



EFECTO DE LA REFLEXIÓN SOBRE LA FORMA DE EQUILIBRIO DEL PERFIL DE PLAYA: VALIDACIÓN PARA LA COSTA DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Energy reflection effect on the beach profile morphology: validation for the Iberian Peninsula coast

A.M. Bernabeu⁽¹⁾, R. Medina ⁽²⁾ y C. Vidal ⁽²⁾

¹ Dpto. de Geociencias Marinas, Facultad de Ciencias, Universidad de Vigo, 36200 Vigo.
e-mail: bernabeu@uvigo.es

² Dpto. de Ciencias y Técnicas del Agua y del M. A., Universidad de Cantabria, 39005 Santander.

Resumen: El oleaje es el proceso dinámico más energético que afecta a la costa. La energía del oleaje incidente al alcanzar una playa sufre procesos de disipación y reflexión que van a tener una influencia distinta sobre la morfología del perfil. Se propone un perfil de equilibrio, considerando las diferentes fuerzas que actúan sobre el perfil: disipación por rotura y por fricción con el fondo. La aportación principal de este trabajo es la inclusión de la reflexión en el modelo. Como resultado se obtiene un perfil de equilibrio en dos tramos: perfil de rotura y perfil de asomeramiento, que describe de forma precisa la morfología de la playa. El modelo fue validado con perfiles medidos en la costa de la Península Ibérica. Los resultados permiten caracterizar y predecir la morfología del perfil de playa a partir de los coeficientes del modelo y su relación con las condiciones de oleaje y tamaño de grano.

Palabras clave: oleaje, disipación, reflexión, perfil de playa, morfología, Península Ibérica.

Abstract: Waves are the most energetic process affecting the coastline. When the incident wave reaches the beach its energy is partially dissipated and partially reflected, changing the beach profile. We propose a two-section equilibrium profile model based on the different forces that act along the beach: the breaker and the bottom friction dissipation. The improvement of this model is to incorporate reflection that under certain conditions has an important influence on the beach morphology. The proposed equilibrium beach profile is composed by a surf profile and a shoaling profile. The obtained expressions are composed by two terms associated to each wave phenomena. We have validated this model with measured profiles along the Iberian Peninsula coast. The results allow characterization and prediction of the beach profile morphology using the coefficients, associated to the wave energy dissipation and reflection, and its relationship with wave climate conditions and grain size.

Keywords: waves, dissipation, reflection, beach profile, morphology, Iberian Peninsula.



Bernabeu, A. M., Medina, R. y Vidal, C. (2002). Efecto de la reflexión sobre la forma de equilibrio del perfil de playa: validación para la costa de la Península Ibérica. *Rev. C. & G.*, 16-(1-4), 83-95.

1. Introducción

El oleaje, las mareas y las corrientes son los mecanismos dinámicos encargados de la erosión, transporte y sedimentación del material en la costa. En último término, la morfología de los distintos ambientes sedimentarios litorales vendrá determinada por el aporte sedimentario y por la importancia relativa de cada uno de estos agentes.

En una playa, el proceso más energético es el oleaje y será por tanto el que defina sus características

morfológicas. Así, se definen perfiles de verano o de invierno en función de las variaciones estacionales en el clima marítimo o se puede apreciar grandes movimientos de arena tras un temporal, donde desaparece el sedimento de la parte supramareal de la playa para depositarse en su parte sumergida suavizando la pendiente media del perfil. Todas estas transformaciones están relacionadas directamente con el modo en que la energía del oleaje incidente se reparte a lo largo del perfil, siendo la disipación y la reflexión de energía los mecanismos principales.

Antes de la rompiente, la disipación debida a la fricción en el fondo es el proceso principal de atenuación energética. Cuando la ola rompe, el mecanismo dominante es la disipación turbulenta de la energía de la onda. Teniendo en cuenta este fenómeno, se han desarrollado numerosos modelos que tratan de caracterizar la morfología de un perfil de playa asociada a la disipación de energía a través del concepto de perfil de equilibrio (Bruun, 1954; Dean, 1977; Bodge, 1992; Komar y McDougal, 1994; Muñoz-Pérez et al., 1999). Como perfil de equilibrio se entiende la morfología que alcanzará un perfil de playa expuesto a unas condiciones de oleaje constantes, fundamentalmente altura de ola y período, y compuesto por un tamaño de grano determinado (Larson, 1991; Dean, 1991). Para playas naturales, donde el oleaje varía constantemente, se considera el perfil de equilibrio dinámico (González, 1995) como el perfil de playa más frecuente o estado modal del perfil de playa. En este

sentido, Benavente et al. (2000) establecen una relación empírica entre la pendiente del perfil intermareal y la altura y período del oleaje a través de un nuevo parámetro, el factor de erosividad del oleaje. Dicha relación da idea de la condición de equilibrio del perfil de playa. Recientemente, Bernabeu et al. (2001) proponen un modelo de perfil de equilibrio donde las condiciones del oleaje son determinantes. En este modelo se asume que la energía incidente del oleaje sobre una playa se disipaba bien por rotura, bien por fricción con el fondo. Basándose en el trabajo de Inman et al. (1993), se establece una zonación a lo largo del perfil, diferenciando entre perfil de rotura y perfil de asomeramiento (figura 1). El perfil en dos tramos es la base del modelo que se presenta en este trabajo.

En la Naturaleza, las playas no siempre son capaces de disipar toda la energía del oleaje incidente. Parte de esta energía es reflejada por el propio perfil hacia aguas más profundas. Elgar et al.

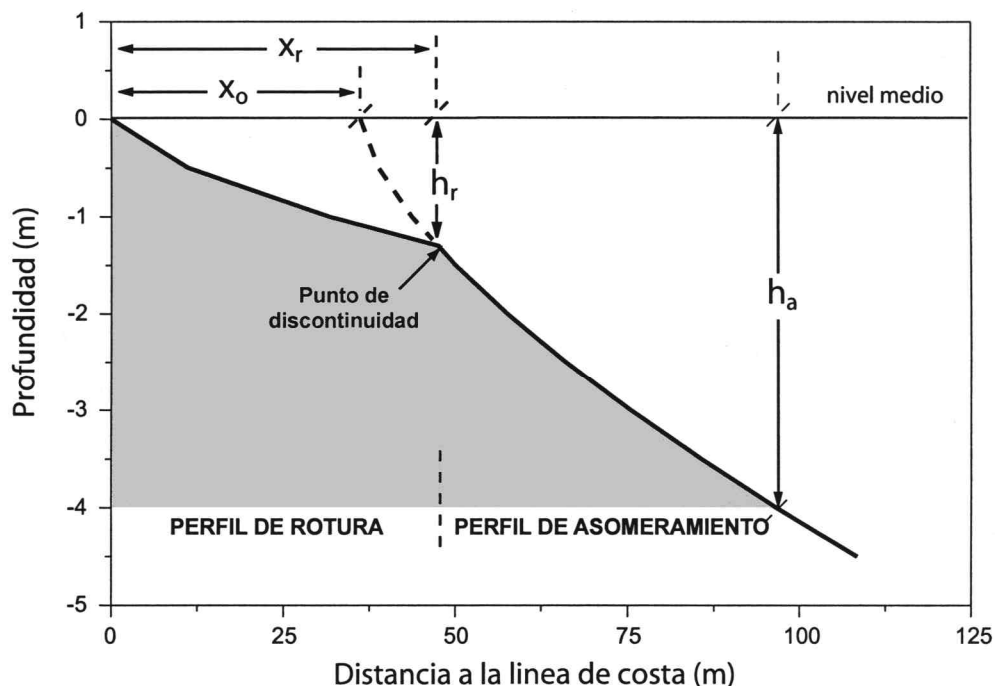


Figura 1. Esquema del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos con reflexión propuesto: x_r es la distancia horizontal entre el inicio del perfil de rotura sobre la línea de costa y el punto de discontinuidad del perfil, h_r es la profundidad del punto de discontinuidad, x_o define el desplazamiento del perfil de asomeramiento respecto a un sistema de referencia situado sobre la línea de costa, h_a profundidad límite de validez del modelo propuesto.

Figure 1. Scheme of the two-section equilibrium profile considering reflection: x_r is the horizontal distance between the surf profile beginning on the shoreline and the discontinuity point of the profile; h_r is the discontinuity point depth; x_o is the displacement of shoaling profile respect to the shoreline; h_a limiting depth of the validity of the proposed model.

(1994), a partir de datos medidos en el campo, estimaron que la energía reflejada por una playa podía alcanzar valores del 18 % de la energía incidente. A pesar de ello, existen escasos estudios sobre la influencia de este fenómeno en la morfología de una playa. Una de las primeras referencias aparece en el ámbito de la morfodinámica de playas, dentro del modelo de playas micromareales propuesto por Wright y Short (1984), donde se establecen dos estados morfodinámicos extremos: disipativo y reflectivo, diferenciados en función de su comportamiento hidrodinámico y morfológico. En el campo de la modelación del perfil de equilibrio de playa, González (1995) fue el primero que integró el fenómeno de reflexión. Sin embargo, este modelo presentaba un inconveniente importante ya que no fue validado con datos reales.

Así, el objetivo fundamental de este trabajo es desarrollar un nuevo modelo de perfil de equilibrio de playa. Tomando como base el modelo en dos tramos desarrollado por Bernabeu et al. (2001), se pretende analizar el efecto de la reflexión sobre el perfil de playa. Esto permitirá integrar en el modelo los efectos generados por los fenómenos de disipación y reflexión de energía. El modelo propuesto será validado con perfiles medidos a lo largo de la costa española. Las expresiones de ajuste obtenidas confieren al modelo capacidad predictiva, conocidas las características hidrodinámicas y sedimentológicas de la playa. Apartir de los resultados obtenidos en este trabajo, se perfila la utilidad y el potencial del concepto de perfil de equilibrio en un ámbito más amplio como es la morfodinámica de playas, siendo éste el objetivo de futuros trabajos.

La capacidad de representar un perfil de playa de la forma más precisa posible es fundamental en la gestión del litoral y, en concreto, en proyectos de regeneración de playas. En dichos proyectos el coste final de la actuación y, por tanto, su viabilidad depende directamente del volumen de arena necesario. Dicho volumen se estima a partir de la predicción del perfil de equilibrio de la playa tras la regeneración con el material de relleno utilizado. Además, en cualquier estudio a medio o largo plazo de una playa, el ajuste del perfil de equilibrio a los perfiles medidos asocia un coeficiente a cada perfil, permitiendo cuantificar de este modo las variaciones morfológicas del perfil de playa a lo largo del tiempo.

2. Influencia de la reflexión en el perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio

El modelo de perfil de equilibrio propuesto por Bernabeu et al. (2001) partía de la ecuación del balance energético a lo largo del perfil. En este modelo se asumía que la energía incidente del oleaje sobre una playa se atenúa exclusivamente por disipación. El proceso de disipación de energía predominante variaba a lo largo del perfil pasando de disipación por fricción con el fondo fuera de la zona de rompientes a disipación por turbulencia dentro de la zona de rompientes. Esto permitía establecer una zonación a lo largo del perfil y definir una formulación de equilibrio para cada tramo: perfil de rotura y perfil de asomeramiento (figura 1). La intersección entre ambos tramos coincidía con el punto de rotura.

Diversos autores han puesto de manifiesto la importancia de la reflexión a lo largo de un perfil de playa bajo determinadas condiciones, tanto a partir de datos de campo (Elgar et al., 1994) como de laboratorio (Miche, 1951). Para analizar la influencia de este proceso en la morfología del perfil de playa, se incorporó este fenómeno a la formulación de equilibrio. Por tanto, consideramos como flujo total en una sección del perfil a la suma del flujo incidente y el flujo reflejado (figura 2):

$$(1) \quad F_t = F_i - F_r$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación de balance energético, para el caso ideal de batimetría regular, nos quedará:

$$(2) \quad \frac{dF_t}{dx} = \frac{dF_i}{dx} - \frac{dF_r}{dx} =$$

donde F_i es el flujo de energía incidente, en dirección hacia la costa, y F_r es el flujo de energía reflejada (en dirección hacia el mar) que atraviesan una determinada sección del perfil, es la disipación por unidad de área y dx es el incremento de distancia a la costa. La expresión (2) describe la diferencia entre el flujo de energía que atraviesa la sección a, F_a , y la sección b, F_b , debida a los procesos de disipación (turbulencia debida a la rotura y fricción con el fondo) y a la reflexión generada por el propio perfil (figura 2). La ecuación de balance energético con reflexión se define en cada tramo del perfil de playa.

2.1. Perfil de rotura

Dentro de la zona de rompientes, el fenómeno principal de disipación de energía es la turbulencia asociada a la rompiente (Thornton y Guza, 1983). Por tanto en este tramo del perfil, la expresión (2) viene definida como:

$$(3) \quad \frac{1}{h} \frac{dF_i}{dx} - \frac{dF_R}{dx} = \frac{r}{h} = D^* = \text{cte}$$

donde D_r^* es la disipación de energía incidente debida a la turbulencia por unidad de volumen que se asume constante en la zona de rompientes (Dean, 1977), F_R es el flujo de energía reflejado, que se define como función de la geometría del fondo y de la longitud de onda (Goring, 1978; Kirby y Vengayil, 1988) y F_i viene definido según la teoría lineal de ondas (Airy, 1945) como:

$$(4) \quad F = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh}$$

donde ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad, H es la altura de ola y h es la profundidad.

Asumiendo una relación constante entre altura de onda y profundidad, $H = \alpha h$, a lo largo de la zona de rompiente (Horikawa y Kuo, 1966; Thornton y Guza, 1983), integramos la ecuación de balance energético (3), obteniendo:

$$x = \frac{h}{A} \frac{2}{3} + \frac{B}{A \frac{2}{3}} h^3, \quad 0 \leq x \leq x_r$$

El perfil de rotura con reflexión viene definido por la suma de dos términos. El primero de ellos coincide con la expresión del perfil de Dean (1977), modelo ampliamente utilizado por su simplicidad matemática:

$$h = A x^{\frac{2}{3}}$$

Este término también coincide con el perfil de rotura, considerando sólo disipación, propuesto por Bernabeu et al. (2001). El segundo término, aparece al introducir el fenómeno de reflexión en el modelo. Cada término de la expresión (5) viene caracterizado por dos coeficientes: el coeficiente dimensional A ($m^{1/2}$) que depende de la disipación por unidad de volumen que se genera a lo largo del perfil y el coeficiente dimensional B ($m^{-3/2}$) asociado a la reflexión. En playas disipativas, caracte-

rizadas por pendientes muy suaves y una reflexión de energía muy baja, el segundo término de la expresión (5) se anulará (B-0) y el modelo propuesto se reduce al perfil de rotura de Bernabeu et al. (2001). Dean (1987) relacionó empíricamente el coeficiente A con el tamaño de grano de la playa, a través de la velocidad de sedimentación. Posteriormente, Bernabeu et al. (2001) establecieron una expresión de ajuste entre el coeficiente A y las condiciones de oleaje y tamaño de grano, mediante el parámetro adimensional de caída de grano o parámetro de Dean: $\alpha = H/wT$ (H = altura de ola; w = velocidad de sedimentación; T = período de la onda).

2.2. Perfil de asomeramiento

Fuera de la zona de rompientes, se asume que la disipación por unidad de área debida a la fricción con el fondo es constante (Bruun, 1954). Para el caso de perfiles con reflexión, la formalización del

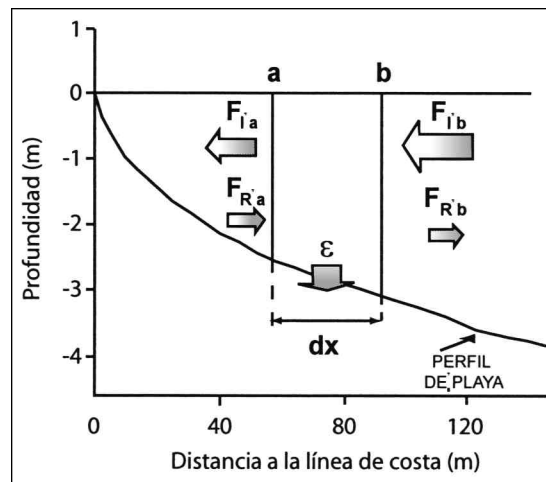


Figura 2. Variación del flujo de energía incidente del oleaje a lo largo del perfil de playa. F_{ib} es el flujo de energía incidente que atraviesa la sección b, F_{ia} es el flujo de energía incidente que atraviesa la sección a, F_{rb} es el flujo de energía reflejada que atraviesa la sección b, F_{ra} es el flujo de energía reflejada que atraviesa la sección a y ϵ es la disipación de energía incidente entre las secciones a y b del perfil.

Figure 2. Variation of the incident energy flux along the beach profile. F_{ib} is the incident energy flux crossing section b; F_{ia} is the incident energy flux crossing section a; F_{rb} is the reflected energy flux crossing section b; F_{ra} is the reflected energy flux crossing section a and ϵ is the incident energy dissipation between section a and b.

equilibrio energético coincidirá con la expresión general dada por la ecuación (2):

$$(7) \quad \frac{dF_i}{dx} - \frac{dF_R}{dx} = r = D^* = \text{cte}$$

donde D_f^* es la disipación de energía incidente, debida a la fricción con el fondo, por unidad de área.

Puesto que estamos asumiendo que parte de la energía incidente se disipa durante la propagación del oleaje, la relación entre la altura de ola-profundidad dada por la ley de Green no será válida dentro de este modelo. En este caso, dicha relación se ha definido como, $H = \sqrt{h}$ (Bernabeu, 1999), donde \sqrt{h} es un coeficiente constante para cada playa pero que cambia de una playas a otras. Integrando la expresión (7), llegamos a la formulación:

$$(8) \quad X = x - x_0 = \frac{h}{C} \sqrt[3]{2} + \frac{D}{C \sqrt[3]{2}} h^3 \quad x_r \quad x \quad x_a$$

El perfil de asomeramiento queda definido por una expresión similar a la del perfil de rotura, desplazado una distancia x_0 del sistema de referencia situado sobre la línea de costa o inicio del perfil de rotura. En este caso, el coeficiente dimensional C ($m^{1/3}$) está relacionado con el fenómeno de disipación. Al introducir el fenómeno de reflexión, en el perfil de asomeramiento definimos el coeficiente dimensional D ($m^{-3/2}$).

3. Validación del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos con reflexión

El modelo analítico de perfil de equilibrio propuesto ha sido contrastado con perfiles de playa medidos a lo largo de la costa de la Península Ibérica. Esto permitirá verificar la validez del modelo y determinar la relación entre los coeficientes (A , B , C y D) y las características sedimentarias y de oleaje del perfil de playa.

3.1. Descripción de los datos

Los datos utilizados para la validación, tanto los perfiles de playa como las características sedimentarias, están recopilados en los trabajos de Gómez-Pina (1995) y Galofré (2001).

Las playas de Zumaia, Zarautz, Bakio, San Lorenzo y Carranques se localizan en la cornisa

Cantábrica (figura 3). Se caracterizan por ser playas encajadas entre dos salientes costeros, con longitudes que varían entre 200 y 2.500 m., donde la variabilidad estacional está asociada fundamentalmente al transporte transversal. El número de perfiles medidos en cada playa variaba según su longitud y características desde un único perfil medido en la playa de Zumaia hasta diez perfiles en la playa de Zarautz. En cada una de las playas estudiadas se seleccionó un perfil representativo, en la zona central de la playa, evitando en la medida de lo posible el efecto de los contornos sobre el oleaje que alcanza la playa. De este modo, se asumía que la evolución del oleaje a lo largo del perfil era debida, fundamentalmente, a las características batimétricas y sedimentarias del mismo. Las playas de La Antilla, Castilla y la Barrosa están situadas en la costa Atlántica del SO de la Península Ibérica. La costa presenta una alineación general NNW-SSE. El número de perfiles medidos en cada playa fue de 4, 2 y 3, respectivamente. Estas playas son lineales con longitudes del orden de miles de metros (tabla 1), donde el oleaje no se va a ver afectado por los contornos en su propagación hacia la costa, los procesos fundamentales serán la refracción y el asomeramiento. La playa del Vendrell se encuentra en la costa Mediterránea, con una orientación en este tramo es NE-SO. Es una playa abierta con una extensión de 12 km, donde la variabilidad estacional es debida tanto al transporte transversal como longitudinal.

Para la caracterización sedimentaria, se consideró la mediana (D_{50}) de la distribución granulométrica como parámetro representativo. El número de muestras recogidas por perfil variaba en función de la longitud del mismo (tabla 1). En los perfiles analizados, el tamaño de grano se obtuvo promediando los valores de las muestras recogidas en cada una de las playas, definiendo un valor para la zona intermareal y otro valor para la zona sumergida.

Los datos de oleaje se extrajeron de los registros medidos por las boyas de la Red Española de Medida y Registro de Oleaje (REMRO). Para cada caso se ha seleccionado la boya más cercana. Así, para las playas de la cornisa Cantábrica se tuvieron en cuenta las boyas de Bilbao y Gijón. Para las playas de la costa Atlántica se utilizaron las boyas de Cádiz y Sevilla y para la playa del Vendrell en la costa Mediterránea se utilizaron los datos de la boya de Tarragona. La dirección de mayor frecuen-

Tabla 1. Características de las campañas, condiciones de oleaje (altura de ola significativa, H_s , y período de pico, T_p) y tamaño de grano correspondientes a las playas estudiadas. (T) hace referencia a perfiles medidos en condiciones de temporal.

Table 1. Characteristics of the surveys, wave climate conditions (significant wave height, H_s , and peak period, T_p) and grain size of the studied beaches. (T) referred to measured beach profile associated to storm conditions.

Localización (Figura 5)	PLAYA	Longitud playa (m)	Perfiles medidos	Nº muestras	H_s (m)	T_p (s)	D_{50} (mm)	
							Perfil de rotura	Perfil de . asomeram
1	Zumaia	270	1	4	0.82	9.73	0.44	0.30
1	Zumaia (T)	-	-	-	2.56	12.67	0.44	0.30
2	Zarautz	2500	10	8	1.94	12.68	0.35	0.25
3	Bakio	540	5	3	0.94	9.10	0.30	0.23
4	San Lorenzo	1200	4	12	0.80	7.41	0.34	0.25
4	San Lorenzo (T)	-	-	-	2.3	11.68	0.34	0.25
5	Carranques	220	2	9	0.58	8.89	0.36	0.23
6	Castilla	24000	42	9	0.63	6.95	0.35	0.20
7	La Antilla	16000	4	9	0.76	9.71	0.35	0.22
8	La Barrosa	7000	3	6	0.82	8.58	0.33	0.23
9	El Vendrell	12000	21	6	0.54	6.9	0.27	0.19

cia de presentación se obtuvo del código ROM 0.3-91 Oleaje. Anejo I: Clima Marítimo en el Litoral Español (MOPT, 1992). Los datos de altura y período considerados correspondían a la altura de ola significativa (H_s) y el período de pico (T_p) medios del mes anterior a la toma del perfil, siendo estos los valores que mejor se ajustaban al modelo propuesto. Considerando la dirección incidente más frecuente, se estimó la transformación del oleaje hasta la profundidad de cierre (Hallermeier, 1981) de cada una de las playas, considerando exclusivamente los fenómenos de refracción y asomeramiento. En la tabla 1 se presentan los valores de altura de ola significativa y período de pico locales para cada playa.

Todas las playas analizadas son playas mesomareales, excepto la playa del Vendrell en la costa mediterránea, que es micromareal. El rango de marea modal varía desde un valor de 3.65 m. en las playas de Zumaia, Zarautz y Bakio, a un valor de 3.25 m. para las playas de San Lorenzo y Carranques, disminuye a 2.65 m. para las playas del Atlántico y a un valor de 40 cm. en la playa del Vendrell.

Debido a la variación del tamaño de grano entre el perfil de rotura y el perfil de asomeramiento, se definió un valor del parámetro $\lambda = H/wT$ para cada uno de estos tramos, λ_{em} asociado al perfil de rotura y λ_{sum} asociado al perfil de asomeramiento (tabla 2). En la figura 4 se contrastan ambos valo-

res de λ , comprobando la relación lineal existente entre ambos parámetros. Basándonos en esta relación entre λ_{em} y λ_{sum} , se ha unificado el modelo de perfil propuesto. Así, los coeficientes del perfil de asomeramiento, C y D, se analizan respecto al parámetro adimensional de caída de grano del perfil de rotura, λ_{em} . Esto supone una ventaja importante en la aplicación práctica del modelo. Conocido el tamaño de grano de perfil de rotura (más sencillo de obtener debido a la mayor accesibilidad de la zona intermareal frente al tramo sumergido), podremos caracterizar los cuatro coeficientes del perfil de equilibrio en dos tramos con reflexión.

3.2. Validación del modelo propuesto

En la figura 5 se presentan los ajustes del modelo propuesto, definido por las expresiones (5) y (8), a cada una de las playas estudiadas. La diferenciación entre el tramo de rotura y el tramo de asomeramiento se propuso en trabajos anteriores (Medina et al., 2000; Bernabeu et al., 2001), permitiendo ajustar mejor la morfología del perfil de playa al considerar la inflexión asociada al punto de rotura. Al introducir el fenómeno de reflexión, la formulación teórica es capaz de describir con mayor aproximación cada uno de los tramos del perfil. La comparación del modelo con los datos permitió obtener los valores de mejor ajuste de los coefi-

Tabla 2. Coeficientes de ajuste del modelo en dos tramos: coeficientes A y B del perfil de rotura y coeficientes C y D del perfil de asomeramiento y parámetro adimensional de caída de grano estimado para cada playa.

Table 2. Fitting coefficients of the two-section model: coefficients A and B for surf profile; C and D for shoaling profile and the dimensionless fall velocity estimated to each beach.

PLAYAS	A	B	Ω_{em}	C	D	Ω_{sum}
Zumaia	0.18	0.07	1.52	0.14	0.06	2.32
Zumaia T	0.155	0.02	3.64	0.23	0.02	5.55
Zarautz	0.12	0.005	3.55	0.25	0.008	5.10
Bakio	0.15	0.02	2.84	0.1	0.02	3.80
San Lorenzo	0.13	0.05	2.58	0.1	0.06	3.63
S. Lorenzo T	0.13	0.015	4.71	0.2	0.02	6.63
Carranques	0.18	0.01	1.47	0.11	0.005	2.40
La Barrosa	0.15	0.03	2.37	0.17	0.01	3.51
Castilla	0.19	0.09	2.10	0.12	0.09	3.89
Antilla	0.2	0.2	1.81	0.1	0.08	3.02
El Vendrell	0.14	0.05	2.41	0.2	0.01	3.56

cientos A, B, C y D correspondientes a cada uno de los perfiles de estudio (tabla 2).

Se analizó la relación entre dichos coeficientes y las principales variables que determinan la forma de perfil, tamaño de grano y clima marítimo, a través del parámetro adimensional de caída de grano, correspondiente al tramo de rotura. En la figura 6 (a, b, c y d) se comparan los coeficientes del modelo con el parámetro adimensional de caída de grano. Para el rango de valores $1 < \Omega_{em} < 5$, los ajustes obtenidos son:

$$(9) \quad A = (0.21 - 0.02 \Omega_{em})$$

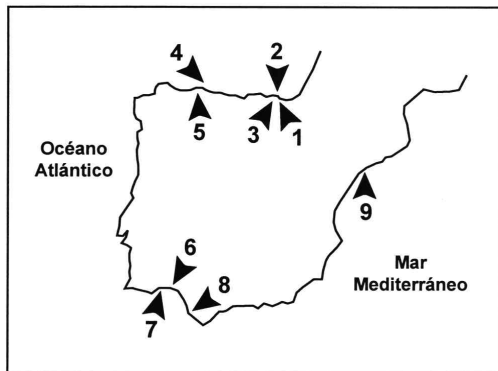


Figura 3. Localización de las playas estudiadas: 1) playa de Zumaia; 2) playa de Zarautz; 3) playa de Bakio; 4) playa de San Lorenzo; 5) playa de Carranques; 6) playa de la Antilla; 7) playa de Castilla; 8) playa de La Barrosa y 9) playa del Vendrell.

Figure 3. Location of the studied beaches: 1) Zumaia beach; 2) Zarautz beach; 3) Bakio beach; 4) San Lorenzo beach; 5) Carranques beach; 6) La Antilla beach; 7) Castilla Beach; 8) La Barrosa beach and 9) El Vendrell beach.

Las expresiones de ajuste obtenidas para el perfil de rotura, (9) y (10), establecen un aumento de los coeficientes A y B a medida que Ω_{em} disminuye. En cuanto al perfil de asomeramiento, la relación (11) determina que el coeficiente C aumenta a medida que la playa se hace más disipativa. A tamaño de grano constante, los valores del coeficiente C son mayores que los del coeficiente A cuando la playa se encuentra en estado disipativo y son menores para estados reflectivos. Como ocurría con el coeficiente B, el coeficiente D aumenta a medida que Ω_{em} disminuye.

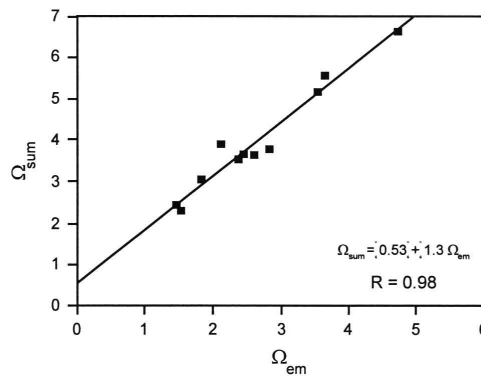


Figura 4. Relación lineal entre el parámetro adimensional de caída de grano, $\Omega_{em} = H/wT$ del perfil de rotura (Ω_{em}) y del perfil de asomeramiento (Ω_{sum}).

Figure 4. Linear relationship between the dimensionless fall velocity, $\Omega_{em} = H/wT$, for surf (Ω_{em}) and shoaling (Ω_{sum}) profile.

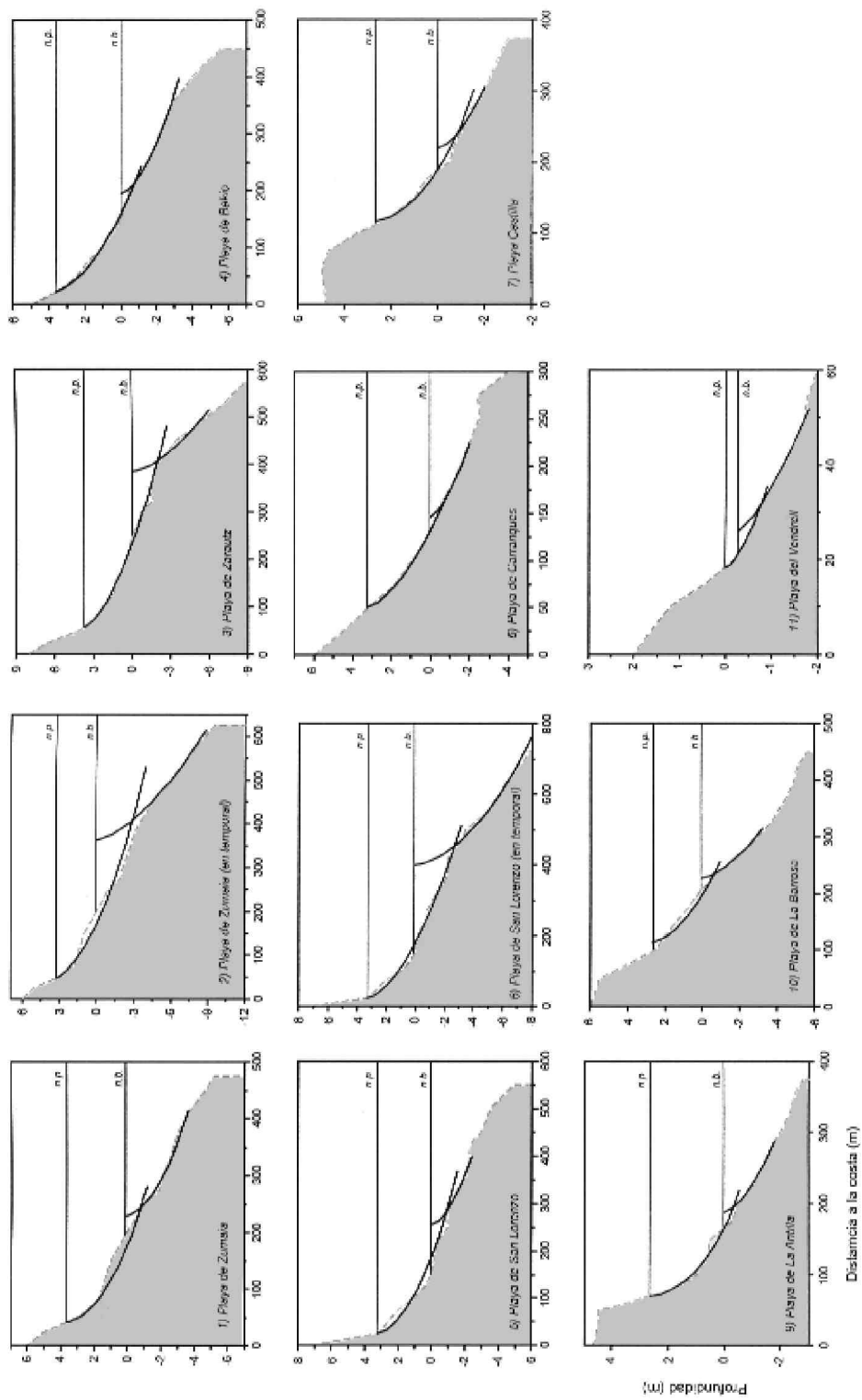


Figura 5. Comparación del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos con los perfiles medidos (figura 3). n.p. es el nivel correspondiente a la pleamar modal, n.b. corresponde a nivel de bajamar modal en cada una de las playas estudiadas.

Figure 5. Comparison between two-section equilibrium beach profile and measured profiles (figure 3). n.p. is the modal high tidal level, n.b. is the modal low tidal level.

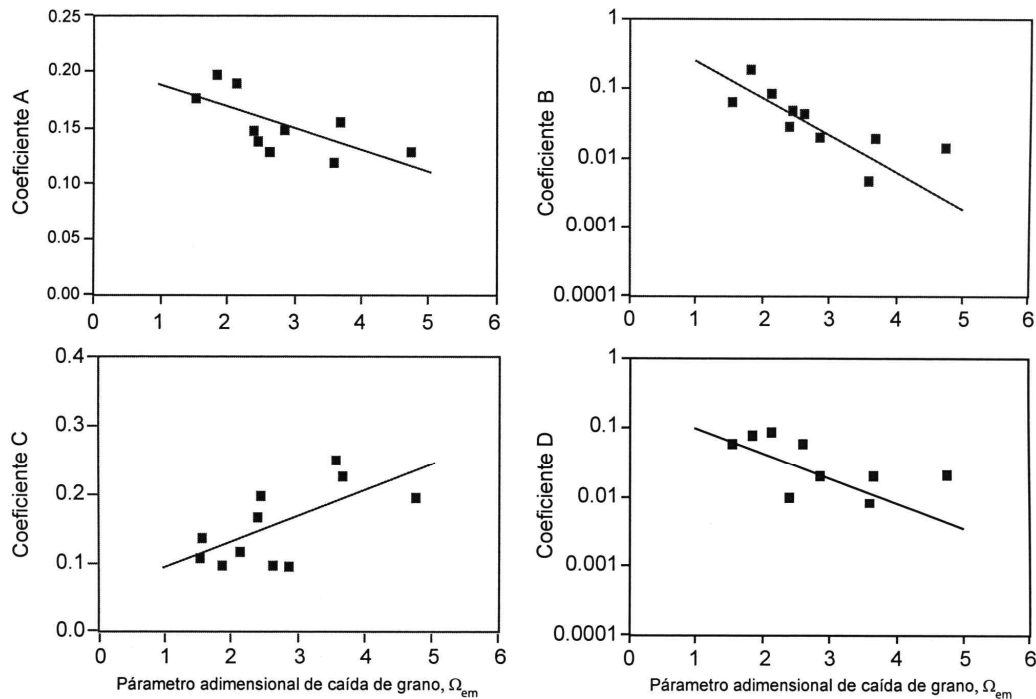


Figura 6. Comparación entre el parámetro adimensional de caída de grano y a) el coeficiente A y b) el coeficiente B, en el perfil de rotura; c) el parámetro C y d) el parámetro D, para el perfil de asomeramiento.

Figure 6. Comparison of the dimensionless fall velocity and a) coefficient A and b) coefficient B in the surf profile; c) coefficient C and d) coefficient D in the shoaling profile.

El modelo de perfil de equilibrio propuesto permite obtener un buen ajuste a los datos medidos en el campo, tal y como se desprende del comportamiento de los coeficientes en cada uno de los tramos (A y C, asociados a disipación y B y D, asociados a reflexión) respecto al parámetro adimensional de caída de grano, Ω_{em} .

4. Discusión

Las ecuaciones (5) y (8) definen el perfil de equilibrio en dos tramos con reflexión propuesto en este trabajo. Para el caso de playas con una baja reflexión de energía, la formulación propuesta se reduce al término asociado al fenómeno de disipación. El perfil de equilibrio propuesto por Bernabeu et al. (2001) aparece como un caso particular del modelo propuesto en este trabajo.

La comparación de estas expresiones con datos reales permite validar la formulación teórica. En la figura 5 se presentan los ajustes del modelo a perfiles medidos a lo largo de la costa española, pudiendo observar la buena aproximación del modelo propuesto a datos reales. En trabajos anteriores (Bernabeu et al., 2001) se verificó que el perfil de equilibrio en dos tramos ajustaa de forma más precisa el perfil total de la playa, articulando la morfología sobre el punto de rotura, frente a modelos de una única curva. Al considerar el fenómeno de reflexión, se introduce una mejora en la descripción morfológica de cada tramo. El perfil de equilibrio con reflexión no sólo representa la pendiente media de cada tramo, como ocurre con el resto de modelos existentes, sino que es capaz de ajustar la concavidad del perfil.

A partir de los ajustes realizados a los perfiles, se establece la información morfológica recogida por los coeficientes del modelo: mientras el coefi-

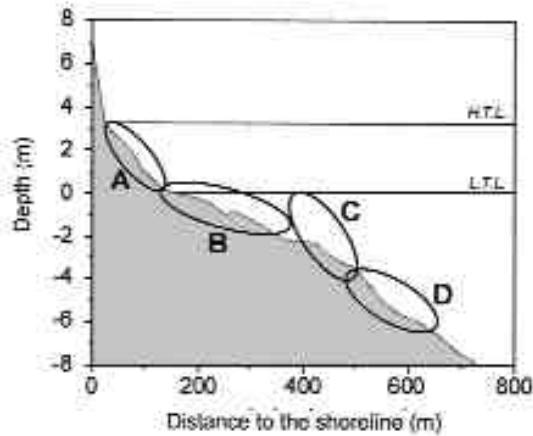


Figura 7. Partes del perfil de playa modeladas a través de los diferentes coeficientes del modelo.
 Figure 7. Parts of the profile modelled using the different model coefficients.

coeficiente de disipación (A en el perfil de rotura, C en el de asomeramiento) determina la pendiente del perfil en zona cercana al frente de playa o al punto de inflexión, respectivamente; el coeficiente asociado a la reflexión (B y D) marca la pendiente de la zona más profunda de cada tramo (figura 7). El perfil con reflexión define la morfología de cada tramo articulado en dos secciones con pendiente distinta, que permiten definir distintos grados de concavidad del mismo. Los coeficientes de disipación (A y C) presentan una relación directa con la pendiente: a mayor valor del coeficiente mayor pendiente del sector inicial de cada tramo; los coeficientes asociados a la reflexión (B y D) mantienen una relación inversa: cuanto mayor es el coeficiente más tendida es la parte profunda de cada tramo y, consecuentemente, mayor la concavidad. El análisis de los coeficientes de forma asociados a cada tramo del perfil permite establecer relaciones útiles en la descripción de la morfología del perfil de playa.

Las expresiones de ajuste obtenidas entre los coeficientes del perfil y el parámetro adimensional de caída de grano, σ , establecen una relación entre la morfología y la hidrodinámica que afecta a la playa (tabla 3). Así, la respuesta del perfil de rotura y del perfil de asomeramiento frente a las condiciones de oleaje y sedimentarias es distinta:

- Para playas disipativas, donde σ_{em} toma valores superiores a 5, los coeficientes asociados a

la reflexión se hacen muy pequeños, prácticamente nulos. El perfil de equilibrio propuesto se reduce al perfil de Bernabeu et al. (2001), considerando sólo disipación, donde la morfología viene determinada por los coeficientes A y C. El coeficiente A se hace pequeño, figura 6^a, determinando un perfil de rotura muy tendido. El coeficiente C toma valores elevados, originando un perfil de asomeramiento de elevada pendiente. Un ejemplo de esta morfología aparece en la figura 8.

Así, en perfiles de equilibrio disipativos, la discontinuidad del perfil es muy marcada debido al cambio brusco de pendiente entre el perfil de rotura y el de asomeramiento. Puesto que las playas disipativas van asociadas a oleaje energético y, por tanto, a alturas de ola grandes, el punto de inflexión se situará a gran profundidad.

- Para valores bajos de σ_{em} (estado reflectivo), con un valor de $\sigma_{em} < 2$, los coeficientes asociados a la reflexión (B y D) toman valores elevados, tanto en el perfil de rotura, como en el perfil de asomeramiento. Esto se traduce en una pendiente tendida en las zonas más profundas de cada tramo. En cuanto a los coeficientes de disipación, mientras en el perfil de rotura, A alcanza valores elevados, marcando una pendiente inicial del perfil pronunciada; en el perfil de asomeramiento, el coeficiente C toma el valor más bajo posible, definiendo una pendiente inicial suave. En la figura 9, se presenta un ejemplo de perfil reflectivo según el modelo con reflexión propuesto.

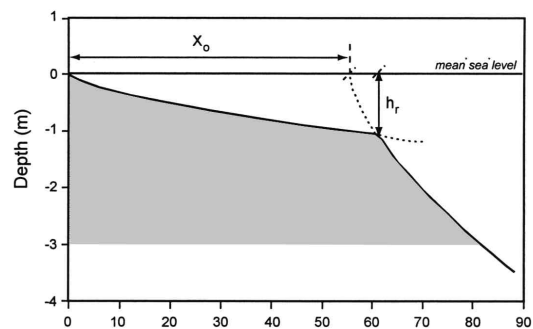


Figura 8. Ejemplo del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos con reflexión para playas disipativas.
 Figure 8. Two-section equilibrium beach profile considering reflection for dissipative beaches.

Tabla 3.- Relación entre el parámetro adimensional de caída de grano (Dean, 1973), los coeficientes de forma del perfil de equilibrio propuesto y la morfología resultante del perfil de playa.
 Table 3.- Relationship between the dimensionless fall velocity (Dean, 1973), the coefficients of the proposed equilibrium profile and the resultant morphology of the beach profile.

$\uparrow \frac{H}{WT}$	Perfil de ROTURA	A	Pendiente inicial tendida	PERFIL DISIPATIVO
		B	Pendiente aguasdentro pronunciada	
	Perfil de ASOMERAMIENTO	C	Pendiente inicial pronunciada	
		D	Pendiente aguasdentro pronunciada	
$\downarrow \frac{H}{WT}$	Perfil de ROTURA	A	Pendiente inicial pronunciada	PERFIL REFLEJANTE
		B	Pendiente aguasdentro tendida	
	Perfil de ASOMERAMIENTO	C	Pendiente inicial tendida	
		D	Pendiente aguasdentro tendida	

Para estados reflectivos extremos, el perfil de asomeramiento se inicia por detrás de la propia línea de costa (línea discontinua en la figura 9), dando valores negativos del parámetro x_0 . La discontinuidad del perfil, situada en el punto de rotura, se localizará en una posición somera cercana al nivel medio. En estos casos, el perfil adquiere una forma cóncava marcada, donde el punto de inflexión es prácticamente inapreciable, dificultando la diferenciación del perfil en dos tramos.

La relaciones establecidas entre los coeficientes, la morfología y el parámetro adimensional de caída de grano permiten integrar el perfil de equilibrio propuesto dentro de los estados morfodinámicos de una playa, propuestos por Wright y Short (1984). Esto sienta las bases para futuros trabajos donde el perfil de equilibrio permita describir la secuencia de estados morfodinámicos por los que atraviesa una playa en función de la variación estacional del parámetro adimensional de caída de grano. De este modo, el perfil de equilibrio no sólo

será útil en la cuantificación de la morfología, sino que será capaz de predecir las variaciones estacionales que sufrirá la morfología del perfil como respuesta a cambios en los parámetros dinámicos (fundamentalmente oleaje). Esta capacidad predic-

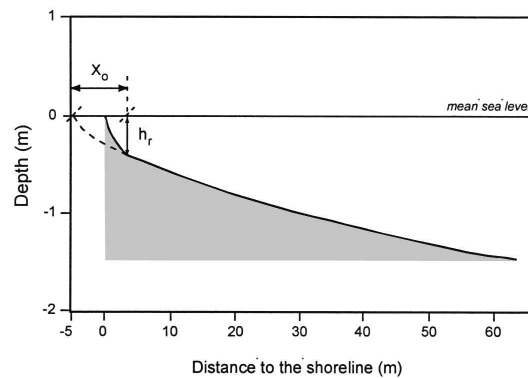


Figura 9. Ejemplo modelo de perfil de equilibrio en dos tramos con reflexión para playas reflectivas.
 Figure 9. Two-section equilibrium beach profile considering reflection for reflective beaches.

tiva del perfil de equilibrio lo convierten en una herramienta fundamental en el ámbito de la gestión del litoral.

Conclusiones

Se ha analizado la influencia del fenómeno de reflexión sobre la morfología del perfil de playa. Como resultado se propone un modelo de perfil de equilibrio capaz de describir la morfología de un perfil de playa. Este modelo representa una mejora respecto a los modelos existentes puesto que es capaz de representar características del perfil, como la influencia del oleaje o la reflexión en playas, que hasta ahora no se habían modelado.

El modelo propuesto se validó con datos reales medidos a lo largo de la costa de la Península Ibérica. De este modo, se obtuvieron relaciones de ajuste entre los coeficientes del modelo y el parámetro adimensional de caída de grano, $1 \leq \text{em} \leq 5$. Dichas relaciones son válidas para un rango de $1 \leq \text{em} \leq 5$. Además, se determinó la información morfológica que recoge cada coeficiente del perfil. Los coeficientes asociados a la disipación (A y C) determinan la pendiente inicial del tramo correspondiente. Los coeficientes asociados a la reflexión (B y D) marcan la pendiente de la zona más profunda. Así, la formulación propuesta describe perfiles con mayor concavidad para playas reflectivas y perfiles con menor concavidad, más tendidos, cuando la playa es disipativa. Esto permite, en último término, integrar esta formulación en el modelo morfodinámico de playas de Wright y Short (1984), siendo válido tanto para describir la morfología del perfil para los diferentes estados morfodinámicos establecidos en el modelo: disipativo, intermedio y reflectivo.

Agradecimientos

Los datos de campo han sido cedidos por la Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente). Queremos agradecer los comentarios de F. Javier Gracia Prieto y de un revisor anónimo, los cuales han permitido mejorar este trabajo. Este trabajo es el n.º 242 del grupo EX1 de la

Universidad de Vigo, siendo una contribución a los proyectos: REN2000-1102 MAR (CICYT) y parcialmente al PGIDT00MAR30103PR (Xunta de Galicia) y al PGIDT00PXI30105PR (Xunta de Galicia) e IGCP 464, R; M. y C. V. agradecen el apoyo de la Comunidad Europea dentro del Programa de Ciencias y Tecnología Marinas (MAST), N.º MAS3-CT97-0081, proyecto "Surf and Swash Zone Mechanics" (SASME) y a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), proyecto de investigación AMB99-0543.

Referencias Bibliográficas

- Airy, G. B. (1845). Tides and waves. *Encyclopedia Metropolitana*, vol. 192, 241-396.
- Benavente, J., Gracia, F. J. & López-Aguayo, F. (2000). Empirical model of morphodynamics beachface behaviour for low-energy mesotidal environments. *Marine Geology*, 167, 375-390.
- Bernabeu, A. M. (1999) *Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander (España). 170 pp.
- Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, C. & Muñoz-Pérez, J. J. (2001) Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Rev. Soc. Geol. de España*, 14 (3-4). 227-234.
- Bodge, K. (1992) Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *Journal of Coastal Research*, 8-1. 47-55.
- Bruun, P. (1954) *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board, Technical Memorandum, n.º 44.
- Dean, R. G. (1977) *Equilibrium beach profiles: U. S. Atlantic and Gulf coasts*. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report N.º 12, University of Delaware, Newark, Delaware.
- Dean, R. G. (1987) Coastal sediment processes: Toward engineering solutions. *Proc. Specialty Conference on Coastal Sediments '87*, A.S.C.E., New Orleans, USA, 1-24.
- Dean, R. G. (1991) Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*. Vol. 7. 53-84.
- Elgar, S. Herbers, T. H. C. & Guza, R. T. (1994) Reflection of ocean surface waves from a natural beaches. *Journal of Physical Oceanography*, 24, 1503-1511.
- Galofré, J. (2001) *Desarrollo y validación de un modelo de distribución granulométrica de sedimentos en playas*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander (España), 255 pp.
- Gómez-Pina, G. (1995) *Análisis de perfiles de playa en las fachadas cantábrica y atlántica de la costa española y su aplicación a proyectos de regeneración*. Tesina de Magister, Universidad de Cantabria, Santander (España), 270 pp.

- González, E. M. (1995) *Morfología de playas en equilibrio: planta y perfil*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander (España), 270 pp.
- Goring, D. G. (1978) *Tsunamis, the propagation of long waves onto a shelf*. W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Calif. Inst. Tech., Rep. n.º K.H.R. 38, 337 pp.
- Hallermeier, R. J. (1981) A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253-277.
- Horikawa, K. & Kuo C. T. (1966) A study of wave transformation inside the surf zone. *Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, 217-233.
- Inman, D. L., Hany, M., Elwany, S., & Jenkins, S. C. (1993) Shorerise and Bar-Berm Profiles on Ocean Beaches. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, N.º C 10. 18181-18199.
- Kirby, J. T. & Vengayil, P. (1988) Non resonant and resonant of long waves in varying channels. *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n.º C9. 10,782-10,796.
- Komar, P. D. & McDougal, W. G. (1994) The analysis of exponential beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 10-1, 59-69.
- Larson, M. (1991) Equilibrium profile of a beach with varying grain size. *Proc. Coastal Sediments'91*, ASCE, 905-919.
- Medina, R., Bernabeu, A. M., Vidal, C. & González, E. M. (2000) Relationships between beach morphodynamics and equilibrium profiles. *Proc. 27th Int. Coastal Engineering Conf.*, A.S.C.E., Sydney (Australia), 2589-2601.
- Miche, R. (1951) Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés à l'action de la houle. *Ann. Ponts Chaussées*, 121, 285-319.
- MOPT (1992) Recomendaciones para obras marítimas, ROM 0.3-91 Oleaje. Anejo I: Clima Marítimo en el Litoral Español. Centro de publicaciones del MOPT, Madrid, 76 pp.
- Muñoz-Pérez, J.J., Tejedor, L. & Medina, R. (1999) Equilibrium beach profile model for reef-protected beaches. *Journal of Coastal Research*, 15, 4, 950-957.
- Thorton, E. B., & Guza, R.T. (1983) Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 18, 5925-5938.
- Wright, L.D., & Short, A.D. (1984) Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches. *Marine Geology*, Vol. 56, 93.118.

Recibido 23 de noviembre de 2001

Aceptado 19 de abril de 2002