

SIMULACION DE CAMBIOS A CORTO PLAZO EN LA LINEA DE COSTA

José A. Jiménez y Agustín Sánchez-Arcilla,
Ingeniero de Caminos, Canales y Puentes*

En este artículo se desarrolla una formulación paramétrica para el transporte transversal de sedimentos. El transporte se calcula en función del flujo de energía del oleaje incidente a la vez que se utiliza el concepto de perfil de equilibrio. El estado de equilibrio se caracteriza en función del parámetro adimensional de caída y la pendiente de la zona de rompientes. El transporte se calcula de forma integrada en la zona de rompientes y ha sido acoplado con una formulación de transporte longitudinal en un modelo de dos líneas, a fin de predecir la evolución costera a corto y largo plazo. El modelo predice de forma correcta la erosión y acreción de la costa en función del oleaje incidente, respondiendo adecuadamente a los cambios en las características de la playa —velocidad de caída del sedimento y pendiente de la zona de rompientes—. Los cambios en el perfil de playa (debidos al transporte transversal) se representan mediante el desplazamiento de la línea de orilla y/o la variación de la pendiente de la zona de rompientes. Se ha realizado una primera calibración del modelo (sólo para el transporte transversal) en base a resultados de laboratorio.

Introducción

La resolución de muchos problemas en ingeniería de costas requiere poseer una herramienta que permita predecir cómo responde la franja costera ante una acción determinada. Por ello, durante las últimas décadas se han desarrollado numerosos modelos de evolución costera.

La mayor parte de éstos han sido creados para predecir comportamientos integrados a largo plazo, y tienen sólo en cuenta el transporte longitudinal de sedimentos, son los llamados modelos de una línea (e.g. PELNARD-CONSIDERE, 1956; PRICE et al., 1972 entre otros).

Como extensión a este tipo de modelos surgieron los modelos de dos líneas, que incorporan el transporte transversal para reproducir los cambios a corto plazo. BAKKER (1968) fue el primero en desarrollarlos y, posteriormente, otros autores han utilizado esta aproximación variando la descripción del transporte transversal (e.g. BAILLARD, 1985).

En este artículo se presenta un modelo de evolución costera que estima los cambios en la zona

Presentación de un modelo de evolución costera que estima los cambios en la zona de rompimiento bajo la acción del oleaje.

de rompientes bajo la acción del oleaje, tanto a corto como a largo plazo (en perfil y planta respectivamente). La evaluación de estos cambios se hace calculando el transporte transversal y longitudinal de forma separada para posteriormente acoplarlos en el modelo. En este artículo se presenta la formulación desarrollada para calcular el transporte transversal de forma integrada en la zona de rompientes, así como el funcionamiento del modelo para el caso de incidencia normal del oleaje.

El objetivo del modelo es similar con un coste reducido la evolución costera ante la acción del oleaje, incluyendo de forma adecuada los cambios en el oleaje incidente y características de la playa, y con un nivel de resolución válido para su aplicación en los estudios de ingeniería de costas.

Transporte transversal

■ Antecedentes

El desarrollo de una formulación válida para el cálculo del transporte transversal ha sido uno de los tópicos en los que la ingeniería de costas ha puesto más énfasis durante las últimas décadas. Como consecuencia de ello se han propuesto numerosos modelos basados en aproximaciones diversas.

* Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya.

Estos modelos se pueden agrupar en dos grandes clases dependiendo de la aproximación tomada en su desarrollo: *deterministas* y *paramétricos*. Esta clasificación, que se aparta de la convencional (e.g. modelos energéticos, de disipación, etc... ASCE, 1991), evita algunos malentendidos —así, el modelo de BAILARD (1981, 1982) es clasificado normalmente como un modelo energético, cuando su formulación parte del concepto de disipación de la energía— y además simplifica la clasificación ya que así queda limitada a dos grandes grupos rápidamente identificables (STIVE, 1992).

Entenderemos por *modelos deterministas*, aquellos que parten de una física determinística: resolución del campo de oleaje incidente —con la consiguiente disipación de energía—, obtención del campo hidrodinámico resultante y posteriormente cálculo del transporte de sedimentos. Dentro de este grupo se pueden incluir el modelo de BAGNOLD (1963), donde el transporte se considera proporcional al flujo de energía existente en el fluido y que posteriormente fue mejorado por BAILARD (1981, 1982). STIVE (1986) utilizó esta última aproximación para describir el transporte de sedimentos hacia la costa en un modelo de evolución del perfil, donde el transporte hacia el mar se calculaba en función de la corriente de retorno inducida por el oleaje (undertow) (STIVE y BATTJES, 1984). Un modelo similar fue desarrollado por DALLY y DEAN (1984) aunque con una descripción diferente de la corriente de retorno, mientras que el transporte hacia costa era producido por la velocidad oscilatoria inducida por el oleaje. Uno de los modelos más recientes que utiliza esta clase de aproximación es debido a NAIRN (1990).

Los modelos *paramétricos* son aquellos en los que se parte de una física parametrizada. Es decir, todos los procesos físicos que tienen lugar son parametrizados en función de alguna variable

característica de los agentes dinámicos que actúan sobre el sedimento, generalmente la energía del oleaje. Además una característica muy común de estos modelos es la utilización del concepto de perfil de equilibrio. Dentro de este grupo podemos incluir el modelo de erosión de playas y dunas de KRIEBEL y DEAN (1984), donde se considera que el transporte hacia el mar es proporcional al exceso de disipación de energía sobre un valor de equilibrio. Esta aproximación ha sido utilizada por LARSON *et al* (1988) junto a un criterio para evaluar la dirección del transporte y un término para incluir el efecto de la pendiente del fondo para describir el transporte en la zona de rompientes.

Dentro de los modelos paramétricos pueden incluirse los modelos basados directamente en el concepto de perfil de equilibrio y donde el transporte se parametriza en función de las desviaciones del perfil respecto de su condición de equilibrio (BAKKER, 1968 y SWART, 1974, entre otros).

Por último y separándose un poco más de la física en dirección a la parametrización, hay un gran grupo de modelos «locales» basados en resultados empíricos que han sido utilizados para evaluar las variaciones del perfil de las playas y/o dunas ante la acción del oleaje.

La existencia de esta gran cantidad de modelos es debido a que aunque los factores que determinan el transporte transversal son ampliamente conocidos, la complejidad con que interactúan es difícil de reproducir.

■ Formulación del transporte transversal

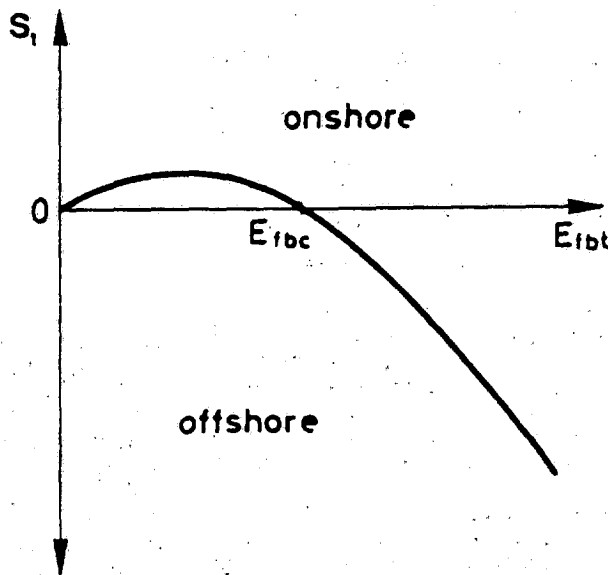
Se presenta en este artículo un modelo de tipo paramétrico capaz de calcular la magnitud y dirección del transporte transversal bajo la acción del oleaje de forma integrada en la zona de rompientes. El principal parámetro utilizado es el flujo de energía del oleaje incidente.

El desarrollo de la formulación parte de dos puntos principales: la aproximación energética de Bagnold y el estado de equilibrio del perfil de playa.

BAGNOLD (1963) sugirió que el transporte de sedimentos en el seno del fluido en movimiento era proporcional a la energía disponible en el mismo. En nuestro caso, esta energía será aportada solamente por el oleaje, y como la zona de estudio es la zona de rotura, será el flujo de energía en rompientes nuestro parámetro principal.

Al haber dividido el transporte en dos componentes (transversal y longitudinal) es aceptable suponer que cada una de ellas es proporcional a la «componente» respectiva del flujo de energía. El término «componente» debe ser considerado como componente por unidad de longitud de la playa (como el «factor longitudinal del flujo de energía» de la formulación CERC para el transporte longitudinal, U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1984). De ahora en adelante, ambos componentes se denominarán factores transversal y longitudinal del flujo de energía (E_{fb} y E_{bl} respectivamente, donde el subíndice *b* indica que son evaluados en rompientes).

Figura 1. Relación funcional entre el transporte transversal y el factor transversal del flujo de energía del oleaje en rompientes.



Aunque la cantidad de sedimento que es transportada es función del flujo de energía del oleaje, la dirección del transporte (hacia costa o hacia el mar, correspondiendo a situaciones de acreción y erosión respectivamente) es determinada por otros factores. Así, bajo la acción de tormentas con oleaje de gran peralte y de alto contenido energético, se produce la erosión de la costa. Por contra, las olas regulares de pequeño peralte y menor contenido energético favorecen la recuperación de la playa. La delimitación entre estos dos procesos se caracterizará mediante un valor crítico empírico del factor transversal del flujo de energía asociado tanto a la playa como al oleaje incidente, que denominaremos *flujo de energía crítico*, Ef_{bc} .

La esquematización de este proceso puede verse en la figura 1 (CALLIS Y SANCHEZ-ARCILLA, 1989), donde se observa que flujos de energía pequeños generan un transporte transversal neto de sedimentos hacia la costa. Este transporte aumenta de forma gradual con Ef_{bt} hasta alcanzar un máximo. Al seguir aumentando el flujo de energía, el transporte neto hacia la costa comienza a decrecer hasta que se hace nulo en un punto crítico, donde el perfil se encuentra en equilibrio con el oleaje incidente. Si sigue incrementándose el flujo de energía, aparecen los procesos erosivos, que serán de mayor magnitud cuanto mayor sea el flujo de energía incidente.

Este tipo de esquematización ha sido utilizado por otros autores, aunque en función de otros parámetros (e.g. en función de la altura de ola, SUNAMURA, 1983).

Una vez analizada de forma cualitativa la relación de la figura 1, habrá que determinar una expresión cuantitativa, incluyendo el punto de transporte neto nulo. Este punto define la inversión en el sentido del transporte y representa el estado de equilibrio del perfil.

Puesto que se busca una formulación sencilla compatible con la naturaleza del problema, se expresará el transporte transversal neto, S_t , como una función cuadrática del factor transversal del flujo de energía mediante:

$$S_t = \frac{K_t}{(p_s - p)g(1-p)} \frac{Ef_{bt}}{Ef_{bc}} (Ef_{bt} - Ef_{bc})$$

donde K_t es un coeficiente adimensional, p_s es la densidad del sedimento, p la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad y p la porosidad del sedimento.

Al ser los mecanismos de transporte dominantes durante los procesos de erosión y acreción diferentes (suspensión y arrastre de fondo respectivamente), es aceptable suponer que K_t puede tomar dos valores: uno para acreción K_{ta} y otro para erosión K_{te} , ya que la eficiencia de ambos procesos es diferente.

El factor transversal del flujo de energía en rompientes se calcula utilizando teoría sinusoidal:

$$Ef_{bt} = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 Cg_b (\cos \alpha_b)^2$$

donde:

H_b altura de ola en rotura
 Cg_b velocidad de grupo en rotura
 α_b ángulo del oleaje en rompientes

Una vez establecida la ecuación que estima el transporte transversal neto, resta ahora derivar una expresión para el flujo de energía crítico.

Flujo de energía crítico

El flujo de energía crítico se define como el flujo de energía asociado a un tren de ondas que al incidir sobre un perfil de playa induce un transporte transversal neto nulo. Si la componente transversal del flujo de energía incidente es mayor, el transporte neto resultante estará dirigido mar adentro, produciendo la erosión del perfil y por tanto el retroceso de la línea de orilla. Si es menor el transporte neto estará dirigido hacia la costa produciendo un avance de la línea de orilla.

Este flujo de energía crítico representa por tanto el «estado de equilibrio» del sistema, donde el perfil de playa no variará a menos que cambien las condiciones del oleaje incidente.

Para derivar una expresión de este parámetro se han analizado varios criterios de clasificación de perfiles de playa. Como se ha comentado anteriormente, el peralte es uno de los parámetros importantes en la delimitación de los cambios del perfil y en la predicción de la dirección del transporte (e.g. JOHNSON, 1949). Sin embargo, si observamos resultados experimentales, puede verse que el peralte por sí sólo es insuficiente para predecir de forma aceptable los cambios en el perfil. Por ello, se desarrollaron nuevos criterios basados en parámetros adimensionales de la playa.

En primer lugar se incluyeron los efectos debidos a las características del sedimento que componía la playa. Así, IWAGAKI y NODA (1962) utilizaron junto al peralte la relación entre la altura de ola y el diámetro medio del sedimento. NAYAK (1970) usó un parámetro similar incluyendo a su vez la gravedad específica del sedimento. DEAN (1973) desarrolló un modelo de transporte de sedimentos en zona de rotura, donde el parámetro principal era una variable adimensional que incluía características del oleaje (período y altura) y la velocidad de caída del sedimento (parámetro adimensional de caída).

Otros autores han propuesto incluir la pendiente de la playa para aumentar la capacidad predictiva de estos parámetros, ya que consideran que ésta tiene alguna influencia en las modificaciones del perfil (tabla 1). En esta relación se observa que

El flujo de energía crítico representa el «estado de equilibrio» del sistema, donde el perfil de la playa no variará a menos que cambien las condiciones del oleaje incidente.

TABLA I

Criterios de equilibrio para cambios de perfil que incluyen la pendiente como variable.

Sunamura & Horikawa (1974)	$H_0/L_0 = C (\tan B)^{-0.27} (d_{50}/L_0)^{0.67}$
van Hijum (1974)	$f(H_0, d_{90}, \tan B) = \text{cte.}$
Hattori & Kawamata (1980)	$H_0/L_0 \tan B = 0.5 w_f/gT$
Wang & Yang (1980), Yang (1981)	$H_b^{1/2}/g^{1/2}T \tan B = 0.5$
Sayao & Graham (1991)	$\tan B = 0.1 (H_b/d_{50})^{-0.25} (H_b/L_0)^{-0.25}$

la mayoría de los parámetros tienen un comportamiento similar: un aumento del peralte va acompañado de una disminución de la pendiente de la playa, excepto los parámetros de WANG y YANG (1980) y YANG (1981) que muestran un comportamiento a la inversa. La inclusión de la pendiente de la playa ha generado una discusión en cuanto a su importancia. Recientemente SUNAMURA (1989) y KRAUS y HORIKAWA (1990) entre otros han propuesto que es necesario incluir la pendiente de la playa cuando ésta difiera de forma significativa de la pendiente de equilibrio del perfil.

La existencia de un gran número de parámetros predictores es debido al reanálisis constante que se hace sobre ellos ajustándolos a nuevos datos (campo y/o laboratorio), lo que origina la corrección empírica de los mismos (e.g. LARSON y KRAUS (1989) que partiendo del parámetro de Dean, lo modifican para mejorar su ajuste a datos de laboratorio de gran escala) o bien una manipulación de los mismos (DALRYMPLE, 1992).

Aquí se ha buscado una formulación lo más completa posible, proporcionada al grado de precisión buscado y que incluya las variables principales que participan en la naturaleza del problema. Para ello, además de analizar los parámetros propuestos, se hizo un análisis dimensional del fenómeno.

■ **Análisis dimensional**

Los fenómenos que ocurren en la zona de rompientes pueden describirse a través de los siguientes parámetros característicos:

$$\mu, p, g, H_b, T, \alpha_b, h_b, X_b, Y_c, w_f, P_s, \Psi, F(d)$$

donde μ es la viscosidad del fluido, p es la densidad del fluido, g la aceleración de la gravedad, H_b la altura de ola en rotura, T el período del oleaje, α_b el ángulo del oleaje en rotura, h_b la profundidad de rotura, X_b una dimensión característica transversal, Y_c una dimensión característica longitudinal, w_f la velocidad de caída del sedimento, P_s la densidad del sedimento, Ψ el factor de forma del sedimento y $F(D)$ la distribución de tamaños del sedimento.

Eligiendo la profundidad de rotura como variable dependiente se obtiene la siguiente relación funcional:

$$h_b = f_h (\mu, p, g, H_b, T, \alpha_b, X_b, Y_c, w_f, P_s, \Psi, F(D))$$

Se han realizado las siguientes hipótesis simplificativas: forma del sedimento regular, distribución de tamaños uniforme, incidencia normal del oleaje, uniformidad longitudinal, sedimento (arena) de igual densidad, flujo turbulento desarrollado en zonas de rompientes. Además, se toma la dimensión característica transversal igual al ancho de la zona de rompientes (X_b).

Después de haber introducido estas hipótesis y aplicando el teorema II de Buckingham con p, X_b y T como cantidades básicas, se obtiene la pendiente de la zona de rompientes, definida como h_b/X_b , como parámetro adimensional:

$$\frac{h_b}{X_b} = \Pi_m \left(\frac{H_b}{L_0}, \frac{H_b}{h_b}, \frac{H_b}{w_f T} \right)$$

o bien si utilizamos el diámetro de sedimento en lugar de la velocidad de caída, se obtiene

$$\frac{h_b}{X_b} = \Phi_m \left(\frac{H_b}{L_0}, \frac{H_b}{h_b}, \frac{H_b}{d_{50}} \right)$$

Una vez derivadas las relaciones funcionales (4) y (5), se utilizarán datos de cambio de perfil obtenidos en laboratorio para encontrar las expresiones adecuadas a estas relaciones. Para ello, se emplearán datos obtenidos en ensayos a gran escala (KRAUS y LARSON, 1988; LARSON y KRAUS, 1989), los cuales tienen la ventaja de aproximarse lo más posible a las condiciones con que nos encontramos en la naturaleza.

En la figura 2 puede verse la pendiente de la zona de rompientes de equilibrio (tomando ésta como la correspondiente al último perfil de cada experimento) frente al parámetro de Dean. Se observa que excepto para cuatro casos parece existir una relación entre ambos parámetros, cuyo mejor ajuste viene dado por

$$\tan B_{eq} = 0.12 \left(\frac{H_b}{w_f T} \right)^{-0.52}$$

En este caso se han eliminado dos de los tres parámetros (peralte e índice de rotura) que parti-

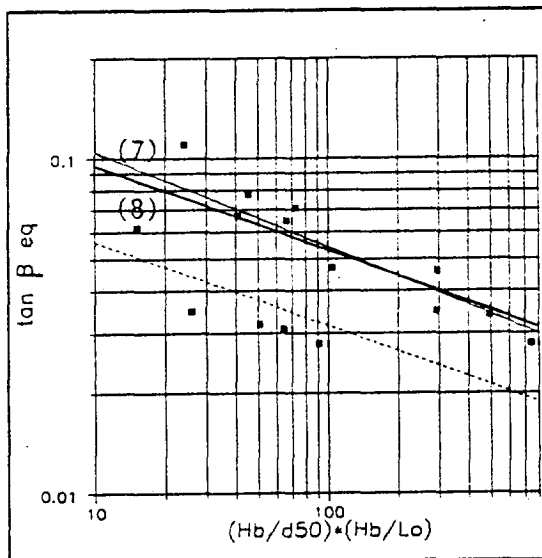
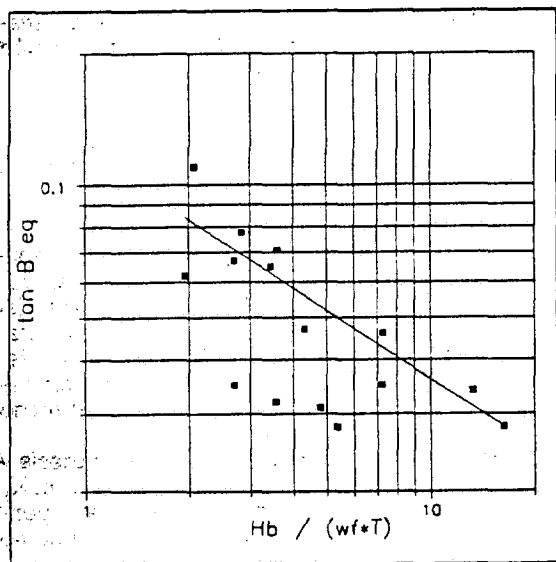


Figura 2. Pendiente de equilibrio versus parámetro de Dean. A la derecha. Figura 3. Pendiente de equilibrio versus peralte y diámetro de sedimento adimensional (línea discontinua: relación original de Sayao y Graham, (7) y (8) relaciones correspondientes).

cipan en la relación (4), ya que los dos parámetros no considerados juegan un papel menos determinante (en base a la evidencia experimental) a la hora de obtener $\tan \beta_{eq}$.

En la figura 3 se ensaya la relación simplificada (5) utilizando el mismo conjunto de datos. El comportamiento es muy similar al anterior, encontrándose una relación para la mayor parte de los datos (excepto para los mismos casos que en el ajuste anterior). El mejor ajuste viene dado por la relación

$$\tan B_{eq} = 0.20 \left(\frac{H_b}{d_{50}} \right)^{-0.285} \left(\frac{H_b}{L_0} \right)^{-0.285}$$

En la misma figura se ha dibujado la expresión propuesta por Sayao y Graham (1991). Esta se aleja de los datos, aunque la pendiente de la curva parece ser correcta. Este hecho puede ser asociado a que al ajuste realizado por los autores citados fue hecho tanto con datos de campo (donde las condiciones son bastante difíciles de controlar) como con datos de laboratorio a pequeña escala. Sin embargo, la expresión 7 puede ser reescrita como la propuesta por Sayao y Graham variando la constante de estos últimos. Este criterio quedaría, así, modificado de la siguiente forma

$$\tan B_{eq} = 0.17 \left(\frac{H_b}{d_{50}} \right)^{-0.25} \left(\frac{H_b}{L_0} \right)^{-0.25}$$

Los ajustes (6) y (8) son parcialmente coherentes, ya que si lo son en cuanto a las condiciones del oleaje (tanto la altura de ola como el período están elevados a la misma potencia, aproximadamente -0.5) pero no en cuanto a las característi-

cas del sedimento: en el rango de sedimentos con el que se ha trabajado la velocidad de caída es proporcional al diámetro de sedimento, y los exponentes en ambas relaciones varían (-0.5 para la velocidad de caída y -0.25 para el diámetro). Sin embargo, ambos ajustes son válidos para el conjunto de datos utilizados.

A la vista de este resultado, utilizaremos por simplicidad la relación (6) para determinar el estado de equilibrio del perfil. La utilización del parámetro de Dean está ampliamente aceptada para la delimitación de cambios de perfil, ya que ha sido desarrollado a partir de un modelo conceptual de transporte transversal que, aunque sencillo, representa bastante bien la naturaleza del problema.

El parámetro de Dean representa la disponibilidad del sedimento a permanecer en suspensión ante la acción del oleaje. Cuanto mayor sea esta disponibilidad, mayor será la probabilidad de ser transportado mar adentro, produciéndose por tanto la erosión de la playa. Otra ventaja asociada a este parámetro, es que la variabilidad aso-

Figura 4. Perfiles verticales de la corriente de retorno (OKAYASU, 1989).

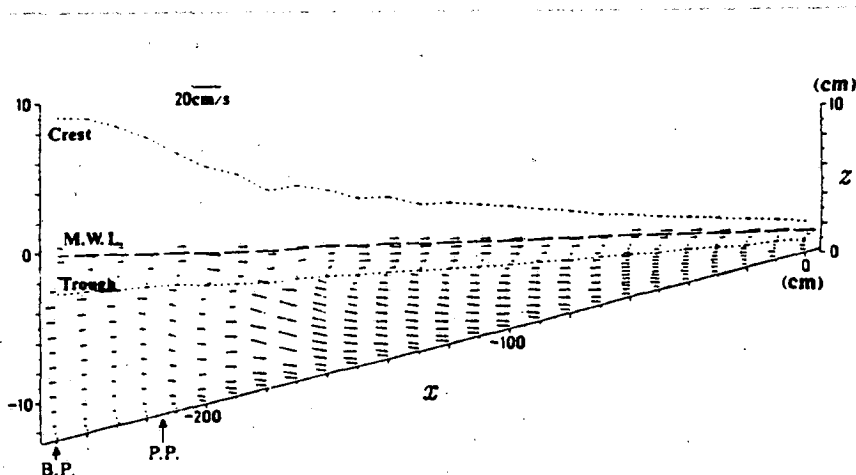
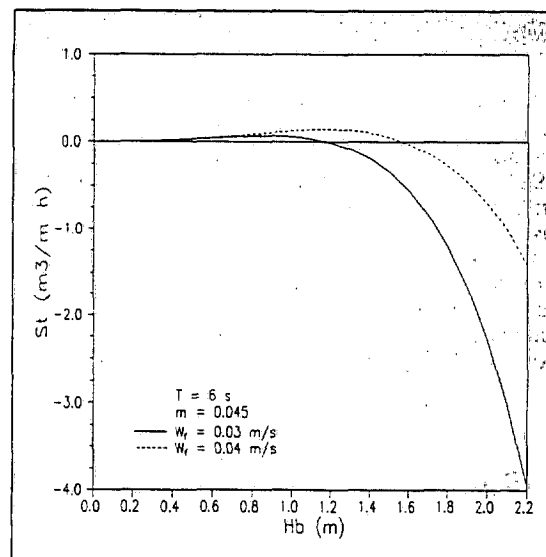
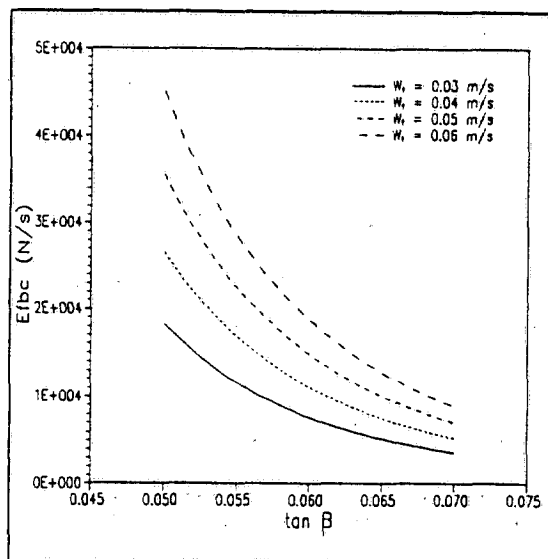


Figura 5. Variación del flujo de energía crítica con la pendiente de la playa y la velocidad de caída del sedimento. A la derecha. Figura 6. Efecto de la velocidad de caída del sedimento sobre el transporte transversal neto.



ciada a ensayos a pequeña escala es mínima si la comparamos con una relación como la (8).

Asimismo, este resultado es similar a la conclusión de DALRYMPLE y THOMPSON (1976) donde se relaciona la pendiente del estrán (beachface) con este parámetro.

Este modelo es, finalmente, fácilmente aceptable debido a su compatibilidad con el conocimiento actual que disponemos de la estructura hidrodinámica en la zona de rompientes, que asume generalmente un perfil vertical de la corriente de retorno (undertow) como el de la figura 4 (OKAYASU, 1989).

Así, a partir de la relación (6) somos capaces de determinar la altura de ola crítica, que al incidir con un cierto período T , sobre un perfil con una pendiente $\tan\beta$ compuesto por un sedimento con una velocidad de caída w_r , no generará ningún tipo de cambio neto. El flujo de energía asociado a este oleaje será el flujo de energía crítico.

En la figura 5 puede verse la variación del flujo de energía crítico (asociado a un oleaje que incide con un período de 4 s) debida a la variación en la pendiente del perfil y a la velocidad de caída del sedimento. Una disminución en la pendiente de la playa o un aumento en el tamaño del sedimento (aumento de la velocidad de caída) se traduce en la necesidad de un mayor flujo de energía incidente para producir la erosión de la playa. Es decir, el flujo de energía crítico aumenta a medida que el perfil es más tendido y/o el sedimento es más grueso.

Una vez determinado el flujo de energía crítico, ya se está en disposición de calcular el transporte transversal neto dado por la expresión (1). En la figura 6 aparece el efecto de la velocidad de caída del sedimento sobre el transporte transversal neto: un aumento en la velocidad de caída favorece los procesos de acreción. Lo mismo ocurriría si aumentara el período del oleaje incidente o si decreciera la pendiente de la zona de rompientes.

Transporte longitudinal

El transporte longitudinal de sedimentos ha sido ampliamente estudiado y existe un gran número de formulaciones que lo determinan de forma más o menos precisa. En este apartado sólo se introducirán los métodos susceptibles de ser seleccionados, para su posterior acoplamiento con la formulación de transporte transversal, en vista de los requerimientos del modelo.

Puesto que el transporte transversal se ha calculado de forma integrada en la zona de rompientes y con el flujo de energía como parámetro principal, buscaremos fórmulas de transporte longitudinal que cumplan estas condiciones. Una de ellas es la conocida fórmula CERC, la cual ha sido ampliamente verificada en modelos de una línea (e.g. OSAZA y BRAMPTON, 1980; HANSON y KRAUS, 1989). Uno de los problemas que presenta la utilización de esta fórmula es que el transporte longitudinal no es función de ninguna variable que defina las características de la playa (sedimento, pendiente, etc...), lo cual implica una calibración específica para cada caso. Una solución posible puede ser parametrizar K en función de estas variables (BAILLARD, 1985). Otra solución es utilizar una formulación similar que incluya estas variables, como las propuestas por SANCHEZ-ARCILLA *et al.* (1988) o KAMPHUIS (1991) entre otros.

Como en todos los modelos de dos líneas, el transporte longitudinal tiene que dividirse en dos componentes: S_{11} , que es el transporte que se verifica entre el punto de rotura, o genéricamente la segunda línea de control (D_2) y la línea de orilla y S_{12} el transporte que se verifica fuera de este contorno. Esta división es función de la distribución del transporte longitudinal a través de la zona de rompientes (e.g. ver BODGE, 1989). En este caso, se ha seleccionado en primera aproximación la distribución del transporte longitudinal propuesta por BAILLARD (1985).

Modelo de dos líneas

Las formulaciones del transporte transversal y longitudinal han sido introducidas en un modelo de dos líneas (SANCHEZ-ARCILLA y JIMENEZ, 1990). Este acoplamiento es consistente ya que ambas formulaciones son coherentes, con niveles de definición y precisión similares.

El modelo está basado en la ley de conservación de la masa de sedimento, aplicada a las dos zonas en que se ha dividido la costa (figura 7). Estas ecuaciones fueron propuestas por primera vez por BAKKER (1968):

$$(D_B + D_1) \frac{aX_1}{at} = - \frac{aS_{11}}{ay} - S_t$$

$$D_2 \frac{aX_2}{at} = - \frac{aS_{12}}{ay} + S_t$$

donde:

- X_1 posición de la primera línea de control (N.M.M.)
- X_2 posición de la segunda línea de control (D_1)
- D_1 profundidad de la segunda línea de control
- D_B altura de la berma sobre el nivel del mar
- $D_1 + D_2$ profundidad de cierre (límite del transporte significante)

El modelo numérico emplea un esquema en diferencias finitas explícito. Está basado en una malla alternada en el espacio (con un paso de malla Δy) donde el transporte longitudinal es calculado en los extremos de cada celda, y el transporte transversal y la posición de las líneas de control en el centro de las mismas (figura 8).

El modelo evalúa las posiciones de las líneas de control (después de un paso de tiempo Δt) a partir de las posiciones anteriores

$$X_{1,i+1/2}^{j+1} = X_{1,i+1/2}^j - \frac{\Delta t}{(D_B + D_1)\Delta y} (S_{11,i+1}^j - S_{11,i}^j + \Delta y S_{t,i+1/2}^j)$$

$$X_{2,i+1/2}^{j+1} = X_{2,i+1/2}^j - \frac{\Delta t}{D_2\Delta y} (S_{12,i+1}^j - S_{12,i}^j - \Delta y S_{t,i+1/2}^j)$$

donde el subíndice i indica la posición en el espacio y el superíndice j especifica el paso de tiempo. Una vez fijado el tamaño de las celdas (Δy) se debe elegir el paso de tiempo (Δt). Este debe ser especificado de tal forma que se asegure la estabilidad del modelo. Esta estabilidad, como en la mayoría de los esquemas explícitos, depende de

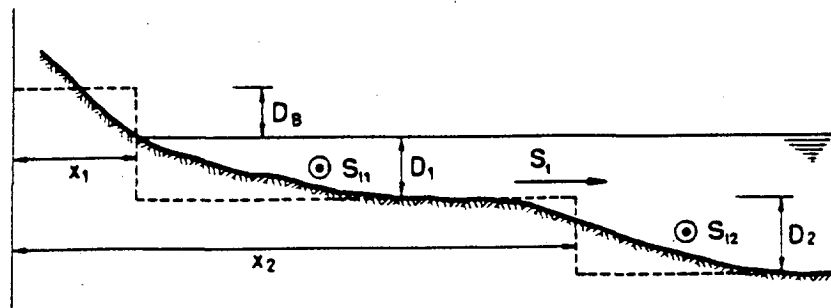


Figura 7. Esquemización del perfil de playa en el modelo de dos líneas.

la relación entre el paso de malla y el paso de tiempo. A causa de la dependencia implícita introducida por las funciones trigonométricas (que contienen X_1 y X_2) en las ecuaciones (9) y (10) la estabilidad real del esquema tiene que ser calculada por prueba y error. Como en los modelos de una línea y otros esquemas en diferencias finitas, se puede estimar un criterio de estabilidad linealizando las ecuaciones. Siguiendo a BAKKER (1968) se puede obtener tras un poco de álgebra

$$\frac{aX'}{at} = \frac{s}{D} \frac{a_2X'}{ay^2}$$

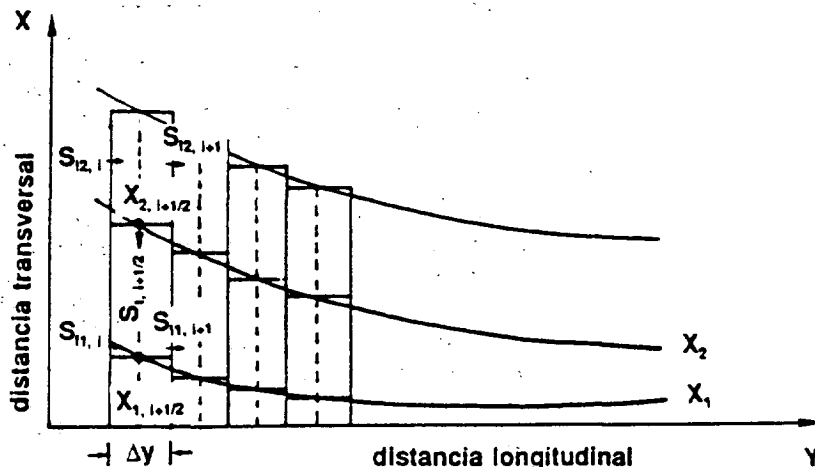
donde X' es un variable que agrupa X_1 y X_2 y donde se ha usado la derivación de Pelhard.

Considere para el transporte longitudinal.

Esta expresión tiene la forma de la ecuación de difusión unidimensional. La relación que controla la estabilidad para un esquema explícito viene en este caso dada por

$$\epsilon = \frac{s}{D} \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \leq 1/2$$

Figura 8. Esquemización de la playa en planta.



donde $D=D_B+D_C$ y s es el transporte longitudinal total. Así, puede verse que la inclusión del transporte transversal no altera en principio la estabilidad del modelo, estando ésta gobernada solamente por el transporte longitudinal. Aunque el paso de tiempo máximo depende de la tasa de transporte longitudinal, éste debe ser lo suficientemente pequeño para reproducir adecuadamente la escala temporal de la simulación (e.g. cambios del perfil a corto plazo).

El modelo requiere como datos de entrada la posición inicial de las líneas de control, las características del sedimento (densidad, porosidad y velocidad de caída) y los parámetros del oleaje en rompientes (H_b , T y α_b).

El modelo necesita condiciones de contorno para el transporte longitudinal o para la posición de las líneas de control en los extremos de la discretización. No se necesita ninguna condición de contorno para el transporte transversal dado que éste es integrado en zona de rompientes, y se asume que no existe transporte más allá de la profundidad de cierre.

En este artículo sólo se prueba el modelo de transporte transversal, para lo cual se utiliza una versión simplificada de las ecuaciones (9) y (10), asumiendo incidencia normal del oleaje:

$$(D_B+D_1) \frac{ax_1}{at} = -S_t$$

$$D_2 \frac{ax_2}{at} = S_t$$

Resultados

Para estimar el comportamiento del modelo de transporte transversal se han simulado varios ca-

sos de cambios de perfil obtenidos en laboratorio. Los experimentos utilizados para la simulación han sido obtenidos en ensayos a gran escala, que son los que se acercan más a la realidad. Una descripción detallada de los ensayos puede verse en KRAUS y LARSON (1988) y LARSON y KRAUS (1989).

En primer lugar se ha simulado la erosión de un perfil de playa, cuyo resultado puede verse en la figura 9. En este caso, se representa la evolución de la posición de la línea de orilla a lo largo del tiempo que dura el experimento. Realmente son dos experimentos, donde el mismo oleaje incide sobre dos perfiles que sólo se diferencian en el sedimento que los compone.

El oleaje que incide en el perfil genera en ambos casos la erosión del mismo, que se traduce en un retroceso de la línea de orilla. Este retroceso es menor para el caso del perfil compuesto por sedimento más grueso, aunque las condiciones de oleaje y forma del perfil inicial son idénticas en los dos casos.

La simulación de los dos casos con el modelo que se presenta aquí da resultados bastante aceptables, prediciendo de forma razonablemente precisa la posición de la línea de orilla. Asimismo, es capaz de reproducir de forma correcta el efecto de la variación en el sedimento que compone la playa.

Una vez vista la capacidad del modelo para reproducir la erosión del perfil, se realizó un test para averiguar la capacidad predictiva en el caso de acreción (figura 10). Puede verse que el modelo también predice de forma más o menos precisa la posición de la línea de orilla en la situación de equilibrio (al final del test). En este caso, la tasa de acreción en el experimento y en el modelo difieren sobre todo en los primeros estadios del experimento, aunque a medida que pasa el tiempo, ambas tasas tienden a igualarse.

Este resultado está dentro del rango de la aceptabilidad, sobre todo teniendo en cuenta la dificultad que representa simular este tipo de procesos:

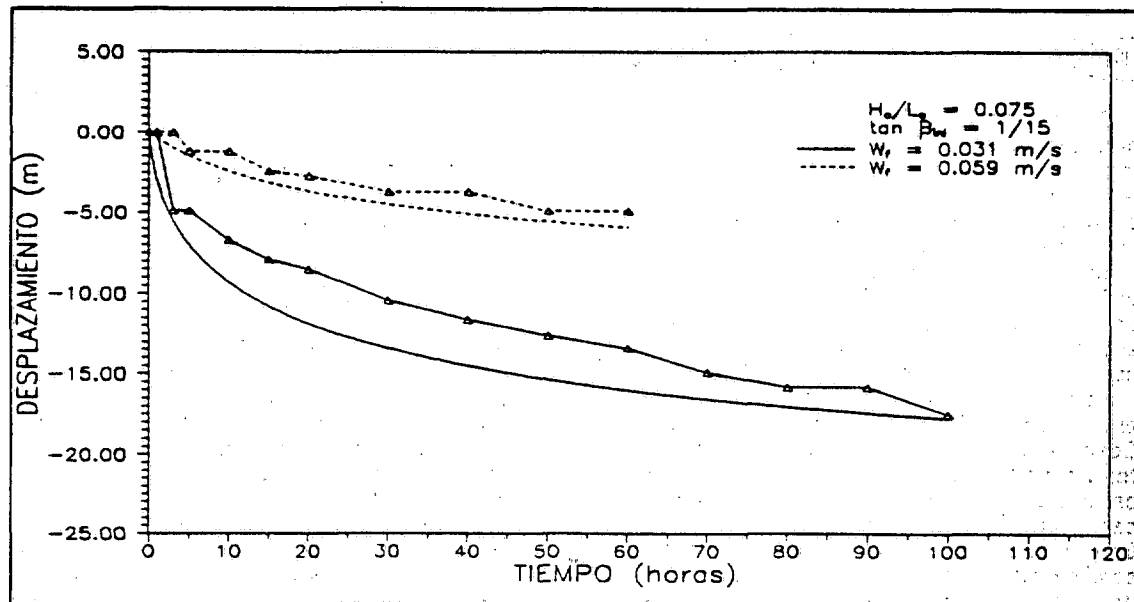
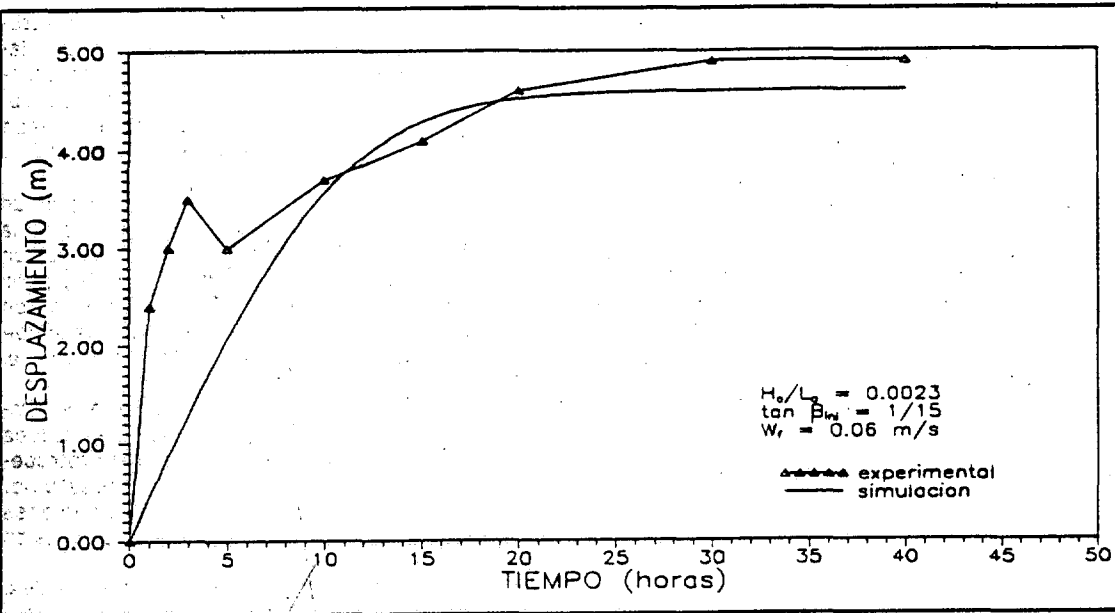


Figura 9. Simulación de la erosión de un perfil de playa para diferentes tamaños de sedimento.

Figura 10. Simulación de la acreción en un perfil de playa.



Generalmente, la mayoría de modelos de este tipo reproducen de forma fiable la erosión de la playa mientras que la recuperación de la misma —cuando es posible— nunca tiene la misma precisión.

Asimismo, en los dos tests existen una serie de fluctuaciones en la respuesta de la costa que son incapaces de ser reproducidas por el modelo. Estas fluctuaciones pueden asociarse a que en la naturaleza (en este caso laboratorio) las condiciones del oleaje incidente no serán realmente constantes y además la respuesta de la costa no es tan simplificada como el modelo, ya que se formarán barras y/o otros elementos morfológicos que harán que ésta no sea tan «lineal». Sin embargo, si olvidamos estas fluctuaciones, el comportamiento general de la costa, y la situación de equilibrio pueden ser simuladas razonablemente bien por el modelo.

Discusión y conclusiones

Se ha desarrollado una formulación paramétrica capaz de estimar el transporte transversal neto integrado en la zona de rompientes. Se estiman la magnitud y la dirección del mismo en función del flujo de energía incidente en la playa y del concepto de estado de equilibrio.

Este estado es caracterizado por un valor crítico del flujo de energía, que depende de la forma del perfil (pendiente de la zona de rompientes), del sedimento que compone la playa (velocidad de caída) y del período del oleaje incidente.

Se ha encontrado una relación funcional entre el perfil de equilibrio de la playa y el parámetro de Dean (6) a partir de un ajuste a datos de laboratorio a gran escala. En este punto hay que destacar que es necesario ampliar el número de datos para calibrar de forma más universal esta relación. En principio la calibración ha sido realizada con este conjunto de datos ya que están muy bien descritos y la mayor parte de las variables que

participan en el fenómeno han sido bien controladas. En este momento se están incluyendo otra serie de datos independientes de laboratorio a gran escala para aumentar el rango de aplicabilidad. Asimismo, se está realizando una calibración con datos a pequeña escala, pese a los problemas inherentes, en cuanto a representatividad de condiciones naturales, asociados.

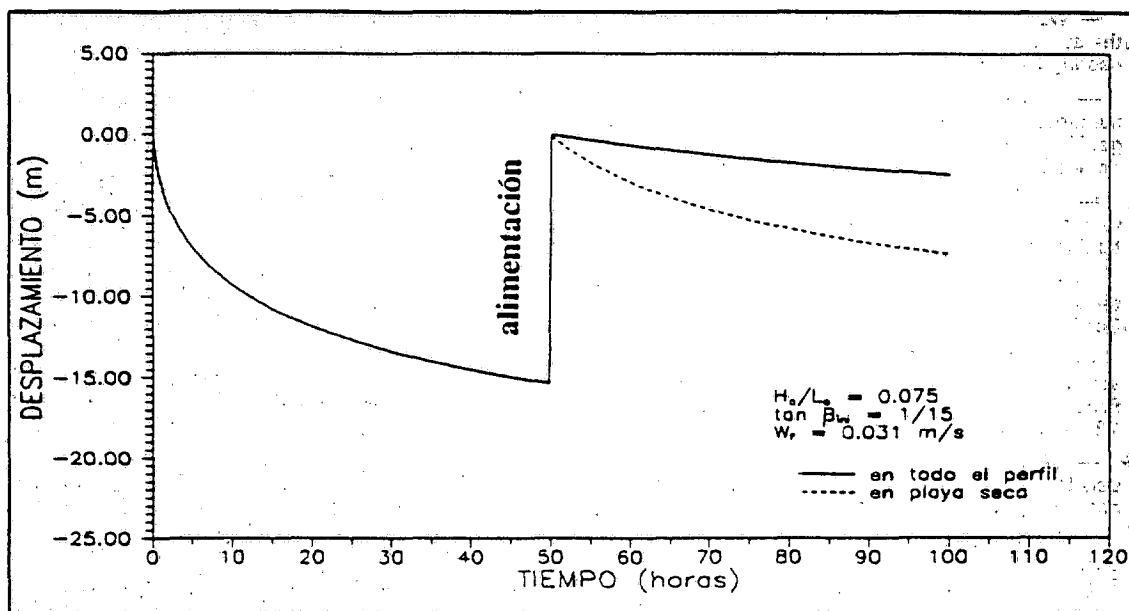
Esta formulación ha sido acoplada con otra para el transporte longitudinal en un modelo de dos líneas, capaz de predecir la evolución morfológica a corto y largo plazo. Aunque el modelo es de dos líneas, y en principio éstas pueden ser variables, se recomienda que éstas correspondan a la línea de orilla y la línea de rompientes. Esto es debido a que el transporte transversal ha sido calculado de forma integrada en la zona de rompientes, por lo que no se conoce su distribución a través de la misma. No es posible, por este motivo, calcular la fracción del mismo que se verifica entre una profundidad arbitraria y la línea de orilla (dentro del contexto de las formulaciones empleadas).

Se ha aplicado el modelo para predecir los cambios en el perfil de playa para el caso de incidencia normal del oleaje (i.e. sólo transporte transversal) dando buenos resultados tanto para casos de erosión como para casos de acreción del perfil.

Cabe destacar que el modelo muestra una mayor precisión para reproducir los procesos erosivos que los de acreción, en parte debido a las diferencias en la magnitud de ambos procesos. Este hecho es común a la mayoría de los modelos de este tipo, y no debe representar ningún menoscabo en cuanto a su validez, ya que, generalmente los procesos erosivos son los más importantes en cuanto a ingeniería de costas se refiere. Sin embargo, se está intentando recopilar ensayos con acreción significativa del perfil para mejorar su predicción.

Como ejemplo de la aplicabilidad del modelo, en la figura 11 se simula una regeneración de un perfil de playa que se encuentra en erosión. En este caso, una vez el perfil ha alcanzado una cier-

Figura 11. Simulación del efecto de la pendiente en un esquema de alimentación.



ta erosión, que se traduce en un retroceso de la línea de orilla, se realizan dos tipos de alimentación: (1) en la zona interior del perfil —berma e inmediaciones de la línea de orilla— y (2) en la totalidad del perfil hasta la zona de rotura. Ambas alimentaciones en su momento inicial hacen que la línea de orilla ocupe su posición original, con la diferencia que en (2) la pendiente del perfil es la misma que en el momento anterior a la alimentación, mientras que en (1) al actuar solamente sobre la parte interna del perfil, se ha producido un aumento de la pendiente del mismo.

El resultado del modelo es claro: mientras la regeneración (2) en principio parece menos favorable que la (1), ya que requiere un mayor volumen de material, muestra un mejor comportamiento. En efecto, la evolución del relleno ante las mismas condiciones de oleaje es mucho más favorable para el caso (2), ya que se mantiene la pendiente de equilibrio de la playa, por lo que la alimentación es bastante estable, observándose pocas pérdidas.

En el caso (1), por el contrario, el aumento de la pendiente hace que ésta se aleje de su situación de equilibrio, por lo que el perfil responde adoptando la forma de equilibrio, lo que se traduce en una rápida erosión y por tanto en una rápida pérdida del material de relleno.

Este ejemplo puede extenderse también al caso de diferencias entre el sedimento nativo y el sedimento de relleno, que puede ser asimismo simulado por el modelo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el M.O.P.T. a través del Programa de Clima Marítimo, a quien se agradece el apoyo prestado. Se agradece al Dr. M.J.F. Stive sus sugerencias y comentarios realizados sobre el presente trabajo.

Referencias

- ASCE, Workshop on Development and application of cross-shore sediment transport and beach profile change models. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CERC, Seattle, Washington, 1991.
- BAGNOLD, R. A. Mechanics of marine sedimentation. En: Hill, M. N. (ed.) The Sea, vol. III. New York: Interscience, 507-528, 1963.
- BAILARD, J. A. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. Journal of Geophysical Research, 86, C11, 10938-10954, 1981.
- BAILARD, J. A. Modeling on-offshore transport in the surf zone. Proc. 18th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1419-1438, 1982.
- BAILARD, J. A. Simple models for surfzone sediment transport. Naval Civil Engineering Laboratory, Technical Note N-1740, 55 p., 1985.
- BAKKER, W. T. The dynamics of a coast with a groyne system. Proc. 11th Coastal Engineering Conference, ASCE, 492-517, 1968.
- BODGE, K. R. A literature review of the distribution of longshore sediment transport across the surf zone. Journal of Coastal Research, 5, 2, 307-328, 1989.
- CALLIS, L.; SANCHEZ-ARCILLA, A. Transporte de sedimentos en la zona de rompientes. Evolución costera. Dirección General de Puertos y Costas. Programa de Clima Marítimo, Public, 36, M.O.P., Madrid, 206 p., 1989.
- DALLY, W. R.; DEAN, R. G. Suspended sediment transport and beach profile evolution. Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, 110 (1), 15-33, 1984.
- DALRYMPLE, R. A. Prediction of storm/normal beach profiles. Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, 118 (2), 193-200, 1992.
- DALRYMPLE, R. A.; THOMPSON, W. W. Study of equilibrium beach profiles. Proc. 15th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1277-1296, 1976.

- DEAN, R. G. Heuristic models of sand transport in the surf zone. Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone, 208-214, 1973.
- HANSON, H.; KRAUS, N. C. GENESIS: generalized numerical model system for simulating shoreline change. TR-CERC-89-19. US Army Engr. Waterways Experiment Station, CERC, 1989.
- HATTORI, M.; KAWAMATA, R. Onshore-offshore transport and beach profile change. Proc. 17th Coastal Engineering Conference. ASCE, 1175-1193, 1980.
- HIJUM, E. van. Equilibrium profiles of coarse material under wave attack. Proc. 14th Coastal Engineering Conference, ASCE, 939-957, 1974.
- IWAGAKI, Y.; NODA, H. Laboratory studies of scales effects in two-dimensional beach processes. Proc. 8th Coastal Engineering Conference. ASCE, 194-210, 1962.
- JOHNSON, J. W. Scale effects in hydraulic models involving wave motion. Transactions of the American Geophysical Union, 30 (4), 517-525, 1949.
- KAMPHUIS, J. W. Alongshore sediment transport rate. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 117, 6, 624-640, 1991.
- KRAUS, N. C.; HORIKAWA, K. Nearshore sediment transport. En: Le Mehaute, B. y Hanes, D. M. (ed.): The Sea: Ocean Engineering Science, 775-813. Wiley-Interscience, New York, 1990.
- KRAUS, N. C.; LARSON, M. Beach profile change measured in the tank for large waves, 1956-1957 and 1962. Technical Report CERC-88-6. U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center, 1988.
- KRIEBEL, D. L.; DEAN, R. G. Beach and dune response to severe storms. Proc. 19th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1584-1599, 1984.
- LARSON, M.; KRAUS, N. C. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. Technical Report CERC-89-9. U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center, 1989.
- LARSON, M.; KRAUS, N. C.; SUNAMURA, T. Beach profile change: Morphology, transport rate and numerical simulation. Proc. 21th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1295-1309, 1988.
- NAIRN, R. B. Prediction of Cross-shore sediment transport and beach profile evolution. Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering, Imperial College, London, 391 pp, 1990.
- NAYAKI, I. V. Equilibrium beach profiles of model beaches. Proc. 12th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1321-1340, 1970.
- OKAYASU, A. Characteristics of turbulence structure and undertow in the surf zone. Ph. D. Thesis. Yokohama Nat. University, Japan, 1989.
- OSAZA, H.; BRAMPTON, H. Mathematical modeling of shoreline evolution. Coastal Engineering, 4, 47-64, 1980.
- PELNARD-CONSIDERE, R. Essai de theorie de l'evolution des formes de vivage en plages de sable et de galets. IV Journées de l'Hydraulique, Question III, Rapport 1, 289-298, 1956.
- PRICE, W. A.; TOMLINSON, D. W.; WILLIS, D. H. Predicting changes in the plane shape of beaches. Proc. 13th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1321-1329, 1972.
- SANCHEZ-ARCILLA, A.; JIMENEZ, J. A. A simple numerical model to predict beach morphodynamics. Proceedings of the Skagen Symposium, 376-394, 1990.
- SANCHEZ-ARCILLA, A.; VIDAOR, A.; POUS, J. Improved longshore sand transport equation. Proc. 21st Coastal Engineering Conference, ASCE, 1382-1395, 1988.
- SAYAO, O. J.; GRAHAM, J. E. On the prediction of beach profiles. Associate Committee on Shorelines, Vol. 5, 1, 14-23. NRC. Ottawa, 1991.
- SUNAMURA, T. A predictive model of shoreline changes on natural beaches caused by storm and post-storm waves. Trans. of the Japanese Geomorphological Union, 4, 1-10, 1983.
- SUNAMURA, T. Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling. En: Lakhan, V. C. y Trenhaile, A. S. (ed.): Applications in coastal modeling, 159-213. Elsevier Oceanography Series, 49, Amsterdam, 1989.
- SUNAMURA, T.; HORIKAWA, K. Two-dimensional beach transformation due to waves. Proc. 14th Coastal Engineering Conference, ASCE, 920-938, 1974.
- STIVE, M. J. F. A model for cross-shore sediment transport. Proc. 20th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1550-1564, 1986.
- STIVE, M. J. F. Coastal profiles: their physic and their modelling. Seminar, Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, 1992.
- STIVE, M. J. F.; BATTJES, J. A. A model for offshore sediment transport. Proc. 19th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1420-1436, 1984.
- SWART, D. H. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulics Laboratory, Public. No. 131, 302 p., 1974.
- U.S. Army Corps of Engineers. Shore Protection Manual. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1984.
- WANG, H.; YANG, W. C. A similarity model in the surf zone. Proc. 17th Coastal Engineering Conference, ASCE, 529-546, 1980.
- YANG, W. C. Surf zone properties and on/offshore sediment transport. Ph.D. Thesis. University of Delaware, 1981.