del 1%), por lo que se parecen más a las del Atlántico, donde Dean y Moore dedujeron sus ecuaciones.

6. Conclusiones

Utilizando 82 perfiles de playa localizados en distintos puntos de la Costa Catalana y siguiendo una metodología similar a la empleada por Dean se ha analizado la forma de los perfiles de equili-

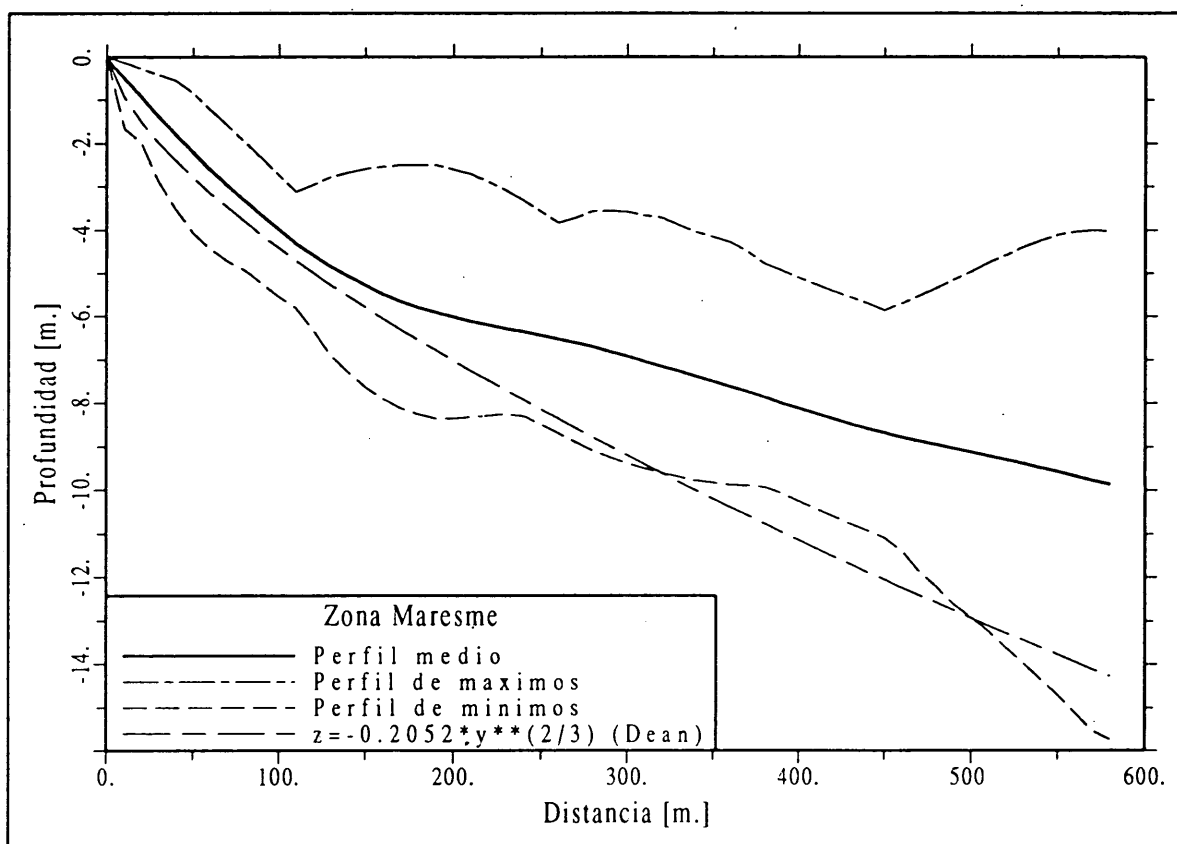


Figura 16. Curva de Dean-Moore. Zona Maresme-Malgrat

brio en dicha zona. Se ha comprobado que la expresión potencial propuesta por Dean ajusta con una bondad limitada los mencionados perfiles. En consecuencia, se han propuesto dos expresiones alternativas, una de forma exponencial y otra de tipo racional, que mejoran sustancialmente la reproducción de la forma de los perfiles de la Costa Catalana. Si bien la ecuación exponencial proporciona resultados ligeramente superiores, la formulación racional presenta una calidad predictiva similar y la diferencia entre ambas expresiones es mínima, por lo que ambas son adecuadas para modelar los perfiles de equilibrio en la zona de estudio.

Estos resultados cuestionan la supuesta universalidad del perfil de Dean, que obtuvo sus resultados analizando datos de la Costa del Atlántico de EEUU. Asimismo, se ha comprobado que utilizando además las curvas de Moore, que dan el parámetro de la ecuación de Dean en función del diámetro del sedimento, los valores de la profundidad calculados sobrepredicen en gran medida los valores reales (medidos). Este efecto de sobrepredicción es tanto mayor cuanto menor es la pendiente media de la playa.

Si bien el número de perfiles utilizados (82) puede parecer escaso frente al número (504) que utilizó Dean, los datos empleados en este estudio son más representativos en términos relativos, ya que corresponden a un tramo de costa mucho más corto (del orden de una décima parte).

Finalmente, una conclusión interesante del presente trabajo es la conveniencia de trabajar con curvas que ajusten las características de los perfiles locales, en lugar de utilizar expresiones supuestamente universales, cuya bondad no ha sido contrastada con los datos de la zona.

Agradecimientos

Los datos utilizados fueron extraídos de diversas campañas de medida realizadas en la Costa Catalana para distintos proyectos. Dichas campañas fueron financiadas en su mayoría por la Dirección General de Ports i Costes de la Generalitat de Catalunya, mientras que las restantes se debieron a la iniciativa de la Dirección General de Costas del MOPT. Los autores desean expresar su público agradecimiento a ambas instituciones. Tam-

bién se agradece a Eduardo González el trabajo de delineación de algunas figuras.

Referencias

- BAGNOLD, R.A.** (1946). "Motion of Waves in Shallow Water - Interaction Between Waves and Sand Bottoms". Proc. Roy. Soc., Ser. A, vol. 187.
- BODGE, K.R.** (1992). "Representing Beach Equilibrium Profiles with an Exponential Expression". J. of Coastal Research, vol. 8.
- BOWEN, A.J.** (1978). "Simple Models of Nearshore Sedimentation: Beach Profiles and Longshore Bars". Proc. Conf. Coastlines of Canada.
- BRUUN, P.** (1954). "Coast Erosion and the Development of Beach Profiles". Beach Erosion Board, Tech. Memo. no. 44.
- DEAN, R.G.** (1976). "Equilibrium Beach Profiles and Response to Storms". Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., Honolulu, Hawaii.
- DEAN, R.G.** (1977). "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts". Ocean Eng. Tech. Rep. no. 12, Univ. of Delaware, Newark.
- DEAN, R.G.** (1987). "Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions". Proc. ASCE, Specialty Conference on Coastal Sediments'87.
- DEAN, R.G.** (1991). "Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications". J. of Coastal Research, vol. 7.
- EAGLESON, P.S., B. GLENNE and J.A. DRACUP** (1963). "Equilibrium Characteristics of Sand Beaches". J. Hydraulics Div., ASCE, vol. 89, no. HY1.
- FENNEMAN, N.M.** (1902). "Development of the Profile of Equilibrium of the Subaqueous Shore Terrace". J. of Geology, vol. X.
- GELONCH, G. ET AL.** (1989). "Seguiment de l'evolució de les platges del Maresme. Anys 1987 i 1988". Informe técnico D.G. Ports i Costes, Generalitat de Catalunya.
- GELONCH, G. ET AL.** (1990). "Anàlisi del comportament de les platges regenerades al Maresme. Memoria anual (Set. 1989-Jul. 1990)". Informe técnico D.G. Ports i Costes, Generalitat de Catalunya.
- HANDS, E.B.** (1983). "The Great Lakes as a Test Model for Profile Responses to Sea Level Changes". In CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, Ed. P.D. Komar, CRC Press, Inc.
- HANSON, H. and N.C. KRAUSS** (1989). "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change". CERC, Tech. Rep. 89-19.
- JIMENEZ, J.A., V. GRACIA, M.A. GARCIA y A. SANCHEZ ARCILLA** (1992). "Anàlisi i proposta de solucions para estabilizar el Delta del Ebro: Balance sedimentario y esquemas de transporte". Informe técnico LT-3/4, D.G. Ports i Costes, Generalitat de Catalunya.
- KRIEBEL, D.L., N.C. KRAUS and M. LARSON** (1991). "Engineering Methods for Predicting Beach Profile Response". Coastal Sediments'91, ASCE.
- LARSON, M.** (1988). "Quantification of Beach Profile Change". Rep. no. 1008, Dep. of Water Resources Eng., Univ. of Lund, Sweden.
- LARSON, M. and N.C. KRAUS** (1989). "Prediction of Beach Fill Response to Varying Waves and Water Level". Proc. Coastal Zone '89, ASCE.
- MCDUGAL, W.G. and HUDSPETH, R.T.** (1983). "Longshore Sediment Transport on Non-plane Beaches". Coastal Engineering, vol. 7.
- MCDUGAL, W.G. and HUDSPETH, R.T.** (1989). "Longshore Current Sediment Transport on Composite Beaches". Coastal Engineering, vol. 12.
- MOORE, B.** (1982). "Beach Profile Evolution in Response to Changes in Water Level and Wave Height". M.S. Thesis, Dep. of Civil Eng., Univ. of Delaware, Newark.
- SERRA, J. ET AL.** (1990). "Anàlisi del comportament de les platges regenerades al Maresme. 1a. Memoria". Inf. Tec., Univ. Barcelona.
- WALTON, T.L. and CHUI, T.Y.** (1979). "A Review of Analytical Techniques to Solve the Sand Transport Equation and some Simplified Solutions". Proc. Coastal Structures'79, ASCE. ■