

INGENIERIA DE PLAYAS (I): CONCEPTOS DE MORFOLOGÍA COSTERA

Agustín Sánchez-Arcilla, José A. Jiménez

Laboratori d'Enginyeria Marítima

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

RESUMEN: Se entiende por ingeniería de playas aquella que se realiza en costas sedimentarias, provocando generalmente una respuesta rápida de la zona litoral ante las nuevas condiciones generadas. A fin de que las actuaciones en este ámbito sean lo eficiente que debieran, hay que conocer y, en la medida de lo posible, predecir los cambios que se producen en la zona costera. Por ello, antes de analizar en detalle los diferentes tipos de actuación, lo cual se hará en un próximo artículo, aquí se abordan conceptos básicos de la evolución costera, como son las diferentes escalas evolutivas, tanto temporales como espaciales. Asimismo, se presenta un conjunto de herramientas básicas para poder predecir el comportamiento de la costa, tanto en condiciones naturales, como bajo la influencia de obras.

INTRODUCCION

La ingeniería de costas tiene como objetivo resolver los problemas que se plantean en la franja costera a las escalas de tiempo y espacio manejadas por el hombre y con los medios técnicos y económicos que este posee. Por estar las costas acantiladas sometidas a menor presión de uso (turístico, industrial, etc...) y evolucionar a unas escalas de espacio y tiempo más difíciles de controlar por el ser humano, este artículo se centrará en los tramos costeros sedimentarios. En particular, se abordarán las costas sedimentarias formadas por sedimento tipo arena, es decir, no se tendrán en cuenta las costas formadas por sedimentos cohesivos, ni las formadas por gravas, cantos y bolos. Aunque muchos de los procesos que se verán pueden ser extrapolables a este tipo de costas, las escalas de respuesta de estos sedimentos, difieren de las costas arenosas, debiendo ser particularizados a fin de caracterizar de forma adecuada su evolución.

Este es, por tanto, el ámbito de actuación de la ingeniería de playas, en el que los aspectos biológicos, ecológicos y socio-económicos poseen una importancia notable. Sin embargo, este artículo se centrará en los aspectos físico-morfodinámicos que hacen referencia al movimiento del sedimento. Es la forma más natural de abordar el problema, empezando por su extremo *físico*.

Pese a que tanto en el mundo científico como en los medios de comunicación es habitual hablar del *problema costero*, es importante mencionar que este problema solamente surge cuando la evolución costera no es la esperada por el hombre. En efecto, piénsese en la hipotética erosión de un tramo de costa en un lugar

deshabitado del planeta y es fácil imaginarse que pocos aplicarían el calificativo de *problema costero* a esta situación. La misma erosión en una zona costera en la que los edificios o vías de comunicación se encuentran a escasos metros o sobre la propia playa, sí que constituiría, sin embargo, un problema a resolver o mejor aun evitar.

Al plantearse los problemas que puede resolver la ingeniería de playas en este contexto de interacción del ser humano con el medio, es importante distinguir la evolución natural de una costa de la inducida por el hombre.

Para ilustrar la evolución natural a que se ven sometidas las playas, se puede mencionar el retroceso que experimenta la línea de orilla después de la acción de una tormenta (Figura 1). Esta erosión del perfil ilustra también la evolución natural que se produce en muchas playas en invierno y en verano; el oleaje de tormenta, que suele presentarse en invierno, produce una erosión del perfil con el consiguiente retroceso de la línea de orilla. En la estación estival, por el contrario y, debido a la acción del *swell* (mar de fondo) reconstructor que se presenta en numerosas playas del planeta (fundamentalmente estudiado en la costa pacífica de los Estados Unidos y Australia), se produce un avance de la línea de orilla asociado a una acreción -reconstrucción- del perfil (Figura 1). Es importante, sin embargo, resaltar que en las costas mediterráneas apenas existe este *swell* reconstructor que tan bien documentado está en las citadas costas. Por este motivo, este tipo de evolución natural no se presenta con la misma intensidad en las costas mediterráneas españolas. Este hecho aparentemente trivial, tiene, por ejemplo, repercusiones importantes, puesto que por este motivo, no es de esperar que en

nuestras playas mediterráneas una alimentación artificial depositada en la zona sumergida del perfil (por una tormenta), vuelva, en una fracción importante a la zona emergida de la playa (la temporada estival siguiente).

dividirse en dos grandes grupos: (i) las que actúan sobre la franja costera directamente (que son las genuinas de la ingeniería de playas), y (ii) aquellas que afectan indirectamente la franja costera (la construcción de embalses que disminuye el aporte de sedimento a las playas, la emisión de gases con efecto inver-

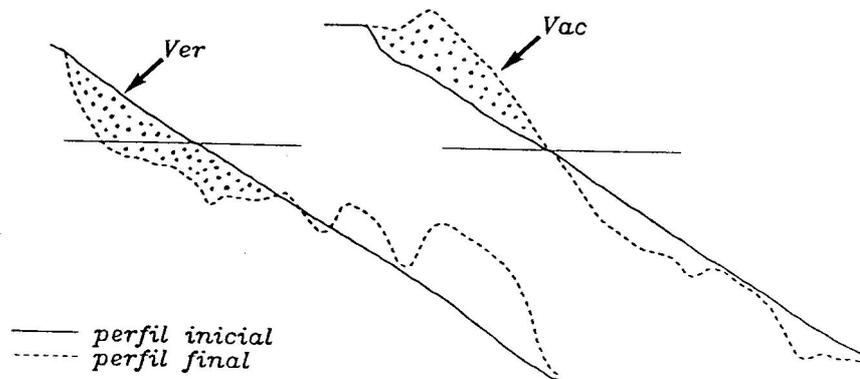


Figura 1. Perfiles de erosión y acreción (obtenidos en laboratorio)

Como ejemplo de evolución de costas inducida por el hombre, se puede mencionar el retroceso general a que están sometidas nuestras playas debido a que el volumen de sedimento que aportan nuestros ríos es cada vez mas escaso. Esta situación es debida, tanto a una mejor explotación de las cuencas de drenaje, lo que dificulta la erosión, como a una mayor regulación de los ríos, mediante embalses que actúan como barrera al transporte de sedimento hacia la línea de orilla

Tipología

Por los motivos antes expuestos, las actuaciones de ingeniería en la franja costera admiten muy diversas clasificaciones. Posiblemente lo mejor sería clasificarlas en actuaciones apropiadas (las que usan las propias fuerzas y procesos naturales para conseguir el objetivo deseado) e inapropiadas (las que, o bien pretenden ir frontalmente contra las propias fuerzas y procesos naturales, o bien aquellas en las que por desconocimiento se consigue un objetivo contrario al inicialmente deseado). Ejemplo ilustrativo de estas últimas soluciones inapropiadas es la construcción de puertos-isla que, con un coste notablemente superior al de los puertos convencionales, se ubicaban a una cierta distancia de la línea de orilla pensando que así, al no existir una barrera para interrumpir el transporte longitudinal, este se verificaría a lo largo de la playa sin interrupción (y por tanto sin producir erosiones y acreciones no deseadas inicialmente).

Desde un punto de vista mas general, las actuaciones de ingeniería con impacto en la franja costera pueden

nadero que al aumentar el nivel medio del mar disminuye la extensión de playa seca, etc.). En ambos casos, aun siendo de diferente naturaleza, generaran una respuesta en la zona costera de similares características, desde el punto de vista de la morfología costera. Ello es debido a que lo único que hacen, es alterar la hidrodinámica, mientras que la respuesta del borde costero a estas alteraciones es independiente de la forma en que se producen (la evolución costera no tiene capacidad de discernir quien genera un cambio, sino solo el cambio).

Con una perspectiva un poco mas convencional de ingeniería de costas, las intervenciones humanas en las zonas de playa pueden clasificarse en dos grandes grupos: rígidas y flexibles. Cada una de estas a su vez, se especifica por su geometría en planta, en perfil y por el material constructivo. Como ilustración se pueden mencionar las actuaciones rígidas clásicas que son los espigones, que en función de su geometría en planta pueden ser: paralelos a la costa, perpendiculares a la costa, oblicuos a la costa, etc. Por su geometría en perfil pueden ser emergidos o sumergidos. Por su material constructivo pueden ser de escollera, que es la solución habitualmente empleada (debido a que, al realizarse en calados relativamente reducidos, la opción mas comente para conseguir una sección estable es utilizar escollera natural), o bien tablestacas metálicas, sedimento rodeado por una cubierta de geotextil, etc. Las actuaciones flexibles se caracterizan por modificar la costa sin rigidizarla y además porque no son estacionarias en el tiempo y/o el espacio. Como ilustración se pueden mencionar dos grandes bloques de actuaciones flexibles en función del material constructivo utilizado. Las

primeras utilizan como material básico el sedimento y pueden ser, en función de su geometría en planta: alimentaciones artificiales a lo largo de la orilla, playa seca, alimentaciones artificiales en el perfil sumergido de playa, diques de arena perpendiculares a la orilla, etc. Actuaciones flexibles utilizando otros materiales pueden ser los espigones flotantes contruidos, por ejemplo, con neumáticos o bidones y también, las coberturas de vegetación para fijar el sedimento y disminuir el transporte. Esta última solución, en función de su geometría en perfil, puede ser cobertura de vegetación emergida, ilustrada por ejemplo por la vegetación que se utiliza para fijar y/o promover la creación de dunas, o bien cobertura de vegetación sumergida, ilustrada en el Mediterráneo, por ejemplo, por las poseidoneas que ayudan a fijar las zonas más sumergidas del perfil de playa.

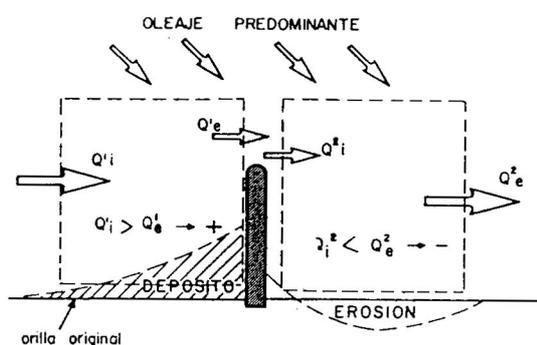


Figura 2. Esquemática de la influencia de un espigón en una playa.

Impacto

Desde el punto de vista de su impacto, las actuaciones ingenieriles en la franja costera producen tres tipos de impacto tal como ya se avanzó anteriormente: (i) Impacto físico, que es el que aquí se considerará, y que se refiere al movimiento de agua y sedimento. Como ejemplo se puede mencionar un espigón perpendicular a la orilla, que al ser construido disminuye el movimiento de agua y sedimento a lo largo de la línea de costa. Esto produce una erosión en la zona aguas abajo del espigón y una acumulación en la zona aguas arriba (Figura 2); (ii) Impacto ecológico en el que, tomando el ejemplo anterior de un espigón perpendicular a la línea de orilla, el movimiento de agua o corriente longitudinal que discurre en sentido paralelo a la costa es impedido por el espigón. Esto provoca una zona de agua sin renovación y varía la calidad del agua, su productividad biológica, etc.; (iii) Impacto socio-económico que, en el ejemplo anterior puede ilustrarse por las repercusiones sociales y económicas que la creación de una playa aguas arriba y la erosión de la playa existente aguas abajo tiene (turismo, etc.), así como por las modificaciones que en la productividad biológica de la zona (pesca, etc.) pueda producir la acreción y erosión antes mencionadas.

Lo importante es que cada actuación de ingeniería en la franja costera vaya acompañada de una matriz con todos los impactos previsible junto con su consiguiente cuantificación y valoración. Ya existen metodologías y protocolos tanto a nivel legislativo como en los centros de investigación, puesto que debido a la complejidad de los procesos que actúan en la franja costera, la tecnología para evaluar de un modo global e integral el impacto no está aún del todo desarrollada y mucho menos, suficientemente difundida.

En este artículo se abordará la evolución de las playas, a distintas escalas de tiempo y espacio, para ilustrar así el comportamiento costero en función de los diferentes agentes actuantes. Este constituye el primer paso antes de evaluar como las actuaciones de ingeniería generarán un impacto físico -sea positivo o negativo- en el borde costero. A continuación se dará una perspectiva general de los modelos existentes, desde los modelos físicos hasta los modelos numéricos y analíticos. Se pondrá un énfasis especial en estos últimos debido a su facilidad de uso, lo que los convierte en herramientas sencillas para predecir los cambios de la morfología costera.

Es objetivo de los autores completar este artículo con uno próximo, en el que se analicen detalladamente el impacto (tanto positivo como negativo) producido por las principales actuaciones de la Ingeniería de Playas.

LA EVOLUCION NATURAL DE LAS PLAYAS

Estudiar la evolución del borde costero tanto en condiciones naturales, como bajo la influencia de obras costeras, supone analizar los procesos que ocurren en la zona de confluencia de tres medios: aire, mar y tierra. Este hecho origina que esta zona se vea sometida a grandes solicitaciones energéticas, de origen y contenido energético diverso, por lo que el espectro teórico del movimiento de la costa abarcaría diferentes frecuencias, asociadas a diferentes agentes impulsores.

Escalas de tiempo y espacio

El estudio de los procesos costeros a diferentes escalas, tanto espaciales como temporales, no es nuevo, ya que se ha utilizado implícitamente al estudiar de forma desacoplada tanto los agentes hidrodinámicos (turbulencia, olas, mareas, storm-surges, corrientes, etc...), como los morfodinámicos (formación de ripples, transporte transversal, transporte longitudinal, etc...). Su utilización en los estudios de morfología costera es relativamente reciente, sobre todo a partir de la necesidad de estudiar los cambios a gran escala (ver e.g. Wilkinson y McGowen, 1977; Horikawa, 1981; Wright et al, 1984; Eliot y Clarke, 1989 y Stive et al., 1990 entre otros).

La determinación del tamaño de las escalas temporal y espacial de cada una de las componentes en las que se quiera dividir los procesos evolutivos, tiene un cierto grado de subjetividad y, dependerá de los intereses que se persigan, aunque las escalas asociadas a la acción de cada uno de los agentes impulsores, generalmente son aceptadas de forma estandarizada. Un ejemplo de clasificación de procesos costeros en escalas temporales y espaciales pueden verse en la Figura 3.

es mayor que la escala de interés, a dicho agente se le considerara como una *componente extrínseca*, lo que supone que actúa como condición de contorno sin producir una interacción a la escala de estudio. Por ultimo, si la escala de los agentes actuantes, y por tanto, los procesos inducidos, esta relacionada con la escala de estudio, es donde se producirá la interacción dinámica, y los agentes actuaran como *componentes del proceso* estudiado. En este ultimo caso, se ha mencionado que la escala de los agentes este "relacionada" con la del proceso estudiado, ya que

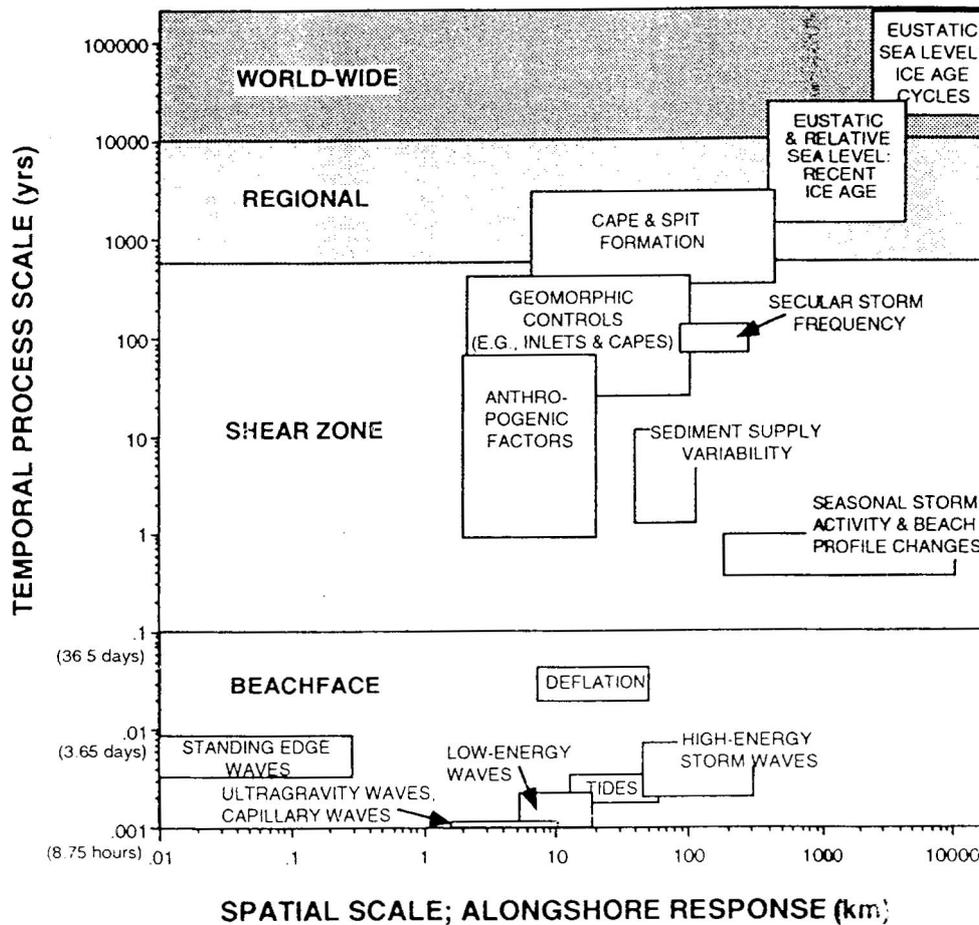


Figura 3. Escalas en morfología costera (Fenster et al., 1993).

Uno de los problemas que aparecen a la hora de dividir en componentes la evolución costera, es la determinación de la escala de influencia de los cambios inducidos por un agente determinado, es decir, hasta donde son relevantes cada uno de los procesos. Al tratar el problema desde una óptica multiescalar, cada paso de una escala a otra supone la realización de un filtrado o promediado tanto temporal como espacial, de tal manera que, un fenómeno que a una escala determinada es una componente del proceso, a otras escalas actúa de una forma muy diferente. Así, un agente cuya escala de acción es pequeña respecto a la escala de estudio, se considera como *ruido* y tendrá un efecto residual en el proceso. Si en cambio, la escala de acción del agente

es difícil delimitar de forma exacta como interaccionan los agentes.

Los cambios morfológicos sufridos por un tramo de costa son el resultado integrado de la acción de diferentes agentes dinámicos actuando a diferentes escalas temporales y espaciales. Esta diferencia de escala en los agentes impulsores se vera reflejada a su vez en una respuesta morfológica diferenciada, por lo que es de gran interés a la hora de formular un modelo evolutivo realizar un análisis de escala de dichos cambios. Un ejemplo de jerarquización de los cambios morfológicos, tomado de Jiménez et al. (1993), es aquel en el que se establecen cuatro componentes principales, caracteriza-

das por la acción de un conjunto de agentes impulsores y por un determinado tipo de respuesta costera. En sentido decreciente, estas componentes son:

Cambios a largo plazo

Son cambios que experimenta la costa de forma global, tanto en planta como en perfil, y que determinan el

balance total de sedimentos. Los agentes que producen estos cambios son varios: el aporte de sedimento por parte de ríos, que juega un papel positivo en el balance en cuanto a su actuación como fuente; las variaciones relativas en el nivel del mar, tanto de origen eustático como debidas a la subsidencia, que inducen una perdida de sedimento en la zona costera mas interna que es transportado mar adentro (Bruun, 1962); los intercambios de sedimento entre el perfil activo de la

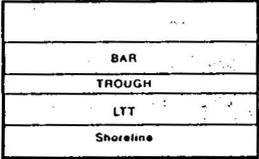
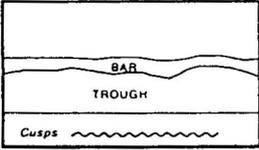
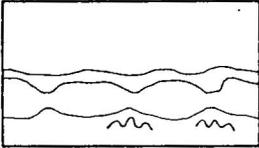
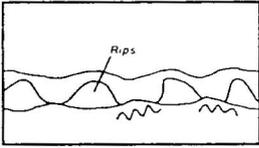
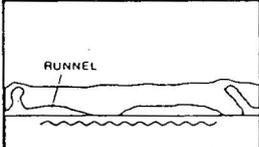
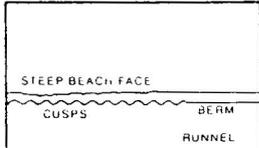
	Ω	K	
<p>DISSIPATIVE (D)</p> 	>6	>20	<p>BAR TYPE H DISSIPATIVE (unbarred; infragravity scaled surf zone)</p>
<p>INTERMEDIATE Longshore Bar-Trough (LBT)</p> 	~ 5	5-20	<p>BAR TYPE G INFRAGRAVITY SCALED 2-D BAR (longshore variable; non-rhythmic; continuous trough; infragravity scaling)</p> <p>BAR TYPE F NON-RHYTHMIC, 3-D BAR (longshore variable; non-rhythmic; continuous trough; infragravity scaling)</p>
<p>INTERMEDIATE Rhythmic Bar and Beach (RBB) (Normal or Skewed)</p> 	~ 4	5-20	<p>BAR TYPE E OFFSHORE RHYTHMIC BAR (unbarred; infragravity scaled surf zone)</p>
<p>INTERMEDIATE Transverse Bar and Rip (TBR) (Normal or Skewed)</p> 	~ 3	5-20	<p>BAR TYPE D ATTACHED RHYTHMIC BAR (no coherent longshore rhythmicity; discont. trough; infragravity scaling)</p> <p>BAR TYPE C NON RHYTHMIC, ATTACHED BAR (little or no longshore rhythmicity; discont. trough; infragravity scaling)</p>
<p>INTERMEDIATE Ridge-Runnel or Low Tide Terrace (LTT)</p> 	~ 2	5-20	<p>BAR TYPE B INCIDENT SCALED BAR (little or no longshore variability; may be attached; incident scaling)</p>
<p>REFLECTIVE (R)</p> 	<1	3.5-10	<p>BAR TYPE A REFLECTIVE (unbarred; incident scaled surf zone)</p>
Wright & Short (1984)		Sunamura (1988)	Lippman & Holman (1990)

Figura 4. Estados morfodinámicos.

playa y la parte mas interna de la plataforma, debidos principalmente al movimiento oscilatorio inducido por el oleaje, a corrientes inducidas por este y, a corrientes inducidas por el viento y/o por gradientes de densidad (e.g. Wright, 1987); intercambios de sedimento en la playa emergida inducidos por rebase y viento (Leatherman, 1979; Illemer y Rust, 1988). La escala temporal asociada a esta componente es del orden de décadas o superior.

Cambios a medio plazo

Son cambios que experimenta la costa de forma sistemática, que pueden considerarse como la tendencia evolutiva de un tramo costero con una escala espacial del orden de kilómetros a una escala temporal de varios años. El principal agente impulsor es el oleaje en cuanto a su capacidad para generar un transporte longitudinal de sedimentos, y mas específicamente, las variaciones de este a lo largo de la costa. En este caso, se considera el oleaje dominante o "resultante" a lo largo de un año, por lo que se tiene en cuenta su efecto integrado. En esta escala pueden considerarse como componentes extrínsecas, el aporte de sedimentos por parte del río y procesos de perdida o ganancia de sedimentos en tramos de costa específicos, debido a procesos de mas larga escala

Cambios a corto plazo

Consisten básicamente en los cambios experimentados en la zona mas activa del perfil de la playa (zona de rompientes) y que se manifiestan en avances y retrocesos de la línea de orilla, así como en las modificaciones del sistema surco/barra. Los principales agentes impulsores son el oleaje y el viento, aunque a diferencia de la componente anterior, se considera sobre todo su acción estacional y/o cíclica (alternancia de periodos de oleaje de baja energía y de tormentas). La escala temporal de estos cambios es inferior a un año, pudiendo llegar a producirse variaciones en el orden de horas (Lippmann y Holman, 1990).

Cambios episódicos

Son cambios originados durante la acción de agentes dinámicos altamente energéticos con un período de retorno largo, y que se manifiestan en una transformación (e.g. erosión) muy importante de la costa de mucha mayor magnitud que la inducida durante los cambios a corto plazo. El principal agente inductor será la presencia de niveles del mar altos (marea meteorológica) junto con temporales de oleaje. Este tipo de cambios, a diferencia de los anteriores, no tiene una escala temporal definida ya que, por la naturaleza de los agentes que los inducen, deben considerarse como aleatorios, sin una periodicidad o estacionaridad predefinida. Aparecen muy localizados tanto en el tiempo como en el espacio ya que, aunque los agentes dinámicos que los inducen

actúan sobre toda la costa, sólo algunos tramos de la costa especialmente sensibles, debido a su morfología sufrirán sus efectos de forma importante.

Evolución costera real. Un proceso en tres dimensiones

La evolución *real* de un tramo costero es el resultado de la integración de las componentes antes descritas, y se traduce en una variación tridimensional de la morfología costera. Este carácter tridimensional origina que muchos de los cambios sean bastante difíciles de caracterizar y, por supuesto, de predecir.

Aunque los primeros estudios de caracterización y/o predicción de los cambios costeros se remonta varias décadas atrás, es a finales de los años 70 cuando comienza a imponerse una corriente de trabajo, en la que se estudia la evolución costera de forma integrada, como respuesta a las solicitaciones energéticas incidentes, la *morfodinámica*. Los primeros trabajos "completos" fueron realizados paralelamente por Wright *et al.* (1979) y Short (1979). Dichos trabajos fueron compilados por ambos (Wright y Short, 1983, 1984) resultando en un modelo de evolución de costas barradas, en las que se producía una variación en la morfología de la zona mas interna del perfil *la zona de rompientes*, en función de la energía incidente (Figura 4).

En este modelo de comportamiento, se clasifican las playas en un espectro que va del estado disipativo al reflexivo asociados a determinados regímenes de oleaje y marea. Para ello se suele utilizar como variable hidrodinámica que determina el estado del perfil el llamado *surf similarity parameter* (Battjes, 1974), que no es mas que el *Número de Iribarren*. Este parámetro depende tanto de la pendiente del perfil, como de las condiciones del oleaje incidente (altura y período). Una de las características principales de la morfodinámica es que no sólo caracteriza las fuerzas impulsoras que actúan sobre la playa a través del oleaje incidente, sino que predice la aparición de diferentes tipos de ondas que van desde las armónicas y sub-armónicas ($T < 15$ s) hasta las infragravitatorias (hasta los 70 s), y una serie de elementos morfológicos ligados a ellas conocidos como topografía rítmica (ver e.g. Carter, 1988).

El estado *disipativo*, asociado a un número de Iribarren pequeño, se caracteriza por un perfil con pendiente muy suave y una zona de rompientes ancha, donde pueden apreciarse barras paralelas a la playa y donde, generalmente, se generan ondas infragravitatorias. En esencia se corresponderá con un perfil de playa erosivo. El estado *reflectivo*, asociado a altos números de Iribarren, se caracteriza por poseer un perfil de playa de gran pendiente y ausencia de barras sumergidas, siendo

la zona de rompientes generalmente estrecha. Pueden encontrarse ondas de borde atrapadas que pueden generar medias lunas *-cusps-*. Este perfil se correspondería con una situación acumulativa. Entre ambos, aparecen una serie de estados intermedios en los cuales se desarrolla una morfología rítmica de acuerdo a las características del oleaje incidente y a las características de las ondas que se generan en la zona de rompientes (ver Figura 4).

Evolución en planta y perfil

Aunque como se ha visto, la evolución costera es un proceso tridimensional, es frecuente abordar el problema mediante el estudio de dos componentes de forma desacoplada, para posteriormente ser combinadas, la mayor parte de las veces, de forma lineal. Así, se suele separar la evolución de un tramo de costa en dos direcciones, una paralela a la línea de costa, *cambios en planta*, y otra normal a esta, *cambios en perfil*. Cada uno de estos cambios estarán inducidos por un tipo dominante del transporte, en el primero de los casos por el transporte longitudinal y en el segundo, por el transporte transversal.

Cambios en planta

Los cambios en planta de una playa, son aquellos que se producen debido, generalmente, a la presencia de un gradiente en el transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la orilla. En el caso de que este sea positivo (lo que indica que las tasas de transporte se incrementan), se producirá una erosión de la costa, con la consiguiente pérdida de superficie de playa. En el caso de que los gradientes sean negativos, situación que ocurre en zonas donde decrecen las tasas de transporte, se producirá una acumulación de sedimentos y, por lo tanto, un aumento en la superficie de playa. Este tipo de cambios suele considerarse como permanente en el tiempo, salvo que las condiciones generadoras desaparezcan. Una excepción serían los cambios en planta que se producen en playas encajadas, donde puede observarse una basculación de la playa hacia sus apoyos en función del oleaje incidente.

Por ello, cabe decir que los cambios en planta que sufren las costas sedimentarias son función tanto de las características *naturales* del esquema de transporte, como de cualquier elemento existente en la costa que pueda alterar el mismo, como pueden ser *condiciones de contorno y existencia de fuentes y sumideros*. Intentar hacer un listado de las posibles modificaciones en planta que sufren las costas sedimentarias, puede llegar a convertirse en una interminable lista de cambios y agentes asociados, lo cual escapa al objetivo del presente artículo. Si el lector desea encontrar una excelente presentación sistemática de los cambios en planta, así como la de los agentes o condiciones generadoras, puede consultar la metodología propuesta

por Suarez Boreas (1980) para el análisis de cambios en planta basada en el estudio de singularidades.

Cambios en perfil

Los cambios en el perfil de playa, son aquellas modificaciones que se producen en la dirección normal a la costa, producto generalmente del transporte transversal de sedimento. En principio, suelen considerarse como estacionales y/o cíclicos, ya que dependen, fundamentalmente, del contenido energético del oleaje, el cual suele tener un marcado carácter estacional. Básicamente pueden describirse dos tipos de cambios, o dos tipos de perfil (ver Figura 1):

(i) *Perfil de erosión o de tormentas*, que se produce durante la acción de tormentas, en las que el oleaje que actúa sobre la playa es de gran contenido energético y, genera durante el proceso de rotura corrientes de retomo *-undertow-* de gran intensidad. Bajo estas condiciones, se produce una erosión de la parte interna del perfil retrocediendo la línea de orilla y, transportándose el material hacia mar adentro, siendo depositado la mayor parte de las veces en forma de barras sumergidas, lo que genera un suavizamiento de la pendiente del perfil. Las barras suelen cumplir dos funciones, por un lado actúan como *filtro energético*, haciendo que las olas rompan antes de llegar a la playa y actuando, por lo tanto, como un mecanismo autoprotector de la playa ante la acción de tormentas (ver e.g. Carter y Balsillie, 1983). A la vez, las barras actúan a modo de *reservorio sedimentario*, donde el sedimento es almacenado hasta que las condiciones de oleaje permitan su vuelta a la playa emergida

(ii) *Perfil de acreción*, que se produce durante la acción de un oleaje de baja energía o reconstructor. Bajo estas condiciones, el sedimento erosionado y depositado como barra, comienza a ser transportado hacia costa, hasta llegar a la línea de orilla, produciendo un avance de la misma. El resultado ideal, sería un perfil sin barras, de elevada pendiente y con una amplia berma.

Hay que destacar que las escalas de tiempo a las que se producen ambos perfiles son bastante diferentes. Así, mientras que el perfil de erosión puede tardar del orden de horas en formarse (dependiendo de la intensidad de la tormenta), el perfil de acreción puede durar incluso meses en llegar a su desarrollo completo, el cual puede interrumpirse en el caso de la acción de un nuevo temporal (ver en la introducción la descripción básica de los cambios en el perfil en la costa mediterránea).

Para estimar la presencia de un tipo u otro de perfil, existen una serie de parámetros sencillos que utilizan tanto características del oleaje como del propio perfil en sí (granulometría y pendiente). El primer parámetro

utilizado fue el peralte del oleaje (Waters, 1939), y puesto que se vio que era insuficiente para predecir de forma efectiva los cambios observados (Saville, 1957), se introdujeron otros parámetros que tenían en cuenta la granulometría del sedimento (Rector, 1954; Iwagaki y Noda, 1962; Dean, 1973). Adicionalmente otros autores incluyeron la pendiente del perfil (Sunamura y Horikawa, 1974; Hattori y Kawamata, 1980). Una extensa revisión acerca de los criterios existentes puede verse en Larson (1988) y Negro (1990). Jiménez y Sánchez-Arcilla (1993) analizan la capacidad de predecir cuantitativamente los cambios en el perfil de una serie de parámetros, concluyendo que para ello había que incluir la pendiente del perfil inicial (Jiménez et al., 1993).

MODELOS PREDICTIVOS

Una vez vista esta somera descripción de los cambios que se producen a diferentes escalas de tiempo y espacio, a continuación se presentaran parte de las herramientas disponibles para predecirlos. La importancia de estas herramientas radica en que permitirán estimar el efecto que puede generar cualquier acción realizada en la costa sobre la situación evolutiva de la misma. Con ello, se podrían evitar acciones contraproducentes a la vez que permitirían diseñar de forma efectiva actuaciones de protección costera.

Modelos físicos

La primera herramienta disponible son los modelos físicos, considerando como tales los modelos de laboratorio y las medidas de campo.

El primer y mas grande de los laboratorios es la naturaleza, en la que se pueden medir todos los procesos antes descritos a una escala real (ver *e.g.* Howd y Birkemeier, 1987; Sánchez-Arcilla *et al.*, 1991). El problema radica en que el control de un tramo de costa supone, dependiendo de su tamaño, un gran esfuerzo tanto de personal, como de aparataje, lo que redundaría en un coste difícilmente asumible, a no ser que las características del tramo costero en si lo justifiquen (un ejemplo podía ser la costa holandesa). Actualmente, se están desarrollando nuevas tecnologías cuya utilización, como puede ser el GPS en levantamientos topográficos (ver *e.g.* Morton *et al.*, 1993) o como la teledetección, permitirán en un futuro próximo el abaratamiento de los costos y la reducción del tiempo de ejecución.

A fin de intentar reproducir y estudiar los cambios costeros de forma controlada, se utilizan los experimentos de laboratorio o, modelos físicos propiamente dichos. Estos se pueden dividir en dos grandes clases dependiendo de la escala a la que se realizan: *modelos a pequeña escala* y *modelos a gran escala*.

Los modelos a pequeña escala, se caracterizan por reproducir las condiciones del oleaje incidente utilizando relaciones de escala que permiten trabajar con alturas de ola del orden de hasta 100 veces menores de las reales. Aunque las características del oleaje pueden llegar a reproducirse de forma adecuada mediante estas escalas, no ocurre lo mismo con el sedimento, ya que sus dimensiones no pueden ser reducidas, por lo que en este tipo de modelos es intrínseco la retención de algunos efectos de escala dependiendo de las dimensiones utilizadas.

Dentro de los modelos a pequeña escala destacan los modelos en planta, realizados en piscinas de oleaje, generalmente multidireccional, en los que se pueden reproducir de forma mas que aceptable, el efecto de estructuras sobre la morfología en planta de las playas. Hay que notar que este tipo de modelos no existen a gran escala, debido a las dimensiones que implicarían.

Los modelos físicos de perfil tratan de estudiar la dinámica transversal que se genera en el perfil de playa por incidencia normal del oleaje, y se realizan en canales de oleaje, en los que el eje longitudinal de este suele ser del orden de 20 veces o mas el ancho del mismo. Aunque existen numerosos canales de pequeña escala, debido a los efectos antes mencionados, no pueden competir a la hora de caracterizar la dinámica del perfil con los grandes canales.

Los modelos a gran escala serían aquellos realizados en grandes canales, en los que los problemas de escala se reducen a su mínima expresión, y donde las alturas de ola utilizadas se aproximan a las que se pueden encontrar en la naturaleza. Los conjuntos de datos a gran escala existentes son los debidos a Kraus y Larson (1988), Kraus *et al.* (1992), Kajima *et al.* (1982), Dette y Uliczka (1987), Vellinga (1986) y Sánchez-Arcilla *et al.* (1994).

Modelos numéricos basados en la física

Dado el coste que supone tanto la obtención de datos en campo, como en laboratorio, la utilización de modelos predictivos, se ha convertido en la principal herramienta para caracterizar y predecir el comportamiento costero. Su principal ventaja es la rapidez y economía que representa para el usuario, mientras que entre las desventajas, hay que citar las simplificaciones que encierran, por lo que hay que aplicarlos dentro de las hipótesis en las que han sido desarrollados y, tras una previa calibración.

Existen numerosas clases de modelos numéricos, validos para las distintas escalas de tiempo y espacio (*e.g.* ver Kraus, 1988). Entre los mas utilizados cabe destacar los modelos de 1 línea, en los que sólo simulan las variaciones en planta y donde el único agente impulsor es el transporte longitudinal de sedimentos (*e.g.* Hanson

Hanson y Kraus, 1989). Este tipo de modelo, aunque muy simplista, permite predecir con una fiabilidad aceptable el impacto de las obras costeras relacionadas con modificaciones del esquema de transporte longitudinal, a una escala a la que se suele diseñar este tipo de actuaciones (Figura 5). Una extensión de este tipo de modelo es el modelo de 2 líneas, en los que se incluye de forma paramétrica los efectos del transporte transversal.

reproducir el comportamiento de la costa. Dado que son modelos empíricos, cuanto mas grande sea el conjunto de datos, mayor será su fiabilidad. La desventaja principal es que no tienen en cuenta la física del proceso, y se limitan a hacer un tratamiento estadístico del conjunto de datos, teniéndose que interpretar posteriormente los resultados. El ejemplo típico de estos modelos es el de *funciones ortogonales empíricas* (Winant *et al.*, 1975; Medina *et al.*, 1990).

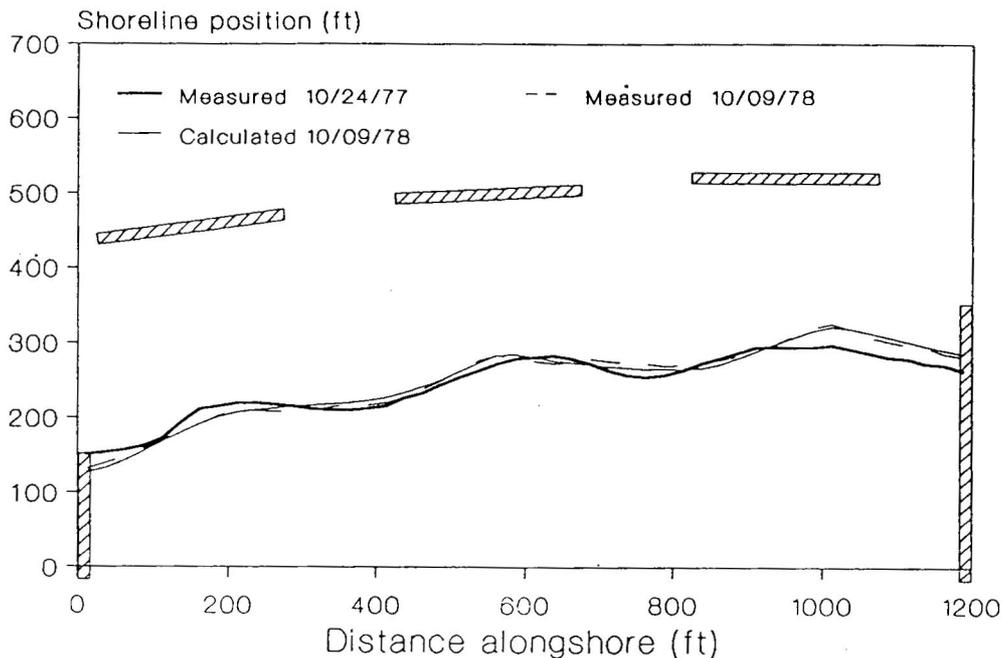


Figura 5. Simulación del efecto de diques exentos con un modelo de 1 línea (Hanson y Kraus, 1989).

Aparte de estos modelos, existen otros con un nivel de resolución mucho más detallado y, que reproducen la acción de prácticamente todos los agentes impulsores existentes. Su esquema de trabajo es: propagación del oleaje, estimación del campo de corrientes, evaluación de las tasas de transporte de sedimento y evolución del fondo. Entre estos se encuentran los modelos de evolución del perfil (modelos 2DV) y los modelos completos de evolución del fondo (modelos 2DH). Una revisión detallada acerca de los mismos puede verse en Horikawa (1988).

Modelos numéricos basados en la estadística

Existe una serie de modelos que aunque son capaces de simular el comportamiento evolutivo de una costa, su desarrollo está basado en un análisis estadístico de datos registrados sobre la evolución de la misma. Estos modelos, analizan un conjunto de datos dado y a través de determinadas funciones empíricas, son capaces de aislar los distintos *modos* de evolución del tramo costero analizado y a partir de una serie de funciones

Modelos analíticos

Aunque desde el desarrollo de los ordenadores personales y su rápida expansión hacia aparatos con grandes velocidades de cálculo, la utilización de modelos numéricos está al alcance de todo aquel que posea un ordenador, existen una serie de modelos analíticos, mucho más sencillos de aplicar que, respetando las hipótesis sobre las que se han desarrollado, pueden dar una estimación aceptable del comportamiento de la costa. A continuación se describen algunos de los más utilizados y las condiciones bajo las que se pueden aplicar, tanto en planta como en perfil.

Modelos en planta

Bahías de equilibrio: Uno de los modelos analíticos más conocidos para la determinación de la forma en planta es el de *bahías de equilibrio*, en los que se predice la forma de equilibrio de playas encajadas. Se parte del concepto de que la configuración de equilibrio es aquella en la que el transporte de sedimentos a lo largo de la costa se anula. Esto implica que en todo

punto a lo largo de la playa la orientación de esta es localmente paralela a la dirección del oleaje incidente, tras modificarse durante su propagación a la costa, principalmente por difracción en uno de los extremos de la bahía. La condición necesaria para su aplicación es que las playas estén encajadas entre barreras integrales, *i.e.* que no exista intercambio de sedimento a través de sus extremos, y que no exista ningún aporte o sumidero de sedimentos en la playa. Ya que, en el caso de que el balance sedimentario de la costa variase en el tiempo, la forma de equilibrio variaría también.

encajadas, en la que tras un ajuste empírico con datos de campo y laboratorio llegan a una expresión cuadrática que relaciona los distintos parámetros que definen la forma de la playa (ver Figura 6), y donde las constantes de la ecuación 1 tienen un valor universal según los autores para diferentes valores de β .

$$R/R_0 = C_0 + C_1(\beta/\theta) + C_2(\beta/\theta)^2 \quad (1)$$

Recientemente, Tan y Chiew (1994), proponen una modificación de este método, en el que derivan una expresión similar pero dependiente de un solo parámetro.

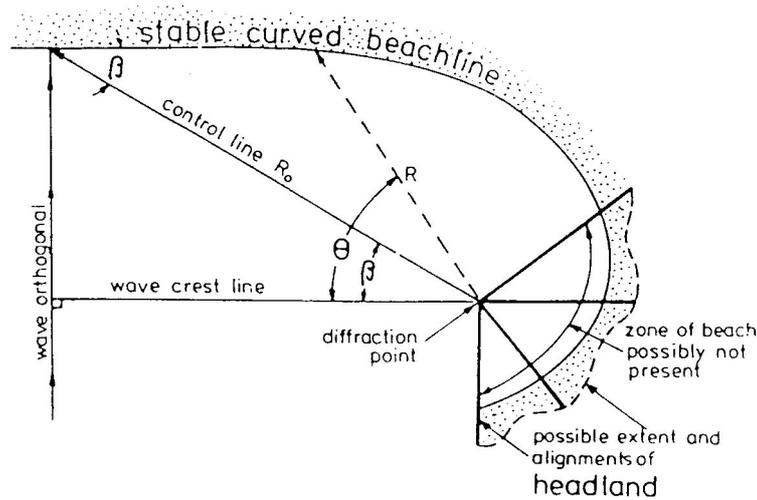


Figura 6. Esquemática de una bahía de equilibrio.

Estos modelos son *empíricos* y han sido desarrollados a partir de datos de la forma en planta de playas naturales y de laboratorio, por lo que la forma en planta de equilibrio sería determinada por el oleaje dominante de la zona, aparte de las condiciones físicas de la bahía, y su generalización es difícilmente aceptable desde el punto de vista de la física del proceso.

Entre las diferentes propuestas cabe destacar el uso de arcos de círculo (Hoyle y King, 1958), cicloides (Bruun, 1953), espirales logarítmicas (Yasso, 1965; Silvester, 1970; LeBlond, 1972) y espiral logarítmica de ángulo constante de 30° (Garau, 1979). Berenguer y Enríquez (1988) describen la forma en planta de playas artificiales, entre espigones y diques exentos, mediante un arco de circunferencia siendo sus parámetros función de varias variables (clima de oleaje, dimensiones, sedimento, etc...).

Aunque el método más trabajado era el de la espiral logarítmica, debido a su curvatura solo era aplicable a la parte más curva de la bahía y además, su centro no coincidía con el polo de difracción, por lo que su uso era cuestionable (Silvester y Hsu, 1991).

Hsu y Evans (1989) desarrollaron una nueva expresión para describir la configuración de equilibrio de playas

Jiménez *et al.* (1994) analizan el comportamiento del método de Hsu y Evans (1989) y el de Tan y Chiew (1994) utilizando playas del litoral catalán, encontrando que, de forma general, el método de Hsu y Evans predecía mucho mejor la forma en planta de las playas analizadas. Una de las conclusiones de Jiménez *et al.* (1994) es que, en el caso de playas encajadas en las que los obstáculos naturales impiden un desarrollo muy curvo de la línea de costa en sus proximidades (situación bastante común en la naturaleza), la ecuación 1 puede ser truncada en el primer orden, de tal forma que se puede describir la forma en planta mediante una relación lineal de R/R_0 frente a (β/θ) . Asimismo encontraron que, playas con un mismo ángulo β , presentan diferentes valores de R/R_0 , por lo que es cuestionable la obtención de una expresión de valor universal si no se tienen en cuenta las variables que participan en el proceso (oleaje, granulometría del sedimento, etc...). Por último, comentar que se ha propuesto la aplicación de este tipo de modelos en obras de protección de costas tales como, estabilización de playas para evitar problemas de erosión (Silvester, 1960; Hsu *et al.*, 1989), estabilización de playas adyacentes a los contradiques de puertos para impedir el aterramiento de puertos originados por difracción (Hsu *et al.*, 1993), etc..

Modelos analíticos basados en la ecuación de difusión

Este tipo de modelos esta basado, a diferencia de los anteriores, en la física del proceso que se quiere simular, y por lo tanto son más generales y con mayor

el termino $\text{sen } 2\alpha_b$ y D sería la profundidad hasta donde se producen los cambios. Esta ecuación puede resolverse analíticamente como un problema de valores iniciales o como un problema de condiciones de contorno.

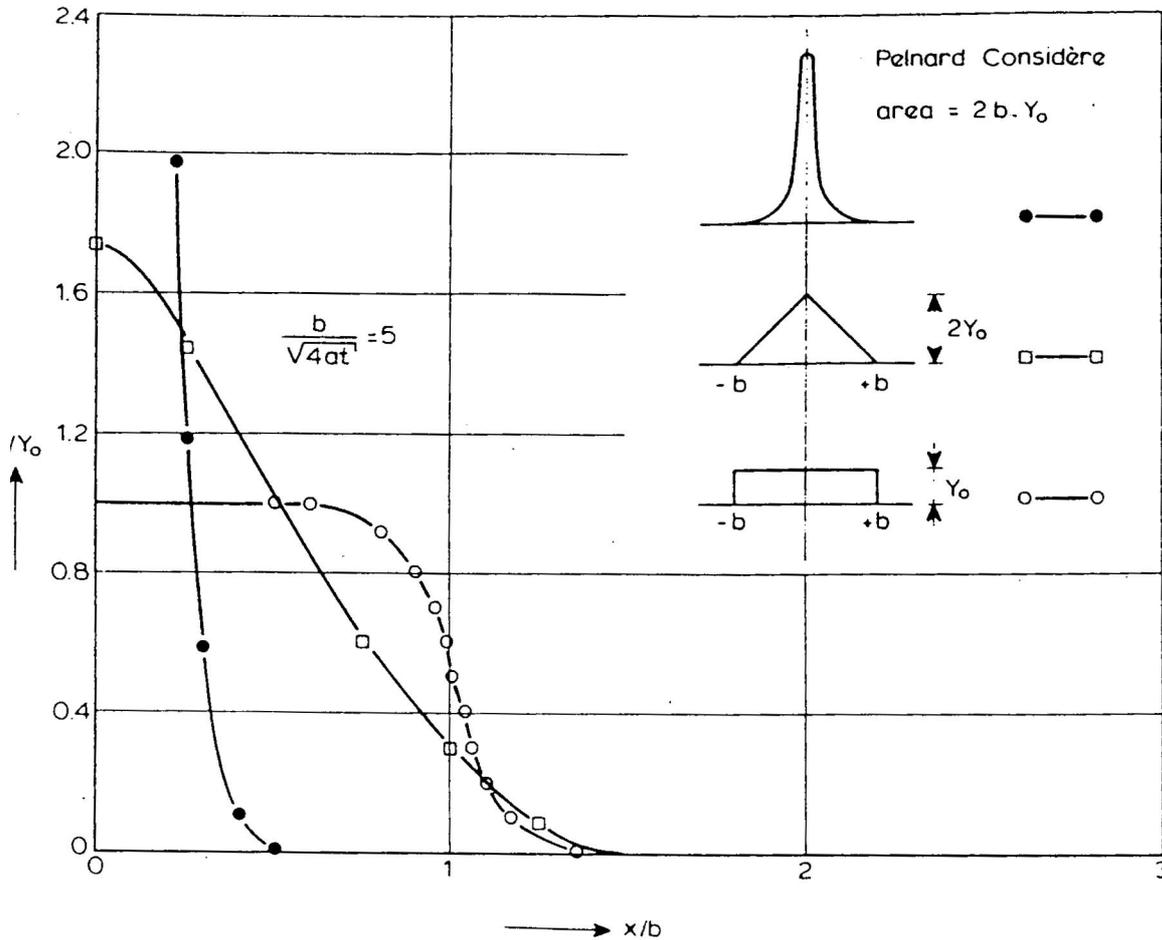


Figura 7. Soluciones analíticas para la deformación de un relleno.

numero de aplicaciones. Han sido desarrollados mediante una linealización de los modelos de 1 y 2 líneas, obteniéndose a partir de éstos la ecuación de difusión en el caso del modelo de 1 línea y, un sistema de dos ecuaciones que puede combinarse en una ecuación de difusión con variables combinadas en el caso del modelo de 2 líneas. El primero de los modelos es el debido a Pelnard-Considerere (1956), quien llega a la ecuación de difusión tras linealizar el modelo de 1 línea:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial^2 x}{\partial^2 y} \tag{2}$$

donde ϵ se puede interpretar como el coeficiente de difusión que representaría la escala de tiempo del cambio de la línea de orilla en función de una perturbación y , vendría dado ϵ por $\epsilon = 2 S_0/D$ donde S_0 sería la amplitud del transporte longitudinal, (sin considerar

Un problema de *valores iniciales* sería aquel en el que se estudia la deformación de la costa en el tiempo, partiendo de una configuración inicial. Su aplicabilidad es directa para el estudio de la deformación en planta de aportes de arena en las regeneraciones. Así, Pelnard-Considerere (1956) dio la solución analítica para un relleno con forma en planta dada por la función de Dirac, mientras que Walton y Chiu (1979) la dan para rellenos con forma rectangular y triangular (ver Figura 7).

Un problema de *condiciones* de contorno sería por ejemplo la evolución de una costa en las proximidades de la desembocadura de un río o en las inmediaciones de un espigón. Ambas soluciones fueron dadas también por Pelnard-Considerere (1959). Una revisión detallada acerca de las soluciones analíticas de la ecuación 2 puede verse en Larson *et al.* (1987), donde se presentan más de

25 soluciones con diferentes formas iniciales y para diferentes condiciones de contorno.

Modelos en perfil

Perfil de equilibrio: Se considera el perfil de equili-

de oleaje.

En el caso real, sobre un perfil de playa incidirá un oleaje irregular compuesto por numerosas componentes de distintas frecuencias y diferentes alturas, por lo que es lógico pensar que la definición dada para el perfil

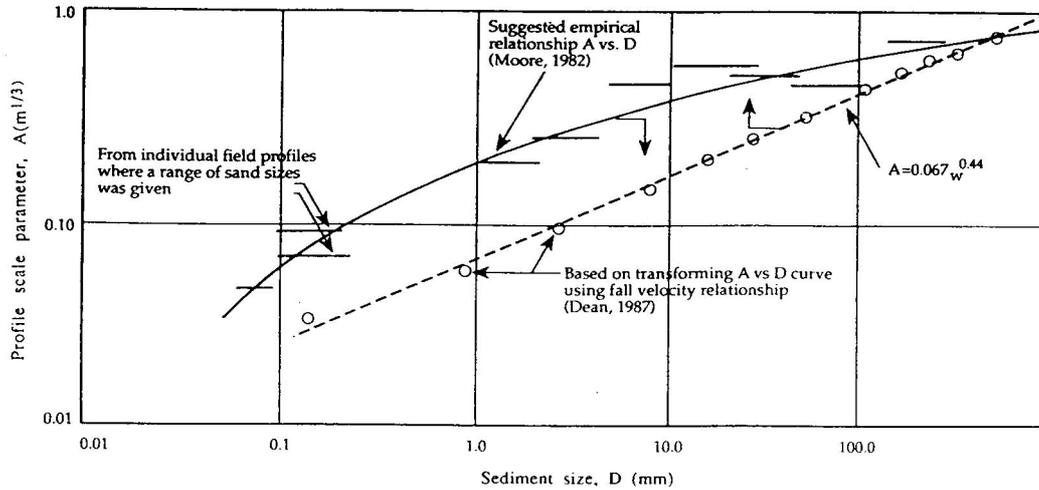


Figura 8. Variación del parámetro A con el tamaño de sedimento.

brio como aquel perfil de playa que es capaz de disipar la totalidad de la energía incidente, de tal manera que aunque el oleaje siga actuando sobre el, no experimentara ningún cambio en su morfología (definición

de equilibrio es difícilmente verificable en la realidad. Sin embargo, al igual que antes, se puede hacer una aproximación al problema mediante escalas.

Así, a corto plazo se podría hablar de los perfiles de erosión y acreción o disipativos y reflectivos, como ya se ha comentado anteriormente. En esencia, ambos perfiles corresponderían a una situación de equilibrio dinámico ante la incidencia de un oleaje de diferente contenido energético.

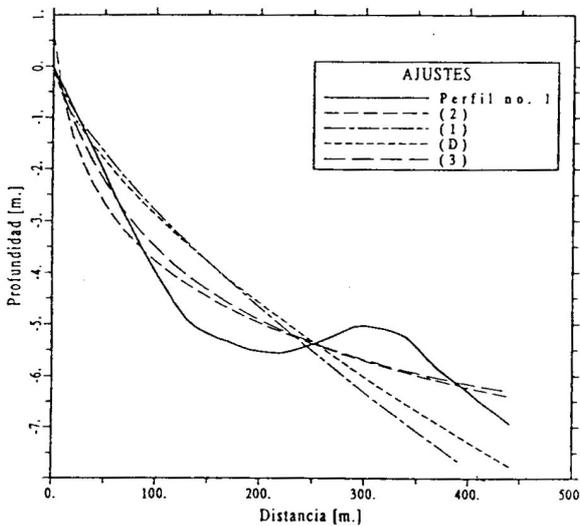


Figura 9. Ajuste de un perfil barrado a un perfil de equilibrio (LoPresti, 1994).

similar a la dada por Fenneman (1902!!). Por supuesto, esta definición parte de la idea de un equilibrio estático, y sólo sería posible conseguirse en el caso de un oleaje monocromático con una altura de ola constante actuando de forma indefinida sobre el perfil, tal como ocurriría en un ensayo realizado en un canal

A mas largo plazo, el perfil de equilibrio sería aquel que disipa la mayor parte de la energía del oleaje que actúa sobre la playa durante un año climático medio. Su forma sería la equivalente al perfil medio durante el año, sobre el que se producirían oscilaciones de diferente tipo (positivas en caso de acumulación de material y negativas en el caso de erosión), pero que de alguna manera se mantiene constante a largo plazo.

Bruun (1954) fue uno de los primeros en proponer un expresión genérica para el perfil de equilibrio a largo plazo, tras analizar diferentes perfiles de playa en la costa danesa y de California. En dicho estudio encontró que estos podían representarse a través de un perfil que seguía la relación:

$$y = Ax^m \tag{3}$$

siendo A y m dos parámetros a ajustar. Bruun encontró que el valor de m que mejor ajustaba los perfiles analizados era 2/3. Bruun aplicó este modelo para la zona del perfil entre aguas profundas y rotura, basándose en la hipótesis de que la forma del perfil es tal

que la tensión en el fondo ejercida por las olas es constante a lo largo de todo el.

Dean (1977) analizó una serie de perfiles tomados en la costa atlántica y del Golfo en los Estados Unidos, y a través de un ajuste mediante mínimos cuadrados llegó a la misma expresión que la obtenida por Bruun y con el mismo valor para el exponente m (ecuación 3). Sin embargo, y aun utilizando la misma expresión, Dean encuentra un razonamiento para la utilización de dicha expresión, mediante un desarrollo elegante, en el que se demuestra que dicho perfil se corresponde con aquel que produce una disipación uniforme por unidad de volumen de la energía del oleaje incidente en la zona de rotura, y donde el único parámetro libre de esta expresión es A , el cual se considera que varía solamente en función del tamaño de grano específico del perfil (Moore, 1982) (ver Figura 8). Si se acepta esta base teórica, la utilización del perfil de equilibrio sería sólo válida para la zona de rompientes, aunque generalmente se suele utilizar para un tramo mucho más grande del perfil. Una característica importante de este perfil es la imposibilidad de predecir la presencia de caracteres morfológicos submarinos, tales como barras sumergidas, por lo que su utilización para ajustar perfiles de equilibrio en costas barradas, puede producir valores sesgados en el caso de que se considere el tramo con barra en el ajuste (ver Figura 9). Por ello, a la hora de ajustar perfiles utilizando una expresión como la del perfil de Bruun/Dean, es aconsejable limitarse a la zona comprendida entre el surco más interno y la línea de orilla, en el caso de que la barra estuviese siempre presente, ya que pretender aplicar el método a un perfil con barra puede llevar a conclusiones erróneas en cuanto a su efectividad. Una excelente revisión acerca de este perfil de equilibrio y posibles variaciones y aplicaciones a casos prácticos puede verse en Dean (1991), donde se propone una modificación de la relación (x) para evitar que de en la línea de orilla un valor infinito de la pendiente de la playa.

Aunque generalmente se utiliza este perfil aceptando que el exponente de la expresión (x) es constante y con un valor de $2/3$, Boon y Green (1988) al analizar perfiles de playa en el Caribe, encontraron que el valor de m que mejor representaba sus datos era de $1/2$. Este menor valor fue asociado a que los perfiles analizados eran más reflectivos que los analizados por Dean debido a la composición del sedimento, y que por lo tanto, el valor del exponente debería cambiar en función de la tendencia del perfil desde disipativo a reflectivo.

Pilkey *et al.* (1993) cuestionan la utilización del perfil de Bruun/Dean de forma universal, ya que habría que tener en cuenta, según estos autores, diferentes variables oceanográficas y geológicas a fin de poder explicar los perfiles naturales de todo tipo de costas. Es por ello importante, resaltar la importancia de particularizar

el uso de estos perfiles para tramos de costas locales, o de características comunes (ver *e.g.* el análisis de Sierra *et al.*, 1994).

Al lado de esta expresión, han ido surgiendo diferentes variaciones y aproximaciones a fin de representar de forma más precisa los perfiles naturales. Así, por ejemplo, Larson (1991) presenta una variación para tener en cuenta la existencia de una variación en el tamaño del sedimento a través del perfil. Bodge (1992) utiliza para describir el perfil de equilibrio una expresión exponencial que depende de dos parámetros, concluyendo que su utilización da mejores resultados que el perfil de Bruun/Dean. Komar y McDougal (1994) utilizan también un perfil exponencial, aunque dependiente de un sólo parámetro. Recientemente, Inman *et al.* (1993) han presentado un método de ajuste de perfiles de equilibrio, en el que se dividen los perfiles en dos partes diferenciadas separadas por la zona de rotura. Ambas partes se ajustan mediante la expresión (x) aunque con un valor para el exponente $m = 0.4$.

Una de las aplicaciones más usuales en ingeniería de costas del perfil de equilibrio, es para el diseño del perfil de las regeneraciones de playa, asumiendo que el mismo representa la condición de equilibrio dinámico a largo plazo del relleno.

Perfil de erosión

Si la escala a la que se pretende analizar los perfiles de equilibrio está relacionada con los cambios episódicos, el perfil correspondería a un caso de erosión extrema, y será denominada de forma genérica como perfil de erosión. De forma general, este tipo de modelos predicen la recesión de la línea de orilla que se produciría bajo la acción de una tormenta, caracterizada hidrodinámicamente por un ascenso del nivel del mar - storm surge- y la presencia de un oleaje de gran capacidad energética.

Entre los modelos más conocidos se encuentran los debidos a Bruun (1962), Edelman (1970) y Dean (1982). Dichos modelos predicen el retroceso que sufre la línea de orilla bajo la acción de una tormenta en función de la elevación del *storm surge* y de la profundidad del oleaje en rotura. En esencia, el modelo de Bruun (1962) fue desarrollado para estimar la erosión que se produce en el perfil de playa debido a una ascenso del nivel del mar, aunque puede ser extrapolado al caso de la acción de un incremento del nivel del mar instantáneo como ocurriría en el caso de una tormenta. Dean y Maurmeyer (1983) compararon los tres métodos, encontrando que el modelo de Edelman predecía, de forma sistemática, retrocesos más grandes de la línea de orilla, mientras que los modelos de Bruun y Dean predecían retrocesos similares, salvo para incrementos muy altos del nivel del mar,

en los que el modelo de Dean predecía valores mayores.

Uno de los métodos más difundidos para estimar el efecto de una tormenta sobre el perfil de playa es el debido a Vellinga (1986), y conocido popularmente como el *perfil de Vellinga*. Dicho método fue desarrollado a

$$y = 5.72 \left(\frac{H_{os}}{7.6} \right) = 0.75 H_{os} \quad (6)$$

El perfil de erosión suele aplicarse en proyectos de regeneración de playas a fin de estimar el posible

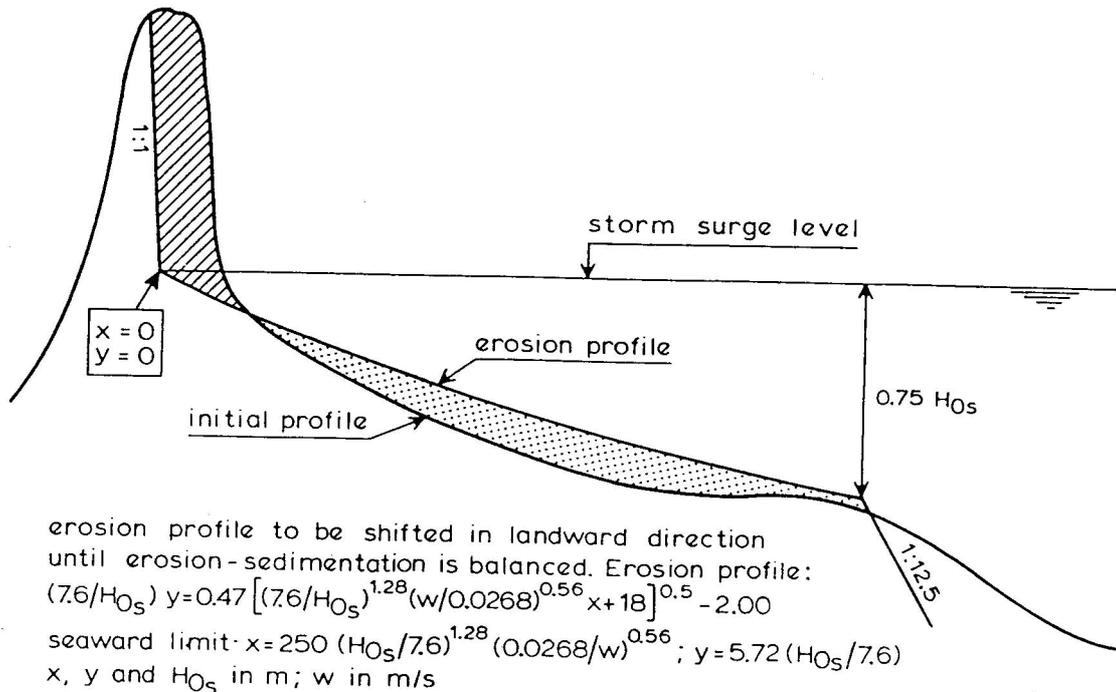


Figura 10. Perfil de erosión de Vellinga (Vellinga, 1986).

a partir de experimentos de laboratorio a pequeña y gran escala y a partir de datos de campo. Este perfil tiene en cuenta el efecto del ascenso del nivel del mar, la altura de ola incidente sobre el perfil y las características del sedimento que compone el perfil.

El modelo predice la forma del perfil de playa tras la acción de un temporal, la cual vendría dada por (ver Figura 10):

$$\frac{75}{H_{os}} y = 0.47 \left[\left(\frac{7.6}{H_{os}} \right)^{1.28} \left(\frac{w}{0.0268} \right)^{0.56} x + 18 \right]^{0.5} - 2 \quad (4)$$

donde el límite aguas adentro del perfil vendría dado en horizontal por:

$$x = 250 \left(\frac{H_{os}}{7.6} \right)^{1.28} \left(\frac{0.0268}{w} \right)^{0.56} \quad (5)$$

y en vertical por:

efecto que tendría la acción de tormentas sobre el perfil de relleno. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este modelo fue desarrollado en canales de oleaje, por lo que su aplicación a condiciones naturales viene limitada por (i) la incapacidad de prever efectos tridimensionales, y (ii) por la dificultad de definir los parámetros de entrada, ya que los perfiles y las características de la tormenta nunca son conocidos exactamente. Este último punto suele resolverse, caracterizando al temporal por unos valores asociados a un período de retomo dado.

Por último, hay que citar entre los modelos analíticos que estiman la respuesta del perfil ante la acción de una tormenta, el *método de convolución*, que se basa en la idea de que la respuesta de la playa ante la acción de agentes impulsores cuasi estacionarios (es decir, para unas condiciones hidráulicas determinadas, i.e. las características de la tormenta) puede considerarse exponencial en el tiempo (Kriebel y Dean, 1993). Este tipo de respuesta ha sido observada en ensayos de laboratorio y a partir de datos de campo por Dette y Uliczka (1987) y Sunamura (1983) entre

otros. Aunque el método parte de la idea de condiciones estacionarias, se ha comprobado su utilidad con condiciones hidráulicas variables (Kriebel y Dean, 1993).

CONCLUSIONES

De la breve exposición realizada sobre la evolución natural e inducida por el hombre en la franja playera, así como de los correspondientes modelos predictivos existentes, pueden extraerse múltiples conclusiones. Aquí se resumirán tres ideas que, aun dando una perspectiva sesgada de lo tratado en el artículo, resumen (a través de los procesos, los modelos y los proyectos), tres elementos enormemente importantes en la ingeniería de playas.

Desde el punto de vista de los *procesos actuantes*, el movimiento de agua y sedimento que tiene lugar en la franja costera es un sistema mecánico no lineal que puede presentar comportamiento caótico. Como es bien sabido, para este tipo de sistemas, la predictibilidad es muy limitada. Adicionalmente, es también bien conocido que las solicitaciones que actúan sobre la franja playera (viento, oleaje, etc.) son aleatorias, o lo que es lo mismo, desconocidas en el detalle y sólo predecibles (con un margen de incertidumbre) a grandes rasgos y por períodos de tiempo limitados. Consecuencia de todo ello es que la respuesta de la costa es desconocida en detalle (a veces es modelada considerando su dimensión fractal) y sólo predecible a ciertas escalas de tiempo y espacio.

Desde el punto de vista de los *modelos* disponibles, es importante resaltar que, por las consideraciones ya expuestas a lo largo del artículo, sólo pueden ser aproximaciones groseras a la realidad. Los modelos físicos a escala solamente proporcionan resultados cuantitativos cuando la escala es próxima a la real (para escalas reducidas no es posible reducir el tamaño del sedimento en la misma proporción que las dimensiones geométricas, pues el sedimento quedaría de un tamaño cuasi-molecular). Los modelos numéricos, por otro lado, exigen una simplificación de los procesos actuantes y, sólo son capaces de reproducir lo que ocurre, en unos cortos intervalos de tiempo y espacio (es decir, tal como se ha expuesto anteriormente, esta fuera de las posibilidades de la ciencia y tecnología actuales predecir la evolución de la franja costera a corto plazo suponiendo que las componentes de medio y largo plazo que están simultáneamente actuando en la naturaleza). Las medidas de campo, por último, son caras y limitadas, aunque cada vez más asequibles y precisas (debido a la introducción de técnicas como la teledetección, vehículos autónomos, etc.).

Desde el punto de vista de los *proyectos* de ingeniería es importante mencionar las incertidumbres asociadas a la ejecución y puesta en obra de los mismos. En

efecto, basta considerar, como ejemplo, la dificultad de ejecución de una obra en el medio marítimo y las variaciones importantes que se pueden producir respecto a lo especificado en el proyecto (como ilustración considérese que en las operaciones de alimentación artificial el volumen aportado puede diferir significativamente del especificado en el proyecto, debido a la dificultad de cuantificar el volumen de arena que efectivamente se deposita sobre la playa, ya que habitualmente se cuantifica el volumen en "cántara"). Asimismo, es importante mencionar que las obras no suelen "mantenerse" (no solo las rígidas, lo que sería un poco más aceptable, sino tampoco las flexibles, puesto que, por ejemplo, no se piensa en la "sostenibilidad" de las aportaciones artificiales a partir de 10-15 años desde el momento inicial).

Debido a todas estas incertidumbres que convergen en la ingeniería de playas, esta disciplina, aun actualmente, debe ser considerada como una simbiosis de arte y técnica. Pese a la utilización de herramientas sofisticadas como la teledetección o la simulación numérica, la ingeniería de playas sigue necesitando del *juicio experto* para suplir las simplificaciones de procesos no modelables o introducir el efecto de escalas de tiempo y espacio no consideradas en el planteamiento del problema.

La evolución futura de este *arte-técnica* pasará, probablemente, por una utilización más extendida de las medidas de campo y de ensayos de laboratorio a gran escala (es decir, próximas a la realidad) para avanzar la investigación. En efecto, estos dos medios continuarán siendo caros pero proporcionarán resultados muy valiosos para avanzar en el conocimiento de los procesos que ocurren en la franja costera. Los modelos numéricos se irán consolidando cada vez más (los modelos hidrodinámicos ya ofrecen un grado de fiabilidad aceptable mientras que los modelos morfodinámicos están aun en una fase preliminar de desarrollo) para la predicción de la evolución/impacto a nivel de trabajos de ingeniería comercial. Es en este sentido importante resaltar que el principal de los problemas de los modelos numéricos es su calibración/validación. En efecto, la obtención de resultados "impresionantes" (tridimensionales, a todo color, etc.) esta hoy al alcance de prácticamente cualquier usuario informático. Sin embargo, los modelos bien validados, robustos, y fáciles de usar siguen siendo aun escasos.

AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo ha sido desarrollado gracias a la colaboración del Programa de Clima Marítimo (MOP-TMA) a través del convenio Procesos *Hidrodinámicos en Zona de Rompientes*.

REFERENCIAS

- Battjes, J.A. (1974). Surf similarity. *Proc. of the 14th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 466480.
- Berenguer, J.M. y Enríquez, J. (1988). Design of pocket beaches. The Spanish case. *Proc. 21st Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1411-1425.
- Bodge, K. (1992). Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *J. of Coastal Research*, 8, 47-55.
- Boom, J.D. y Green, M.O. (1988). Caribbean beachface slopes and beach equilibrium profiles. *Proc. 21st Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1618-1630.
- Bruun, P. (1953). *Forms of equilibrium of coasts with littoral drift*. Technical Report 3, University of California, Engineering Research Laboratory, Berkeley.
- Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board, Technical Memo. 44
- Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *J. of Waterways and Harbours Division*, 88, WW1, 1 17-130.
- Carter, R.W.G. (1988). *Coastal Environments*. Academic Press, London, 617 pp.
- Carter, R.W.G. y Balsillie, J.H. (1983). A note on the amount of wave energy transmitted over nearshore sand bars. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 213-222.
- Crowell, M., Leatherman, S.P. y Buckley, M.K. (1991). Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *J. of Coastal Research*, 7, 3, 839-852.
- Dean, R.G. (1973). Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proc. of the Conf. on Engineering Dynamics in the surf zone*, 208-214.
- Dean, R.G. (1977). *Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts*. Dept. of Civil Eng., Ocean Eng. Technical Report 12, Newark, Univ. of Delaware.
- Dean, R.G. (1982). *Models for beach profile response*. Tech. Rep. 30, University of Delaware.
- Dean, R.G. (1991). Equilibrium beach profiles. Characteristics and applications. *J. of Coastal Research*, 7, 53-84.
- Dean, R.G. y Maurmeyer, E.M. (1983). Models for beach profile response. En: Komar, P.D. (ed.), *Handbook of Coastal Processes and Erosion*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 151-166.
- Detle, H.H. y Uliczka, K. (1987). Prototype investigation on time dependent dune recession and beach erosion. *Coastal Sediments' 87*, ASCE, 1430-144.
- De Vriend, H.J. (1991). Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour, part I: Physical processes. *J. of Hydraulic Research*, 29, 6, 727-740.
- Edelman, T. (1972). Dune erosion during storm conditions. *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1305-1311.
- Eliot, I. y Clarke, D. (1989). Temporal and spatial bias in the estimation of shoreline-rate-of-change statistics from beach survey information. *Coastal Management*, 17, 129-156.
- Fenneman, N.M. (1902). Development of the profile of equilibrium of the subaqueous shore terrace. *J. of Geology*, 10, 1-32.
- Fenster, M.S.; Dolan, R. y Elder, J.F. (1993). A new method for predicting shoreline positions from historical data. *J. of Coastal Research*, 9, 1, 147-171.
- Garau, C. (1979). Condicionantes de la estabilidad de playas. Análisis de la función polar de los salientes. II *Curso de Ingeniería Oceanográfica y Portuaria*, Santander.
- Guza, R.T. e Inman, D.L. (1975). Edge waves and beach cusps. *J. of Geophysical Research*, 80, 2997-3012.
- Hanson, H. y Kraus, N.C. (1989). *GENESIS: generalized model for beach profile change*. Tech. Rep. CERC-89-19.
- Hattori, M. y Kawamata, R. (1980). Onshore-offshore transport and beach profile change. *Proc. of the 17th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1175-1193.
- Horikawa, K. (1981). Coastal sediment processes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13, 9-32.
- Howd, P.A. y Birkemeier, W.A. (1987). *Beach and nearshore survey data: 1981-1984 CERC field research facility*. Tech. Rep. CERC-87-9.
- Hoyle, J.W. y King, G.T. (1958). The origin and stability of beaches. *Proc. 6th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 281-301.
- Hsu, J.R.C. y Evans, C. (1989). Parabolic bay shapes and applications. *Proc. Institucion of Civil Engineers*, 87, 557-570.
- Hsu, J.R.C.; Silvester, R. y Xia, Y.-M. (1989). Applications of headland control. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 115, 3, 299-310.

- Hsu, J.R.C.; Uda, T. y Silvester, R. (1993). Beaches downcoast of harbours in bays. *Coastal Engineering*, 19, 163-181.
- Illenber, W.K. y Rust, I.C. (1988). A sand budget for the Alexandria coastal dunefield, South Africa. *Sedimentology*, 35, 513-521.
- Inman, D.L.; Elwany, M.H.S. y Jenkins, S.A. (1993). Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *J. of Geophysical Research*, 98, C10, 18181-18199.
- Iwagaki, Y. y Noda, H. (1962). Laboratory studies of scale effects in two-dimensional beach processes. *Proc. of the 8th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 194-210.
- Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A. (1992). Simulación de cambios a corto plazo en la línea de costa. *Revista de Obras Públicas*, 3315, 41-51.
- Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A. (1993). Medium-term coastal response at the Ebro Delta, Spain. *Marine Geology*, 114, 105-118.
- Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A. (1993). Influencia de la pendiente en la evolución del perfil de playa. II *Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, Gijón, (en prensa).
- Jiménez, J.A.; Sánchez-Arcilla, A. y Stive, M.J.F. (1993). Discussion on Prediction of storm/normal beach profiles. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119, 4, 466-468.
- Jiménez, J.A.; Valdemoro, H.I. y Sánchez-Arcilla, A. (1994). Discussion on Analysis of bayed beaches in static equilibrium. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* (en prensa).
- Jiménez, J.A.; Valdemoro, H.I.; Sánchez-Arcilla, A. y Stive, M.J.F. (1993). Erosion and accretion of the Ebro Delta coast: a large scale reshaping process. *Large Scale Coastal Behaviour'93*, US Geological Survey, Open File Report 93-381, 88-91.
- Kajirna, R.; Shimizu, T.; Maruyama, K. y Saito, S. (1982). Experiments of beach profile change with a large wave flume. *Proc. 18th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 13.85-1404.
- Komar, P.D. y McDougal, W.G. (1994). The analysis of exponential beach profiles. *J. of Coastal Research*, 10, 1, 59-69.
- Kraus, N.C. (1988). Prediction models of shoreline change. En: Horikawa, K. (ed.), *Nearshore dynamics and costal processes*, University of Tokyo Press, Japan.
- Kriebel, D.L. y Dean, R.G. (1993). Convolution method for time-dependent beach-profile response. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119, 2, 202-26.
- Larson, M. (1988). *Quantification of beach profile change*. Report 1008, Dept. of Water Resources Engng., Lund University.
- Larson, M. (1991). Equilibrium profile of a beach with varying grain size. *Coastal Sediments' 91*, ASCE, 905-919.
- Larson, M.; Hanson, H. y Kraus, N.C. (1987). *Analytical solutions of the one-line model of shoreline change*. Technical Report CERC-87-15, Washington D.C.
- Leatherman, S.P. (1979). Migration of Assateague Island, Maryland, by inlet and overwash processes. *Geology*, 7, 10"107.
- Le Blond, P.H. (1972). On the formation of spiral beaches. *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1331-1345.
- Lippmann, T.C. y Holmann, R.A. (1990). The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *J. of Geophysical Research*, 95,11, 11575-11590.
- LoPresti, A. (1994). *Modelado del transporte longitudinal de sedimentos. Aplicación a la costa catalana*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Medina, R.; Losada, M.A. y Dalrymple, R.A. (1990). Análisis de perfiles de playa por medio de funciones ortogonales empíricas (método FOE). *Revista de Obras Públicas*, Junio de 1990, 9-17.
- Moore, B.D. (1982). *Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height*. Master Thesis, Dept. of Civil Engng., University of Delaware.
- Morton, R.A.; Leach, M.P.; Paine, J.G. y Cardoza, M.A. (1993). Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *J. of Coastal Research*, 9, 3, 702-720.
- Negro, V. (1990). La variabilidad de los perfiles de playa. Perfiles de verano e invierno. Análisis histórico (1ª parte). *Revista de Obras Publicas*, Marzo 1990, 23-29.
- Pelnard-Considere, R. (1956). Essai de théorie de l'évolution des formes de rivages en plages de sable et de galets. *IV Journées de l'Hydraulique*, Paris, Question III, Rapport 1, 289-298.
- Pilkey, O.H.; Young, R.S.; Riggs, S.R.; Smith, A.E.S.; Wu, H. y Pilkey, W.D. (1993). The concept of shoreface profile of equilibrium: a critical review. *J. of Coastal Research*, 9, 1, 255-278.
- Rector, R.L. (1954). *Laboratory study of equilibrium profiles of beaches*. Tech. Mem. 41, Beach Erosion Board, CERC.

- Sánchez-Arcilla, A. y Jiménez, J.A. (1990). A simple numerical model to predict coastal morphodynamics. *J. of Coastal Research*, Special Issue 9, 376-394.
- Sánchez-Arcilla, A. y Jiménez, J.A. (1994). Breaching in a wave-dominated barrier spit: the Trabucador Bar (NE Spanish coast). *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, (en prensa).
- Sánchez-Arcilla, A.; Stive, M.J.F.; Jiménez, J.A. y García, M.A. (1993). Impact of sea level rise in a Mediterranean delta: the Ebro Delta case. *Sea Level Changes and their Consequences for Hydrology and Water Management (Seachange'93)*, Noordwijkerhout, UNESCO, IHP-IV, IV 53-62.
- Sánchez-Arcilla, A.; Jiménez, J.A.; Stive, M.J.F.; Ibañez, C.; Prat, N. y Day, J.W.Jr. (1993). Impact of sea-level rise on the Ebro Delta coast: an approach. En: Ozhan, E.(ed.), *Medcoast'93*, 1103-1117.
- Saville, T. (1957). Scale effects in two dimensional beach studies. *Trans. 7th General Meeting of IAHR*, 1, A3-1 - A3-10.
- Short, AD. (1979). Three-dimensional beach-stage model. *J. of Geology*, 87, 553-571.
- Sierra, J.P.; LoPresti, A. y Sánchez-Arcilla, A. (1994). Analysis of the equilibrium beach profiles on the Catalán coast (Mediterranean Sea). *Bulletin PIANC*, 83/84, 160-168.
- Silvester, R. (1960). Stabilization of sedimentary coastlines. *Nature*, 188, 467.
- Silvester, R. (1970). Growth of crenulated shaped bays to equilibrium. *J. of Waterways and Harbours Division*, 96, WW2, 275-287.
- Silvester, R. y Hsu, J.R.C. (1991). New and old ideas in coastal sedimentation. *Reviews in Aquatic Sciences*, 4, 4, 375-410.
- Stive, M.J.F.; Roelvink, J.A. y DeVriend, H.J. (1990). Large-scale coastal evolution concept. *Proc. 22nd Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1962-1974.
- Suarez Bores, P. (1980). *Formas Costeras*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- Sunamura, T. (1983).
- Sunamura, T. y Horikawa, K. (1974). Two dimensional beach transformation due to waves. *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 920-938.
- Tan, S.-K. y Chiew, Y.-M. (1994). Analysis of bayed beaches in static equilibrium. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 120, 2, 145-153.
- Vellinga, P. (1986). *Beach and dune erosion during storm surges*. Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, (también Delft Hydraulics Laboratory, Comm. No. 372).
- Walton, T.L. y Chiu, T.Y. (1979). A review of analytical techniques to solve the sand transport equation and some simplified techniques. *Coastal Structures'79*, ASCE, 809-837.
- Wilkinson, B.H. y McGowen, J.H. (1977). Geologic approaches to the determination of long-term coastal recession rates, Matagorda peninsula, Texas. *Environmental Geology*, 1, 359-365.
- Winant, C.D.; Inman, D.L y Nordstrom, C.E. (1975). Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *J. of Geophysical Research*, 80, 15, 1979-1986.
- Wright, L.D. y Short, A.D. (1983). Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia En: Komar, P.D.(ed.), *Handbook of Coastal Processes and Erosion*, Boca Raton, CRC Press, 35-64.
- Wright, L.D. y Short, A.D. (1984). Morphodynamics variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
- Wright, L.D.; Chappel, J.; Thom, B.G.; Bradshaw, M.P. y Cowell, P. (1979). Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia *Marine Geology*, 32, 105-140.
- Wright, L.D.; May, S.K.; Short, A.D. y Green, M.O. (1984). Beach and surf zone equilibria and response times. *Proc. 19th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 2150-2164.
- Wright, L.D. (1987). Shelf-surfzone coupling: diabathic shoreface transport. *Coastal Sediments'87*, ASCE, 25-40.
- Yasso, W.E. (1965). Plan geometry of headland bay beaches. *J. of Geology*, 73, 702-714.