

MODELIZACION DEL COMPORTAMIENTO MORFODINAMICO DE LAS PLAYAS MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA PROFUNDIDAD DE REMOVILIZACION

G. Anfuso *, F. J. Gracia *, J. A. Martínez *, L. del Río *, J. Andrés *, F. Sánchez * y F. López-Aguayo *

RESUMEN

El estudio de la profundidad de removilización durante un ciclo mareal es importante para conocer la morfodinámica de las playas. En el presente estudio se han considerado cuatro playas mesomareales del litoral de la provincia de Cádiz (SO de España), utilizando varillas y testigos insertados en la zona intermareal. La morfología de las playas estudiadas es muy variada, existiendo playas reflectivas, disipativas con barra y disipativas en sentido estricto. No obstante, las condiciones energéticas de la costa son bastante homogéneas y se mantienen relativamente constantes a lo largo de su extensión. En este trabajo se han comparado los valores de removilización registrados con los parámetros de altura de ola, pendiente de la playa y distribución del tamaño de grano. Como conclusión, se ha obtenido que el tipo de rompiente es el factor que mejor explica la variación espacial de la profundidad de removilización, así como la respuesta diferencial de las playas ante condiciones energéticas inicialmente similares. En cada caso la situación morfodinámica controla la distribución y la intensidad relativa de los procesos de oleaje que actúan en el perfil de la playa y, por lo tanto, el diferente valor de la profundidad de removilización. El estudio morfodinámico de una playa permite así predecir su respuesta morfológica bajo condiciones de oleaje variables.

Palabras clave: *playas, procesos litorales, morfodinámica, rompiente.*

ABSTRACT

This paper concerns with a description of the variations in the disturbance depth across four open mesotidal beaches in the Cadiz littoral (SW Spain), along single tidal cycles, using rods and cores of marked beach sands inserted in the foreshore. The studied beaches show a quite wide range of morphologies, from reflective and barred dissipative to pure dissipative ones. Nevertheless, the energetic conditions of the coast remain more or less constant along its length. In this work the recorded disturbance depths have been compared with parameters like wave height, beach gradient and grain size distribution. As a conclusion, it has been obtained that the morphodynamic regime is the characteristic that better explains the spatial variation of the disturbance depth, as well as the different response of the beaches under broadly similar energetic conditions. In each case the morphodynamic situation controls the distribution and relative intensity of wave processes acting across the beach profile and, hence, the different rate of disturbance depth. The morphodynamic study of a beach permits an initial prediction of its morphological response under variable wave conditions.

Key words: *beaches, coastal processes, morphodynamics, breaker type.*

Introducción

En las últimas décadas la necesidad de proteger asentamientos humanos amenazados por la erosión costera, así como el incremento en la utilización de

las playas con fines recreativos, han llevado a un mayor interés por el conocimiento de los procesos que actúan en la dinámica litoral. Un seguimiento de los cambios morfológicos en playas naturales a diferentes escalas temporales (diario, mensual,

* Grupo de Geología Litoral y Marina. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real (Cádiz), España.

anual) es fundamental para el diseño de playas artificiales y para el dimensionamiento de estructuras costeras (Fucella y Dolan, 1996).

La profundidad de removilización puede ser considerada como el espesor de la lámina de arena superficial afectada por los agentes energéticos que actúan sobre el fondo: el oleaje y las corrientes, tanto en la zona de rompiente como en las de traslación («surf») y derrame («swash»). Conocer el espesor de este «río de arena» es de gran interés para calcular el transporte sedimentario longitudinal (Komar e Inman, 1970; Inman *et al.*, 1980; Kraus, 1985; Sunamura y Kraus, 1985) y el flujo sedimentario asociado a los ciclos de marea (King, 1951; Otvos, 1965 y Williams, 1971) y a los temporales (Nicholls y Orlando, 1993).

Algunos autores, como Kraus *et al.* (1982), Jackson y Nordstrom (1993) y Sherman *et al.* (1994), diferencian entre la profundidad de mezcla («mixing depth») y la profundidad de removilización («disturbance depth»): la primera se mide en escala de horas y no está afectada por los cambios morfológicos debidos a variaciones de oleaje, marea y corrientes, o a la migración de formas del fondo; la segunda se refiere a períodos más largos (ciclos mareales, temporales, etc.).

En este trabajo se estudian las variaciones en la profundidad de removilización durante un ciclo mareal en cuatro playas mesomareales expuestas de la costa suratlántica española. Sus características de playas artificiales con perfil intermedio-reflectivo a playas disipativas. Se sitúan a lo largo de una costa rectilínea en la que las características geomorfológicas y las condiciones energéticas son constantes, lo cual permite relacionar la profundidad de removilización con otros factores más específicos como la altura y el tipo de rompiente del oleaje, o la granulometría y pendiente intermareal de las playas. El presente estudio se ha centrado en la porción intermareal de las playas, debido a la facilidad de su estudio y por ser la zona en la que los principales procesos dinámicos ligados al oleaje («surf», rompiente, derrame, etc.) actúan durante más tiempo (Masselink y Short, 1993). No se han considerado, por tanto, las variaciones en los tramos sublitorales de las playas («shoreface»).

Antecedentes y estado de la cuestión

Existen pocos estudios relativos a la profundidad de mezcla, removilización y sus cambios en función del oleaje. Kraus *et al.* (1982), Jackson y Nordstrom (1993), Sherman *et al.* (1994), Ciavola *et al.* (1997) y Ferreira *et al.* (1998) describieron la variación espacial y temporal de la profundidad de mezcla en

playas micromareales de Japón, playas micro y mesomareales de la costa Este de Estados Unidos y playas reflectivas mesomareales de Portugal. Estos autores utilizaron arena natural de la playa, que una vez coloreada con tinte fluorescente se vertía en la zona intermareal. Cuando el sistema alcanzaba el equilibrio, la distribución horizontal y vertical de los trazadores (la profundidad de mezcla) se medía a partir de un elevado número de muestras o testigos extraídos de la playa.

Sunamura y Kraus (1985) desarrollaron un modelo basado en las variaciones de la fuerza de rozamiento de los granos, obteniendo una relación teórica entre la profundidad de mezcla (Z) y la altura de la ola en rompiente (H_b): $Z = 0,027 H_b$. King (1951), Otvos (1965), Komar e Inman (1970), Williams (1971) y Jackson y Nordstrom (1993) midieron la profundidad de removilización durante un ciclo mareal en playas micro y mesomareales.

En general, el método más utilizado es insertar recipientes o tubos con arena marcada en la zona intermareal, haciendo coincidir su parte superior con la superficie de la playa, que luego se retiran. También se han utilizado varillas de aluminio constituidas por varios segmentos que se separan, registrando así la máxima erosión (Nicholls y Orlando, 1993), así como varillas con un anillo que se mueve libremente (Greenwood y Hale, 1980). Todos estos trabajos concluían que la profundidad de removilización se relaciona con la altura de ola y con la pendiente y granulometría de la playa.

King (1951) obtuvo una correlación lineal empírica entre la altura de ola en rompiente (H_b) y la profundidad de removilización (R): $R = 4\% H_b$, en playas de arena fina con pendiente muy suave ($\tan\beta < 0,02$). Según este autor, la profundidad de removilización muestra valores parecidos en toda la playa, tanto en la zona de «swash-backwash» como en la rompiente; asimismo, observó cómo las playas de arena gruesa se ven más afectadas por el oleaje que las de arena fina.

Por otro lado, Otvos (1965) y Williams (1971) estudiaron las láminas de arena depositadas durante un ciclo mareal en playas con mayor pendiente. En contraste con lo observado por King (1951), estos autores afirman que la máxima profundidad de removilización está siempre relacionada con la posición de la rompiente, variando entre el 20 y el 40 % de la altura de ola en rompiente.

Finalmente, Hughes y Cowell (1987), Nordstrom y Jackson (1990) y Jackson y Nordstrom (1993) estudiaron los cambios morfológicos de playas reflectivas, obteniendo valores parecidos ($18\% H_b$) a los de Otvos (1965).

Todos estos estudios previos muestran que, aun- que parece existir una relación nítida entre la pro-

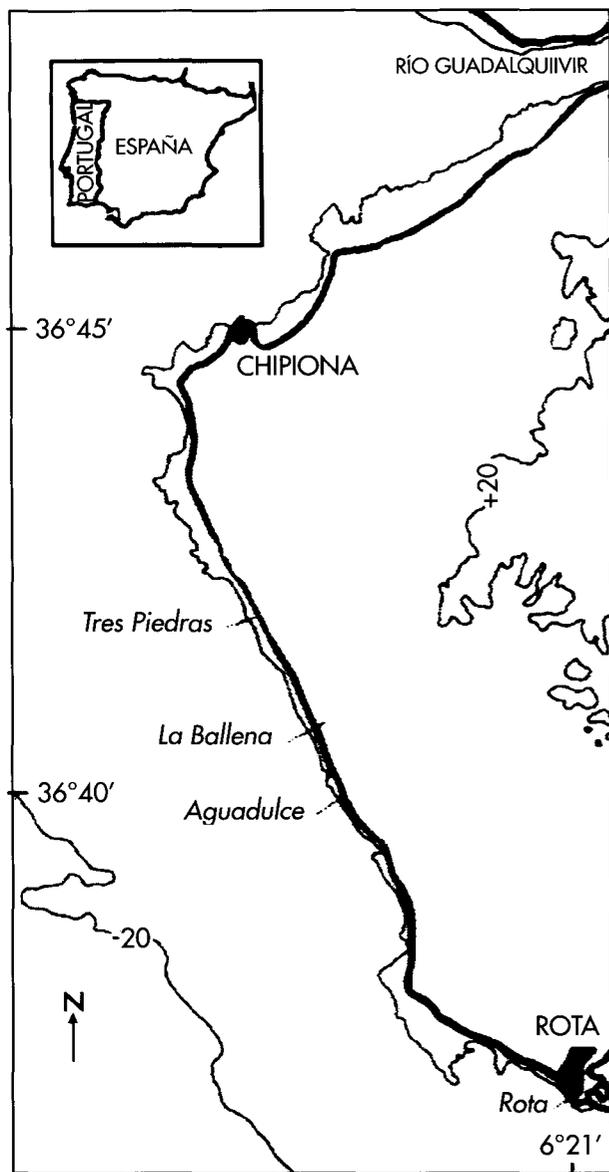


Fig. 1.—Localización del área de estudio.
Location map.

fundidad de removilización y la altura de ola en rompiente, esta relación no es constante ni aplicable a cualquier tipo de playa. La inmensa mayoría de los trabajos previos se han centrado siempre en playas pertenecientes a un único tipo morfodinámico, con pendientes intermareales más o menos constantes. La comparación de los resultados obtenidos por los diversos autores en playas de morfología diferente puede inducir a error. Por otro lado, no es conveniente contrastar resultados obtenidos mediante métodos que a veces no son comparables. Por ello, en este trabajo se plantea la aplicación de la misma

metodología a playas pertenecientes a tipos morfodinámicos diferentes. Por otro lado, las playas estudiadas están sometidas a condiciones energéticas similares, con lo que se reducen las incertidumbres derivadas de posibles variaciones energéticas longitudinales. Se pretende con ello obtener un patrón general de comportamiento a partir de la relación empírica entre profundidad de removilización, altura de ola en rompiente y pendiente intermareal de las playas, que pueda ser aplicable a cualquier ámbito costero.

Area de estudio

El litoral investigado está situado al Norte de la Bahía de Cádiz, entre Chipiona y Rota (fig. 1) e incluye 14 km de una costa orientada al SO, con playas de arena cuarzosa. Las cuatro playas estudiadas son mesomareales, con un rango mareal medio de 3,22 m en mareas vivas y de 1,11 m en mareas muertas (Instituto Hidrográfico de la Marina, 1996-1997).

Los vientos dominantes (Muñoz y Sánchez, 1994) soplan del ESE (con un 19,6 % de aparición anual y 27,8 m/s de velocidad media anual) y del ONO (12,8 % de aparición y 19,3 m/s de velocidad media anual). Estos últimos, debido a su asociación a los frentes atlánticos y a la orientación de la costa, adquieren una mayor importancia en la generación de oleaje incidente en las playas de estudio.

La energía del oleaje incidente puede considerarse como moderada-baja: la altura media de las olas de mar de viento y de mar de fondo es de 1 m, y la altura significativa durante los temporales es de 2 m, con un período asociado de 7 seg (Reyes, 1997). La dirección de aproximación del oleaje, tanto en el caso de temporales como durante el buen tiempo, generalmente es la Oeste, con un 45 % de aparición anual (Muñoz, 1996).

Las características de las playas estudiadas se presentan en la tabla I. Los principales rasgos morfológicos de todas ellas son los siguientes:

Playa de Rota. Es una playa urbana, con un paseo marítimo en su parte superior. Con el fin de reponer la arena tras los temporales de invierno, en septiembre de 1996 fue regenerada y se construyó un espigón en su extremo meridional. En noviembre de 1996, la playa presentaba un perfil artificial, con una pendiente abrupta uniforme. En marzo de 1997, la parte baja de la playa mostraba una pendiente más suave ($\tan\beta = 0,02$) y un tamaño medio de grano de 0,23 mm. La playa puede ser considerada como intermedia-reflectiva, al menos en su parte media y alta. No obstante, el valor de pendiente que

Tabla I.—Características de las playas estudiadas y de las campañas de campo.

N.º de campaña Fecha	Playa	Anchura del intermareal (m)	Anchura de la playa seca (m)	Pendiente (tan β)	Tamaño medio de grano (mm) (phi)		Rango de marea (m)	N. transectos/ espaciado (m)	N. de varillas y testigos utilizados
1 9/11/96	Rota	80	30	0,06	0,38	1,39	2,32	5/30	15
2 8/03/97	Rota	80	30	0,06	0,31	1,65	3,04	5/30	15
3 3/07/97	La Ballena	120	Estrecha (< 5)	0,03	0,24	2,07	2,61	2/20	21
4 1/10/97	Tres Piedras	120	Estrecha y transformada	0,02	0,20	2,41	2,28	6/20	26
5 2/10/97	Tres Piedras	120	Estrecha y transformada	0,02	0,20	2,41	2,37	6/20	26
6 30/11/97	Tres Piedras	120	Estrecha y transformada	0,02	0,20	2,41	2,46	2/20	12
7 30/11/97	Aguadulce	100	25	0,05	0,27	1,91	2,46	2/25	14

aparece en la tabla I corresponde a la media de toda la playa en su conjunto.

Playa de la Ballena. Es una playa disipativa que tiene detrás un acantilado de 4 a 6 m de altura, desarrollado sobre arcillas pliocuaternarias (Baena *et al.*, 1987; Roldán *et al.*, 1988). En el momento de la campaña existía un sistema de barra y surco en la parte media de la zona intermareal; la barra tenía 30 m de largo y 40 cm de alto. Hacia la parte alta de la playa el tamaño de grano aumentaba de 0,22 a 0,28 mm.

Playa de Tres Piedras. Se trata de una playa disipativa en la que el originario cordón dunar de la zona supralitoral ha sido transformado por la construcción de viviendas, que en la actualidad están protegidas por una escollera.

Playa de Aguadulce. Esta playa muestra una berma abrupta ($\tan\beta = 0,06$), compuesta de arena media (0,30 mm), y una zona intermareal llana ($\tan\beta = 0,03$) con arena fina (0,24 mm). Al igual que en La Ballena, la playa termina en un acantilado labrado sobre arcillas.

Los sedimentos de todas las playas muestran una selección constante de 0,7 (arena moderadamente bien clasificada), con excepción de la playa de Rota ($\sigma = 0,95$).

Metodología

El estudio de la profundidad de removilización de las playas se hizo mediante siete campañas de

seguimiento, entre noviembre de 1996 y noviembre de 1997, de un día de duración.

Características oceanográficas

Durante las campañas se realizó un seguimiento de los parámetros de oleaje y de las corrientes. La altura de ola en rompiente se midió repetidamente con la ayuda de un jalón, mientras que el período de las olas en la zona de rotura se determinó contando el número de olas que pasaban por un punto fijo durante intervalos de dos minutos (Davis, 1977). El ángulo de aproximación de los frentes de oleaje a la costa se calculó aplicando la metodología del «lapse-time» desarrollada por Chandramohan *et al.* (1994). En cuanto a las corrientes litorales, se estimaron con un flotador en la zona de traslación («surf zone»).

Características morfodinámicas

El seguimiento morfológico de la playa se llevó a cabo con un teodolito electrónico que permitió levantar varios transectos topográficos normales a la línea de costa, hasta la profundidad correspondiente a la bajamar viva equinoccial. Asimismo, se tomaron muestras de sedimentos que se trataron en laboratorio, determinándose su granulometría según la metodología de Folk y Ward (1957).

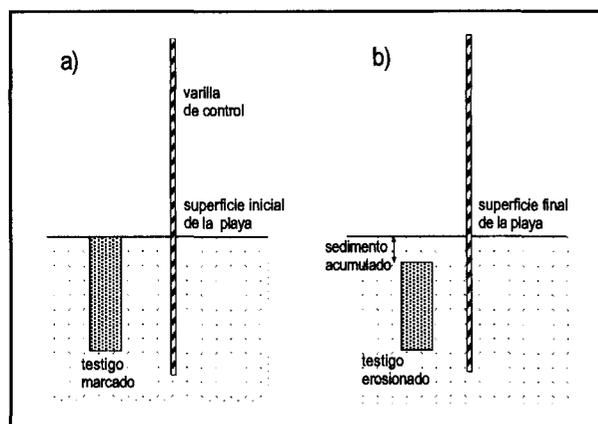


Fig. 2.—Esquema de instalación del testigo de arena marcada y de la varilla en la playa. a) Situación inicial. b) Situación después del ciclo mareal.

Sketch of the rod and core inserted into the beach face. a) Initial situation. b) Situation after the tidal cycle.

Finalmente, para determinar la profundidad de removilización y los cambios topográficos en diferentes puntos de la playa, se insertaron durante la bajamar de la mañana en la zona intermareal testigos de arena marcada y varillas metálicas (fig. 2a). Dicha arena se había tomado previamente en la misma playa, para ser posteriormente lavada y coloreada con un tinte oscuro de manera que contrastara apreciablemente con la arena natural. Para insertar la arena marcada en las playas, hasta enrasar con la superficie, se utilizaron tubos de PVC de 5 cm de diámetro y 10-20 cm de longitud. Las varillas empleadas tenían un diámetro de 5 mm y una longitud de 40-70 cm.

Las varillas y los testigos se colocaron juntos a la altura de los niveles bajo, medio y alto del mar y en las zonas con mayores cambios morfológicos, y se situaron en cada perfil con el teodolito. Los cambios microtopográficos experimentados por la playa se midieron repetidamente a lo largo de la experiencia, mediante una regla sobre las varillas; durante la pleamar las medidas fueron realizadas por buceadores. Los testigos permitieron registrar la máxima profundidad de erosión respecto a la superficie inicial, mientras que la profundidad de removilización se medía a partir del espesor de arena natural depositada encima del testigo parcialmente erosionado (fig. 2b).

De acuerdo con Williams (1971), se tomaron solamente los datos de los puntos que no sufrieron cambios morfológicos significativos, es decir, en los que el balance sedimentario tras el ciclo mareal era prácticamente cero. En total se eliminaron los datos de 19 de los 129 testigos y varillas utilizados (menos del 15 % del total), debido, entre otras cau-

sas, a dificultades en la lectura ligadas a inconsistencia de la arena por su alto contenido en agua («seepage»), pérdida de material, etc.

Resultados

Los parámetros del oleaje y los valores de profundidad de removilización registrados en los testigos se incluyen en la tabla II. A excepción del experimento en la playa de La Ballena, todas las experiencias de campo se llevaron a cabo bajo condiciones de mar de fondo, con ángulos de aproximación del oleaje a las playas pequeños, generalmente inferiores a los 15°, y por tanto con corrientes litorales de escasa magnitud. La campaña en la playa de La Ballena se realizó bajo condiciones de mar de viento y olas de período corto, con una fuerte corriente longitudinal generada por el viento. Las playas de mayor pendiente presentaban rompientes en voluta («plunging»), mientras que en las playas de pendiente suave la rompiente era en derrame («spilling»). Numerosos trabajos previos (Miller, 1976; Kana, 1978; Levoy *et al.*, 1994, entre otros) han establecido esta misma relación entre pendiente de la playa y tipo de rompiente.

La variación de la profundidad de removilización media en función de la altura de ola significativa en rompiente (H_b) aparece en la figura 3. A pesar de que existe una marcada dispersión en los valores medidos, cabe resaltar determinadas tendencias. Así, se observan dos grupos principales: los resultados obtenidos en la playa de Tres Piedras (n.ºs 4, 5 y 6) y los de la playa de Rota (n.ºs 1 y 2). Estas tendencias indican que, en general, en las playas uniformes y disipativas se obtienen valores bajos de removilización, con una pequeña desviación típica, mientras que en las playas con mayor pendiente los valores son más altos y con mayor desviación.

Los valores registrados en las playas de La Ballena y Aguadulce (n.ºs 3 y 7) son intermedios. En Aguadulce se debe, probablemente, a los numerosos cambios secundarios existentes en la pendiente de la playa. En La Ballena, la removilización relativamente alta puede relacionarse también con el período corto del régimen de oleaje de mar de viento que actuó durante la campaña, siempre más energético y erosivo que el régimen de mar de fondo.

La figura 4 muestra las profundidades de removilización medias registradas a lo largo de las playas estudiadas en las siete campañas. Durante el seguimiento se realizaron diversas observaciones sobre procesos de oleaje y distribución zonal de la profundidad de removilización, que a continuación se detallan:

Tabla II.—Características del oleaje y valores de removilización observados.

N.º campaña Fecha Playa	H _b (cm)	T (seg.)	Tipo de rompiente observada	Parámetro de escala de rompiente	Índice de similaridad de surf	Angulo de aproximación del oleaje (°)	Corriente longitudinal (cm/s)	Profundidad media de removilización (cm)
1 9/11/96 Rota	52	10	voluta	2,90	1,04	7	8	8,5
2 8/03/97 Rota	58	11	voluta	2,68	1,08	15	25	7,8
3 3/07/97 La Ballena	35	4,5	derrame	38,67	0,28	2	45	4,4
4 1/10/97 Tres Piedras	70	10	derrame- voluta	35,18	0,29	5,5	20	3
5 2/10/97 Tres Piedras	45	10	derrame	22,61	0,37	5,5	10	1,8
6 30/11/97 Tres Piedras	80	12	derrame- voluta	27,96	0,34	3	2	4
7 30/11/97 Aguadulce	90	12	derrame- voluta	5,03	0,79	3	2	6

Playa de Rota (fig. 4 a y b). En la experiencia del 8/3/97 se observó un cambio en el tipo de rotura del oleaje durante el ciclo mareal: rompientes en derrame en la zona de somerización durante la bajamar y rompientes en voluta con procesos de «swash» en la parte media y alta de la playa durante la pleamar. En la parte inferior de la playa se midieron valores bajos de profundidad de removilización; esta zona presentaba pendiente suave, con arena fina y compactada, así como condiciones de baja energía ligada a los procesos de somerización del oleaje. En la parte superior de la playa se registraron valores más altos de removilización. La campaña de marzo tuvo lugar después de la realización de obras artificiales de redistribución de arena. Como consecuencia de ello, la zona superior de la playa mostraba una mayor pendiente, la arena estaba menos compactada y pudo observarse un refluo («backwash», en el sentido propuesto por Williams, 1971) importante, que dio lugar a una mayor erosión.

Playa de La Ballena (fig. 4 c). Como en el caso anterior, los procesos de somerización con oleaje en derrame dominaban en la zona intermareal baja, mientras que los procesos de «swash» con rompientes en voluta aparecían cuando las olas alcan-

zaban el lado hacia el mar de la barra, más abrupto; finalmente, se observaron rompientes en derrame en la parte superior de la cresta de la barra. No se produjeron cambios significativos en la topografía de la playa en el lado hacia el mar de la barra, mientras que se registraron valores bajos de removilización en la cresta y en el surco, donde la pendiente era más suave. Dado que los cambios morfológicos en el lado hacia tierra de la barra fueron importantes, las medidas obtenidas en esta zona fueron desechadas y no se incluyeron en el cálculo de la media de la profundidad de removilización para esta playa. Se observó que la mayor profundidad de removilización (6 cm) se relacionaba con la mayor pendiente de la playa, con el menor grado de compactación de la arena y con las rompientes en voluta, especialmente en el lado de sotavento de la barra.

Playa de Tres Piedras (fig. 4 d, e y f). En este caso existía una escollera que condicionaba el depósito de arena en la parte superior de la playa, dando lugar a una mayor pendiente y a una mayor intensidad de los procesos de flujo-reflujo («swash-backwash»). Así, la zona de elevada pendiente artificial registró la máxima removilización. En la parte infe-

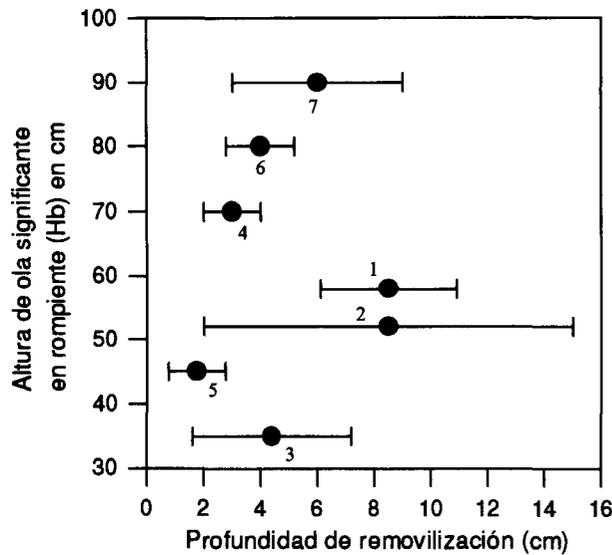


Fig. 3.—Variación de la profundidad de removilización con respecto a la altura de ola en rompiente. Los números indican las campañas de campo (ver tabla I) y las líneas horizontales la desviación estándar.
Rate of variation of the recorded disturbance depth related to breaking wave height for the studied beaches. Numbers refer to field assessments (see table I). Horizontal lines are proportional to standard deviation.

rior, más tendida, se observaron procesos de somerización con rompientes en derrame y una menor removilización.

Playa de Aguadulce (fig. 4 g). Tiene un comportamiento intermedio entre las playas de Rota y Tres Piedras, con los valores más altos de removilización en la parte baja de la zona intermareal, por encima del nivel de la bajamar. La falta de información en la parte superior del intermareal se debe a la dificultad en la lectura de los valores de removilización, a causa de la elevada escorrentía de agua («seepage») durante la bajada de la marea. No obstante, cabría esperar un valor de removilización medio-alto.

Discusión

Como era de esperar, las variaciones observadas de las profundidades de removilización muestran una clara dependencia de las variables energéticas y morfosedimentarias y confirman el papel de algunos factores específicos que influyen en el cambio morfológico de las playas a lo largo de un ciclo mareal: altura y tipo de rompiente, tamaño de grano y pendiente de la playa. La importancia relativa de estos factores se analiza a continuación.

Profundidad de removilización y procesos de rotura de las olas

En este estudio se ha observado que las rompientes en voluta producen mayor erosión que las rompientes en derrame, de acuerdo con los resultados de autores como Van Rijn (1989) o Beach y Stenberg (1996), y puede estar relacionado con el menor tamaño de los vórtices generados por las rompientes en derrame frente a los generados por las rompientes en voluta. De acuerdo con Miller (1976) y Tabora *et al.* (1998), las olas en voluta desarrollan un chorro que es impulsado hacia el seno de la ola precedente y que llega a menudo hasta los sedimentos del fondo, removiéndolos hasta una gran profundidad de mezcla, lo cual da lugar a grandes concentraciones de sedimento en suspensión.

La posición de la línea de rotura también influye directamente en la magnitud de la removilización. En la playa de Rota, los datos recogidos en diferentes momentos de la subida de la marea mostraron que la máxima erosión en cada varilla siempre tuvo lugar mientras las olas rompían sobre ella, mientras que hacia tierra o hacia mar de este punto se producía menos erosión o incluso sedimentación. Por este mecanismo, durante la subida de la marea, las medidas en las varillas registran inicialmente una agradación relacionada con procesos de flujo y reflujos («swash» y «backwash»), seguida de una erosión máxima relacionada con procesos de rompiente, y finalmente una menor erosión o incluso sedimentación relacionada con procesos de somerización del oleaje (peraltado del oleaje, rompientes progresivas, etc.). Posteriormente, durante la bajada de la marea, el orden de los procesos se invierte. Esta sucesión de procesos queda registrada en puntos donde domina significativamente la acreción, en forma de una compleja secuencia de capas alternas de arena gruesa y fina. Durante la rotura se deposita una pequeña lámina de arena gruesa tras la erosión inicial, y a continuación, cuando la línea de rompiente se mueve hacia tierra o hacia mar, se deposita sobre ella una delgada capa de arena fina. Otvos (1965) y Williams (1971) describieron secuencias sedimentarias similares, que son características de playas abruptas con rompientes en voluta, como la playa de Rota.

En playas con pendiente más suave, como Tres Piedras y Aguadulce, los procesos de somerización con rompientes en derrame predominan en la zona de «surf» durante la subida de la marea. En estos casos la profundidad de removilización media no es tan elevada, y se registran valores parecidos a lo largo de toda la playa (tal y como King, 1951, observó en playas disipativas); parece existir una tendencia a mayores valores de removilización en la

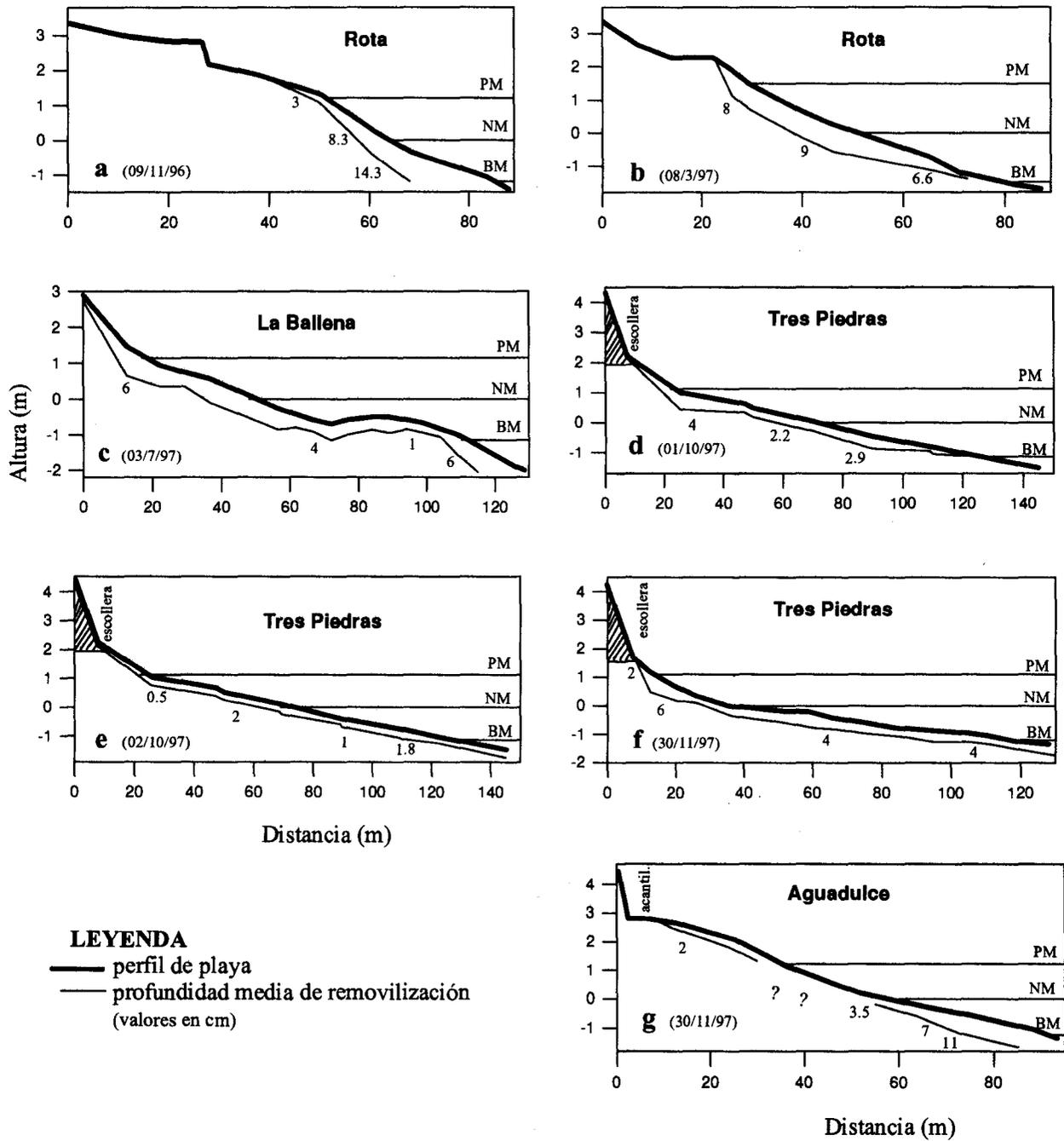


Fig. 4.—Perfiles de playas durante las campañas de campo, con los valores medios de removilización en diferentes partes de la zona intermareal.
Beach profiles for every field assessment. Values of average disturbance depth along the intertidal area are shown.

parte baja de la zona intermareal, probablemente relacionada con la rotura en esta área de olas más altas durante la pleamar.

Otro proceso destacable es la interacción entre el reflujo y el oleaje incidente, especialmente en las

playas reflectivas y en la parte superior de las playas disipativas, con mayor pendiente y arena poco compactada. Esta interacción, actuando durante largo tiempo en pleamar, da lugar a elevados valores de removilización.

Por lo tanto, existe una clara relación entre el tipo de rompiente y la profundidad de removilización. Con el fin de reflejar esta correspondencia, se ha aplicado a las playas de estudio el índice de similitud de «surf» (Battjes, 1974), empleado habitualmente en la bibliografía de ingeniería de costas:

$$\Sigma = \tan \beta / (H_b / L_o)^{0,5} \quad [1]$$

Donde β es la pendiente media de la playa en la zona intermareal, H_b es la altura de ola en rompiente y L_o la longitud de onda del oleaje en aguas profundas.

Este índice predice el tipo de rompiente de ola, desde rompientes de tipo ondulado («surging», $\Sigma > 2$), rompientes en voluta ($0,4 < \Sigma < 2$) a rompientes en derrame ($\Sigma < 0,4$). En las playas estudiadas se calculó un valor medio del índice para la zona intermareal. Tal y como se esperaba, se obtuvo una buena concordancia entre el índice de similitud de «surf» calculado y el tipo de rompiente observado.

La figura 5 representa la variación del índice de similitud de «surf» frente a la profundidad de removilización. Para la playa de La Ballena se han tenido en cuenta dos valores: uno para el lado hacia mar de la barra intermareal (3b en la figura) y otro para la zona media-alta de la playa (3a en la figura). Para la playa de Rota, en la segunda campaña, se han representado otros dos valores: uno para la parte alta, con mayor pendiente (2a en la figura) y otro para la parte baja, más tendida (2b en la figura). La gráfica resultante muestra una clara tendencia al incremento de la profundidad de removilización al pasar de rompientes en derrame a rompientes de tipo voluta.

Profundidad de removilización, tamaño de grano y pendiente de la playa

La variación del tamaño de grano influye en gran medida en la profundidad de removilización observada y ambos varían de unos puntos de la playa a otros. En general, puede concluirse que en todas las playas estudiadas el incremento del tamaño de grano medio da lugar a un incremento en la profundidad de removilización (fig. 6). Un análisis por mínimos cuadrados permitió obtener la siguiente ecuación empírica:

$$D = -156,5 \phi^2 + 121,6 \phi - 15,1 \quad n = 7 \quad r^2 = 0,92 \quad [2]$$

Donde D es la profundidad de removilización y ϕ el tamaño medio de grano en mm. Esta tendencia fue ya señalada por King (1951). No obstante,

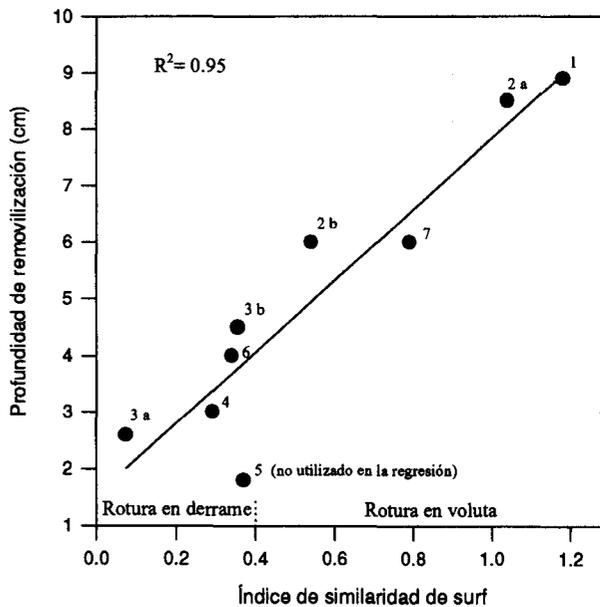


Fig. 5.—Variación de la profundidad de removilización media con respecto al índice de similitud de surf (Batjes, 1974) en las playas estudiadas. Los números indican las campañas de campo (ver tabla I).

Average disturbance depth as a function of the Surf Similarity index (Batjes, 1974) for the studied beaches. Numbers refer to field assessments (see table I).

Sunamura y Kraus (1985) afirman que la profundidad de mezcla depende sólo «débilmente» (sic) del tamaño de grano.

La pendiente de la playa y la altura de ola media en rompiente parecen ser los factores primordiales que influyen en el comportamiento morfodinámico de una playa. Por esta razón, todos los datos de profundidad de removilización obtenidos, en función de H_b , se han comparado con las variaciones en la pendiente de la playa. Esta relación aparece en la figura 7, donde también se han incluido algunos valores medios obtenidos por otros autores en diversas playas. Se observa que las playas de escasa pendiente, como Tres Piedras, presentan valores y distribución de la removilización parecidos a los registrados por King (1951) en las playas inglesas de Rhossili y Blackpool (de pendiente suave y arena de grano fino, 0,24 mm de media). La playa de Rota, de mayor pendiente, muestra valores de removilización similares a los de las playas reflectivas estudiadas por Otvos (1965), Williams (1971) y Jackson y Nordstrom (1993). En cuanto a la profundidad de mezcla, se han descrito casos parecidos, con valores relativamente altos en playas reflectivas, por Kraus (1985), Sherman *et al.* (1994) y Ciavola *et al.* (1997). Así, la buena correlación lineal obtenida (0,9) muestra un claro aumento en la profundidad de removilización de una playa (representada

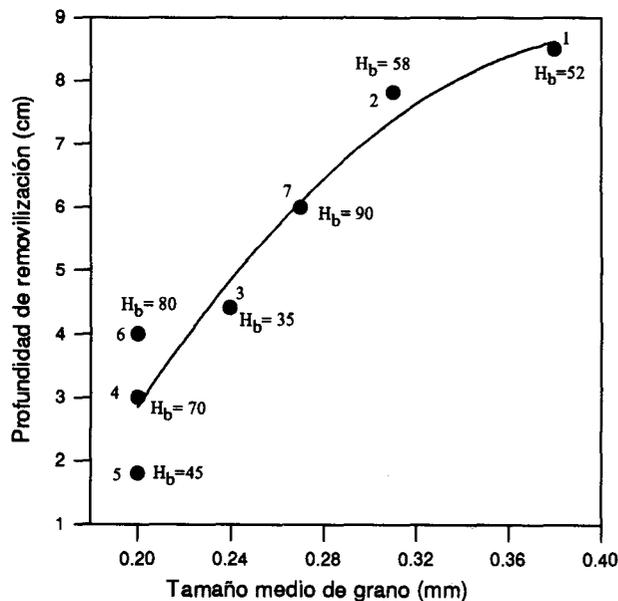


Fig. 6.—Variación de la profundidad de removilización media con respecto al tamaño de grano medio de las playas. Los números indican las campañas de campo (ver tabla I). H_b es la altura de ola media en rompiente.

Average disturbance depth as a function of the mean grain size. Numbers refer to field assessments (see table I). H_b is the average breaking wave height.

tada como porcentaje de H_b) al incrementarse la pendiente de la misma.

Profundidad de removilización y morfodinámica de la playa

Como puede deducirse de la figura 7 y de las tablas I y II, las playas estudiadas representan un amplio rango de condiciones morfodinámicas, desde playas de cierta pendiente con rompientes en voluta hasta playas tendidas con rompientes en derrame. Se ha realizado una clasificación sencilla de su situación morfodinámica mediante el cálculo del parámetro de escala de rompiente (Guza e Inman, 1975).

$$\xi = \sigma^2 H_b / 2g \tan^2 \beta \quad [3]$$

Donde σ es la frecuencia del oleaje en radianes. Se trata de un índice geomorfológico muy utilizado para diferenciar entre condiciones de zona de surf reflectivas ($\xi < 2,5$), intermedias ($2,5 < \xi < 30$) y disipativas ($\xi > 30$). Ciavola *et al.* (1997) observan una relación directa entre la profundidad de mezcla y este parámetro, de manera que las playas más reflectivas registran una mayor profundidad de mezcla que las playas disipativas.

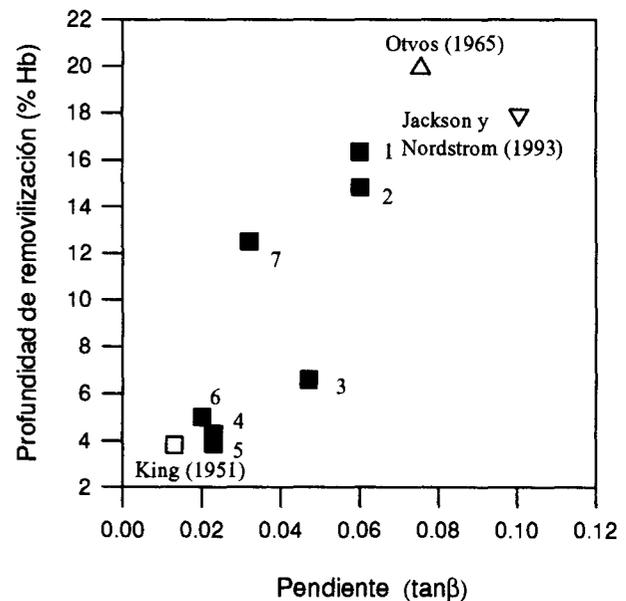


Fig. 7.—Relación entre los valores de removilización medios (expresados como porcentaje de la altura de ola en rompiente) y la pendiente de la playa. Los números se refieren a las campañas de campo (ver tabla I), y se han representado también valores medios obtenidos por otros autores.

Relation between average disturbance depth (expressed as a percentage of breaking wave height) and beach gradient for the studied beaches. Numbers refer to field assessments (see table I), and average values from other previous works have also been included.

Como en el caso del índice de similaridad de «surf», el parámetro de escala de rompiente fue calculado para un ciclo mareal completo, representando el comportamiento morfodinámico medio de cada playa durante la experiencia de campo. Los resultados obtenidos aparecen en la figura 8, donde la playa de Rota puede clasificarse como intermedia-reflectiva, mientras las playas de La Ballena y Tres Piedras muestran una clara tendencia a las condiciones disipativas. Las playas estudiadas pueden agruparse en tres tipos básicos, que coinciden aproximadamente con los tres tipos morfodinámicos que Masselink y Short (1993) propusieron para playas meso- y macromareales: playas con terraza de bajar («Low Tide Terrace»), playas disipativas con barra («Low Bar/Rip») y playas ultradisipativas («Ultradissipative»).

Cada situación morfodinámica implica una distribución y una intensidad de los procesos de oleaje («surf», rotura, «swash») diferentes, dando lugar a un tipo de perfil característico (Masselink y Hegge, 1995). El valor registrado de la profundidad de removilización es función de los procesos energéticos que actúan en la zona intermareal, principalmente el oleaje. Así, se establece una clara relación

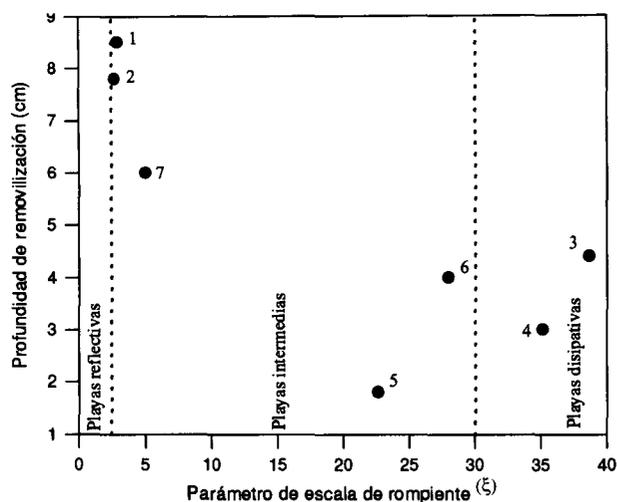


Fig. 8.—Variación de la profundidad de removilización media con respecto al parámetro de escala de rompiente (Guza & Inman, 1975) en las playas estudiadas. Los números se refieren a las campañas de campo (ver tabla I).
Average disturbance depth as a function of the Surf Scaling parameter (Guza & Inman, 1975) for the studied beaches. Numbers refer to field assessments (see table I).

entre la profundidad de removilización y el comportamiento morfodinámico de una playa.

Playas reflectivas

Son equivalentes a la parte media y alta del intermareal del modelo de playas con terraza de bajamar («Low Tide Terrace») propuesto por Masselink y Short (1993), siendo la playa de Rota la que mejor se aproxima a este tipo. Aquí, la máxima profundidad de removilización se relaciona siempre con el paso de la línea de rompiente en voluta y aparece en la zona de «swash» afectada por la migración de ésta (fig. 9a); un comportamiento análogo fue observado por Kraus (1985) en playas reflectivas. Puede apreciarse cómo una pequeña disminución de la pendiente de la playa en la parte baja de la zona intermareal conlleva una menor profundidad de removilización.

Playas disipativas con barra

Estas son semejantes a las playas «Low Bar/Rip» propuestas por Masselink y Short (1993), siendo la playa de La Ballena la que más se aproxima a este tipo. La máxima profundidad de removilización se registra en el lado hacia mar de la barra y en la parte superior del intermareal. A lo largo de la parte media de la zona de somerización, que corresponde con el surco, la profundidad de removilización disminuye

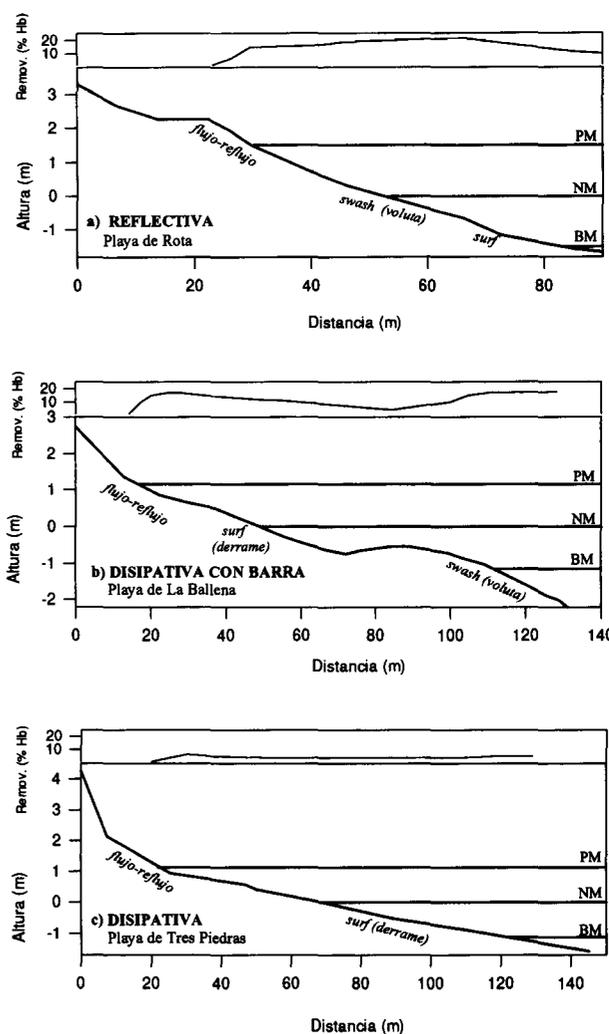


Fig. 9.—Variación de la profundidad de removilización a lo largo de la zona intermareal para los tres tipos principales de regímenes morfodinámicos observados. Se han representado también la distribución normal de los procesos ligados al oleaje. Cross-shore disturbance depth variability in the three main morphodynamic classes observed in the studied beaches. Normal distribution of wave processes have also been indicated.

claramente (fig. 9 b). Greenwood y Hale (1980), Wright *et al.* (1982) y Wright y Short (1984) describen procesos similares. En este caso, la profundidad de removilización depende principalmente de la variación de la pendiente de la playa a lo largo de la zona intermareal, desempeñando la barra intermareal un papel de protección natural de la playa.

Playas disipativas

Son las equivalentes a las playas de tipo ultradisipativo propuestas por Masselink y Short (1993); en

este caso, es la playa de Tres Piedras la que más se aproxima a este tipo. La profundidad de removilización se mantiene prácticamente constante a lo largo del perfil de la playa, y es más baja que en los casos anteriores, lo que concuerda con los resultados de King (1951) y Kraus (1985). Prevalecen los procesos de somerización, con una distribución espacial homogénea de la erosión a lo largo de la zona de surf (fig. 9 c). El seguimiento de estas playas reveló que, en contraste con el modelo reflectivo, la primera ola que rompe en un punto de la superficie de la playa cuando sube la marea no produce la máxima erosión. Es posible que la máxima removilización pueda tener lugar en la parte baja del intermareal durante la pleamar, cuando las olas más altas rompen en la parte externa de la playa, siendo esta máxima erosión la registrada en los testigos tras el ciclo mareal. No obstante, el método empleado en el presente trabajo sólo obtiene el resultado final del ciclo y no permite corroborar dicha hipótesis.

Conclusiones

Los principales factores que influyen en la profundidad de removilización son el tipo de rompiente, la altura de ola, la pendiente de la playa y el tamaño de grano, aunque en algunos casos podrían existir otras variables capaces de desempeñar un papel significativo y que no se han tenido en cuenta en este trabajo. Puede establecerse que la profundidad de removilización no depende exclusivamente de un solo factor, como la altura de ola en rompiente, sino de una combinación de ellos. Por ejemplo, la relación entre la pendiente de la playa y la altura de ola controla el tipo de rompiente que aparece a lo largo del perfil de la playa durante un ciclo mareal: las rompientes en voluta producen mayor removilización que las rompientes en derrame. En este sentido, hemos encontrado que el régimen morfodinámico de una playa es el factor clave que explica adecuadamente la variación espacial de la profundidad de removilización en diferentes playas, dado que refleja la distribución e intensidad relativa de los procesos de oleaje a lo largo del perfil de la playa.

En la zona de estudio hemos encontrado tres tipos morfodinámicos principales:

1. *Playas reflectivas*, donde las rompientes en voluta producen removilización a grandes profundidades y con valores muy semejantes en toda la zona intermareal. Esa profundidad es función del máximo energético que se alcanza al paso de la línea de rotura.

2. *Playas disipativas con barra intermareal*, en las que la variación transversal de la pendiente de la

playa controla la distribución de la profundidad de removilización: alta en el lado hacia el mar de la barra y en la parte superior del intermareal, y baja en el surco y en la cresta de la barra.

3. *Playas disipativas*, donde la profundidad de removilización presenta valores bajos, distribuidos homogéneamente a lo largo del perfil de la playa, asociados a los procesos de somerización y a rompientes en derrame.

Este tipo de estudios tiene claras aplicaciones prácticas en proyectos de ingeniería de costas, ya que permite evaluar los cambios microtopográficos y el espesor de sedimento removilizado por el oleaje en las playas naturales durante un ciclo mareal. La información obtenida, junto con un seguimiento estacional de las variaciones morfológicas permiten caracterizar el régimen morfodinámico de las playas, que debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar los perfiles de playas artificiales. En el litoral de la provincia de Cádiz, las obras de regeneración se han llevado a cabo vertiendo arena en la playa seca, creando un perfil reflectivo en la zona intermareal, como se ha observado en la playa de Rota. En el presente trabajo se demuestra que este tipo de perfiles son más sensibles a los efectos del oleaje que los perfiles de playas disipativas naturales (no transformadas artificialmente). Por ello, debería plantearse la posibilidad de realizar obras de regeneración con diseños diferentes, bien vertiendo la arena a lo largo de todo el perfil de la playa, o bien formando una barra en la zona sumergida.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la profesora N. L. Jackson (Univ. de New Jersey) la revisión crítica del método empleado y a un revisor anónimo sus propuestas de mejora de la calidad del artículo. Asimismo, agradecemos a J. Benavente y C. Castilla su ayuda en las labores de campo. Este trabajo es una aportación al Proyecto de la CICYT n.º AMB-0501 y al Grupo de Investigación RNM-161 del Plan Andaluz de Investigación.

Referencias

- Baena, J., Zazo, C., Goy, J. L., Dabrio, C., Leyva, F., Granados, L. F., Moreno, E., Aguilar, P. y Ruiz, P. (1987). *Memoria y mapa geológico de España E.1:50.000. Hoja n.º 1.061: Cádiz*. IGME, Madrid, 36 págs.
- Battjes, J. A. (1974). Surf similarity. *Proc. 14th Int. Conference Coastal Eng.*, ASCE, 466-480.
- Beach, R. y Stenberg, R. (1996). Suspended sediment transport in the surf zone: response to breaking waves. *Continental Shelf Res.*, 15, 1989-2003.
- Chandramohan, P., Nayak, B. y Anand, N. (1994). Crest-breaking time-lapse approach for measuring breaking angle. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 120, 318-324.

- Ciavola, P., Taborda, R., Ferreira, O. y Dias, J. A. (1997). Field observations of sand-mixing depths on steep beaches. *Marine Geol.*, 141: 147-156.
- Davis, R. A. Jr. (1977). *Principles of Oceanography*. Addison-Wesley, 505 págs.
- Ferreira, O., Bairros, M., Pereira, H., Ciavola, P. y Dias, J. A. (1998). Mixing depth levels and distribution on steep foreshores. *J. Coastal Res.*, 26: 292-296.
- Folk, R. L. y Ward, W. C. (1957). Brazos River Bar. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, 27: 3-26.
- Fucella, J. E. y Dolan, R. E. (1996). Magnitude of subaerial beach disturbance during Northeast storms. *J. Coastal Res.*, 12: 420-429.
- Greenwood, B., y Hale, P. B. (1980). Depth of activity, sediment flux and morphological change in a barred beach environment. En: S. B. McCann (ed.), *The Coastline of Canada*, Geol. Surv. Can., págs. 89-109.
- Guza, R. T. e Inman, D. L. (1975). Edge waves and beach cusps. *J. Geophys. Res.*, 80: 2997-3012.
- Hughes, M. G. y Cowell, P. J. (1987). Adjustments of reflective beaches to waves. *J. Coastal Res.*, 3: 153-167.
- Inman, D. L., Zampol, J. A., White, T. E., Hanes, D. M., Waldorf, B. W. y Kastens, K. A. (1980). Field measurements of sand motion in the surf zone. *Proc. 17th Int. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, págs. 1215-1234.
- Instituto Hidrográfico de la Marina (1996-97). *Anuario de Mareas*. Ministerio de Defensa, Madrid.
- Jackson, N. L. y Nordstrom, K. F. (1993). Depth of activation of sediment by plunging breakers on a steep sand beach. *Marine Geol.*, 115: 143-151.
- Kana, T. (1978). Surf zone measurements of suspended sediments. *Proc. 16th Int. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, págs. 1725-1743.
- King, C. A. M. (1951). Depth of disturbance of sand on sea beaches by waves. *J. Sedim. Petrol.*, 21: 131-140.
- Komar, P. D. e Inman, D. L. (1970). Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.*, 75: 5514-5527.
- Kraus, N. C., Isobe, I., Igarashi, H., Sasaki, T. O. y Horikawa, K. (1982). Field experiments of longshore sand transport in the surf zone. *Proc. 18th Int. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, págs. 969-988.
- Kraus, N. C. (1985). Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone. *J. Sedim. Petrol.*, 55: 3-14.
- Levoy, F., Monfort, O., Rousset, H. y Larssonneur, C. (1994). Quantification of longshore transport in the surf zone on macrotidal beaches. *Proc. 24th Int. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, págs. 2282-2296.
- Masselink, G. y Short, A. D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *J. Coastal Res.*, 9: 785-800.
- Masselink, G. y Hegge, B. (1995). Morphodynamics of meso- and microtidal beaches: examples from central Queensland, Australia. *Marine Geol.*, 129: 1-23.
- Miller, R. L. (1976). Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces. *Beach and Nearshore Sedimentation*, SEPM Spec. Publ., 24: 92-114.
- Muñoz, J. L. y Sánchez, A. (1994). *El medio físico y biológico en la Bahía de Cádiz: Saco Interior*. Inform. Técn. Junta de Andalucía, 28/94, Sevilla, 161 págs.
- Muñoz, J. J. (1996). *Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas*. Tesis Doctoral, Univ. de Cádiz, 150 págs. (inérita).
- Nicholls, R. J. y Orlando, S. P. (1993). A new dataset on the depth of disturbance and vertical erosion on beaches during storms. *Proc. Int. Coastal Symp.*, Hilton Head Island, South Carolina, págs. 230-235.
- Nordstrom, K. F. y Jackson, N. L. (1990). Migration of swash zone, step and microtopographic features during tidal cycles on an estuarine beach, Delaware Bay, New Jersey, USA. *Marine Geol.*, 92: 147-154.
- Otvos, E. G. (1965). Sedimentation-erosion cycles of single tidal periods on Long Island Sound beaches. *J. Sedim. Petrol.*, 35, 604-609.
- Reyes, J. L. (1997). *Aproximación metodológica al conocimiento del comportamiento morfo-sedimentario de playas mesomareales expuestas. Aplicación a la Playa de La Barrosa (Chiclana de la Frontera)*. Tesis de Licenciatura, Univ. de Cádiz, 188 págs. (inérita).
- Roldán, F. J., Divar, J., Borrero, J. D., Zazo, C. y Goy, J. L. (1988). *Memoria y mapa geológico de España, 1:50.000. Hoja n.º 1.047: Sanlúcar de Barrameda*. IGME, Madrid, 35 págs.
- Sherman, D. J., Nordstrom, K. F., Jackson, N. L. y Allen, J. R. (1994). Sediment mixing-depths on a low-energy reflective beach. *J. Coastal Res.*, 10: 297-305.
- Sunamura, T. y Kraus, N. C. (1985). Prediction of average mixing depth of sediment in the surf zone. *Marine Geol.*, 62: 1-12.
- Taborda, R., Ferreira, O., Dias, J. A. y Moita, P. (1994). Field observations of longshore sand transport in a high energy environment. *Littoral'94*, págs. 26-29.
- Taborda, R., Ciavola, P., Ferreira, O. y Dias, J. A. (1998). Measurements of suspended sediment transport on a reflective meso-tidal beach in Southern Portugal. *2.º Simposium Internacional sobre el Margen Ibérico Atlántico*, Instituto Español de Oceanografía (en prensa).
- Van Rijn, L. (1989). *Handbook of sediment transport by currents and waves*. Delft Hydraulics, Delft. The Netherlands.
- Williams, A. T. (1971). An analysis of some factors involved in the depth of disturbance of beach sand by waves. *Marine Geol.*, 11: 145-158.
- Wright, L. D., Guza, R. T. y Short, A. D. (1982). Dynamics of a high-energy dissipative surf zone. *Marine Geol.*, 45: 41-62.
- Wright, L. D. y Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geol.*, 56: 93-118.

Recibido el 28 de diciembre de 1998.
Aceptado el 30 de abril de 1999.