

Influence of a rocky platform in the profile morphology: Victoria Beach, Cádiz (Spain)

Influencia de un sustrato rocoso en la morfología del perfil de playa: Playa Victoria, Cádiz

A.M. Bernabeu-Tello^{1*}

J.J. Muñoz-Pérez²

R. Medina-Santamaría³

¹Departamento de Geociencias Marinas y O.T.
Facultad de Ciencias
Universidad de Vigo
Lagoas–Marcosende 36200, Vigo, SPAIN
*E-mail: bernabeu@uvigo.es

²Demarcación de Costas
c/ Marianista Cubillo, 7, 11071, Cádiz

³E.T.S. Ingenieros de Caminos, C. y P.
Universidad de Cantabria
Avda. de los Castros, s/n, 39005, Santander

Recibido en noviembre de 2000; aceptado en diciembre de 2001

Abstract

The equilibrium profile concept is a useful tool for the knowledge and management of the coastline. This concept is based on several assumptions that rarely are satisfied in nature. One of these considers that the geologic setting has no influence in the profile morphology. The Victoria beach is a good example that questions this hypothesis.

Muñoz-Pérez (1996) and Muñoz-Pérez *et al.* (1999) proposed an analytical expression of equilibrium beach profile for reef-protected beaches. In this work, data measured at Victoria beach are used to confirm the goodness of this model. The results obtained show that the occurrence of a horizontal rocky platform in subtidal zone modifies the beach slope and the seasonal evolution of the profile.

Key words: equilibrium profile, geological setting, Victoria beach.

Resumen

El concepto de perfil de equilibrio es una herramienta útil en el conocimiento y la gestión del litoral. Este concepto está basado en una serie de hipótesis que rara vez se cumplen en la naturaleza. Una de estas hipótesis considera que el entorno geológico no influye sobre la morfología del perfil. La playa Victoria es un buen ejemplo que cuestiona la validez de esta hipótesis.

Muñoz-Pérez (1996) y Muñoz-Pérez *et al.* (1999) propusieron una expresión analítica del perfil de equilibrio para playas apoyadas sobre un sustrato rocoso. En este trabajo, se verifica la bondad de esta expresión a través de los datos medidos en la playa Victoria (Cádiz). Los resultados muestran la importancia que la presencia de un sustrato rocoso subhorizontal en la zona sumergida tiene tanto en la pendiente de la playa, como en las variaciones estacionales del perfil.

Palabras clave: perfil de equilibrio, entorno geológico, playa Victoria.

Introduction

Several authors (Dean, 1991; Bodge, 1992; Inman *et al.*, 1993) have pointed out the importance that the knowledge of the characteristics and morphological variations of a beach has in the interpretation of coastal processes that generate them and, consequently, in littoral management. In bidimensional beaches, the easier way to study these aspects is by means of the concept of the equilibrium beach profile (EBP). Larson

Introducción

Diversos autores (Dean, 1991; Bodge, 1992; Inman *et al.*, 1993) han señalado la importancia que el conocimiento de las características y variaciones morfológicas de una playa adquiere en la interpretación de los procesos costeros que las generan y, por tanto, en la gestión del litoral. En playas bidimensionales, la forma más simple de abordar estos aspectos es a través del perfil de playa, siendo una de las herramientas

(1991) described it as: "A beach of specific grain size, if exposed to constant forcing conditions, normally assumed to be short-period breaking waves, will develop a profile shape that displays no net change in time".

Based on this definition, it is clear that the existence of an equilibrium beach profile is impossible in nature, due to the constant variations in the hydrodynamical phenomenon. In strict sense, the EBP is a theoretical concept that only can be reached in the laboratory, under controlled conditions. However, as indicated by González (1995), the variations of the different factors affecting a beach profile (essentially waves, tides and grain size) in a natural beach are limited. Then, the profile variability is limited and it is possible to define a modal morphology that can be considered as the equilibrium profile of the beach.

A great number of works have tried to model the EBP concept using mathematical expressions. These models vary from simple linear relations to complicate empirical relations (Brunn, 1954; Dean, 1977; Bodge, 1992; Komar and McDougal, 1994; Bernabeu, 1999). One of the most useful formulations, obtained from the fit of numerous beach profiles measured, was proposed by Brunn (1954) and Dean (1977):

$$h(x) = Ax^{2/3} \quad (1)$$

where $h(x)$ is the depth for an x distance from the coastline and A is a profile parameter which Dean (1977) related to the fall velocity. Dean (1977) provided a theoretical basis for this expression in the surf zone, assuming that the energy dissipation per unit volume is constant.

It is important to note that all the previously stated models are based on several hypotheses that have to be fulfilled for valid application:

- (1) the geologic setting have no influence in the beach profile shape;
- (2) the beachface sediments only move under wave action; and
- (3) the net sediment motion is not significant beyond the closure depth seaward.

The first of these hypotheses is one of the most restrictive, because it assumes implicitly that the active profile of the beach is completely composed of sand. However, there are coastal zones where the beach morphology is controlled by the geological characteristics of the area, being the active profile intersects by rocky basement. For this reason, there are works that question the validity of the EBP concept as a base for predictive model (e.g. Pilkey *et al.*, 1993). Recently, Muñoz-Pérez *et al.* (1999) propose an analytic model, based on the hypothesis that energy dissipation per unit volume is constant, that includes the influence of rocky platform on the beach profile.

In our work, the validity of the first of the above-mentioned hypotheses is checked. Measured cross-shore profiles along the Victoria beach (Cádiz), where there is a rocky platform in the subtidal zone, are used to study the influence of this rocky platform on the beach morphology.

principales el concepto de perfil de equilibrio. Larson (1991) lo describe como: "Una playa con un tamaño de grano determinado, expuesta a condiciones constantes, normalmente asumiendo olas rompientes de corto período, desarrollará una forma de perfil que no presentará ningún cambio neto con el tiempo".

Según esta definición, la existencia de un perfil de equilibrio en la Naturaleza es prácticamente imposible, debido a las continuas variaciones de los fenómenos dinámicos. En sentido estricto, el perfil de equilibrio es un concepto teórico que únicamente será posible alcanzar en el laboratorio, donde las condiciones están controladas. Sin embargo, tal y como indicaba González (1995), las variaciones de los diferentes agentes (fundamentalmente oleaje, marea y tamaño de grano) en una playa están acotadas, por lo que la variabilidad del perfil estará limitada, pudiéndose definir un estado modal, o más frecuente, que consideramos como el perfil de equilibrio de la playa.

Existen numerosos trabajos que tratan de modelar dicho concepto a través de una expresión matemática, variando desde una relación lineal simple hasta complicadas relaciones empíricas (Brunn, 1954; Dean, 1977; Bodge, 1992; Komar y McDougal, 1994; Bernabeu, 1999). Una de las formulaciones más utilizadas es la propuesta por Brunn (1954) y Dean (1977) a partir del ajuste de numerosos perfiles de playa medidos:

$$h(x) = Ax^{2/3} \quad (1)$$

donde $h(x)$ es la profundidad a una distancia x de la línea de costa, y A es un parámetro de forma que Dean (1987) relacionó con la velocidad de caída del grano. Dean (1977) dio una base teórica a esta expresión considerando que la disipación de energía por unidad de volumen en la zona de rotura es constante.

Todos estos modelos parten de un conjunto de hipótesis que deben cumplirse para que su aplicación sea válida:

- (1) El entorno geológico no tiene influencia en la determinación de la forma del perfil;
- (2) Los sedimentos del frente de playa se movilizan exclusivamente por acción del oleaje; y
- (3) No existe un movimiento neto de sedimento significativo, en dirección hacia el mar, a partir de la profundidad de cierre del perfil.

La primera de estas hipótesis es una de las más restrictivas, ya que asume implícitamente que el perfil activo de la playa está formado totalmente por arena. Sin embargo, existen tramos de la costa donde la morfología de la playa viene marcada por las características geológicas del área, con parte del perfil activo constituido por basamento rocoso. Así, existen trabajos donde se cuestiona la validez del concepto de perfil de equilibrio como base de modelos predictivos (Pilkey *et al.*, 1993), puesto que las hipótesis de partida en las que se sustenta sólo se cumplen de forma puntual en la Naturaleza. Más recientemente, Muñoz-Pérez *et al.* (1999) proponen un modelo

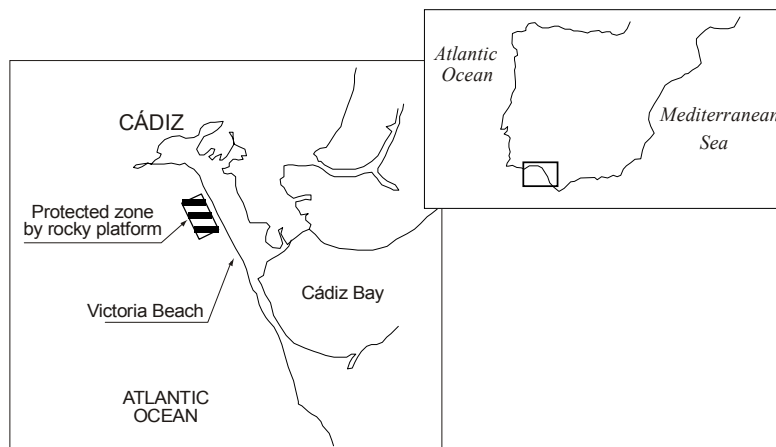


Figure 1. Location of the study area.

Figura 1. Localización del área de estudio.

Study area

Victoria beach is located in the Gulf of Cádiz, in the SW coast of Spain (fig. 1). It is 3 km long and can be divided in two different zones due to the existence of a transversal fault. The northernmost zone presents a rocky platform that emerges during low tide. Most of the time, it forms a submerged plane tableland slightly dipping to the SE, while the southern zone has no platform. This has allowed us to compare the behaviour of a reef-protected profile against a complete one, under the same external conditions (waves, tide, currents, wind, etc.)

Geologically, the rocky platform that occurs at Victoria beach is an outcrop of Plio-Quaternary age. Lithologically, it is a bioclastic conglomerate, mostly composed by oysters and pecten shells. This formation is fossilised by a continental glacial consisting of quartz-rich red sands with quartzite pebbles. This siliciclastic conglomerate lays in disconformity with the Pliocene rocks, dipping 10 degrees in the southeast at Victoria beach. This formation is affected by gravity faults of small throw (6-10 m) and can occur as a part of the rasa like in Victoria beach or at the top of the cliff like in Barrosa beach (Gutiérrez-Más *et al.* 19991).

The Gulf of Cádiz coast is mesotidal, with a difference between spring and neap tides ranging from 1.2 to 3.3 m. The Victoria beach consist of medium-fine sand ($D_{50} = 0.25$ mm), composed by 90-95% of quartz and 5-10% of bioclastic material.

Methodology

During the spring of 1991, Victoria beach was nourished with an input of 2,000,000 m³ of sand coming from dredging the entrance channel of Cádiz harbour. On December of that year, a monitoring program was started and was extended for five years. The surveys cover long, medium and short term features, changing the survey characteristics in function of the time scale wanted to be studied.

Six-monthly topo-bathymetric measurements allowed characterising the seasonal variations. This surveying was carried

analítico, basado en la hipótesis de disipación por unidad de volumen constante, incorporando la influencia de un sustrato rocoso sobre el perfil de playa.

En este trabajo, se revisa la validez de la primera de las hipótesis anteriores. Para ello, se utilizaron perfiles medidos en la playa Victoria (Cádiz) donde, la existencia de una plataforma rocosa en la zona submareal permite estudiar su influencia sobre la morfología de la playa.

Area de estudio

La playa Victoria se encuentra situada en el Golfo de Cádiz, en la costa SW de España (fig. 1). Tiene una longitud aproximada de 3 km, estando dividida en dos zonas diferenciadas por la existencia de una falla transversal. La zona situada más al norte presenta una laja rocosa en la cota de bajamar viva, configurando una meseta llana sumergida con escaso buzamiento hacia el SE, mientras que la zona meridional carece de dicha plataforma. Esto permite comparar el comportamiento de un perfil apoyado y otro completo frente al mismo tipo de condicionantes externos (oleaje, marea, corrientes, viento, etc.).

La laja rocosa, que aparece en la playa Victoria, es un afloramiento de edad pliocuaternaria, constituida por un conglomerado bioclástico, muy rico en ostreidos y péctenes. Está fosilizada por un glacis continental de arenas rojas cuarcíferas con cantos de cuarcita. Este nivel conglomerático se encuentra en discordancia con formaciones claramente pliocenas y, en la zona de la playa Victoria, presenta un buzamiento de unos 10 grados hacia el SE. Está afectada por fallas normales de pequeño salto (entre 6 y 10 m), pudiendo encontrarlo formando una rasa, como en la playa Victoria, o en el techo de una serie que constituye el acantilado, como en la playa de La Barrosa (Gutiérrez-Más *et al.*, 1991).

La costa del Golfo de Cádiz está sometida a un régimen mesomareal, con una variación entre mareas vivas y muertas que oscila entre 1.2 – 3.3 m. En cuanto a las características sedimentarias de la playa Victoria, está compuesta por arena

out in November-December and in May-June, considering the stormy periods in the Gulf of Cádiz (between December and April) that affect the beach. Seven campaigns were carried out, between December 1991 and December 1994, surveying cross-shore profiles with a 100 m separation, measured from the marina to a depth of -8.00 m. Because no noticeable variations were observed in the complete profile up to off-shore depths exceeding -4.00 m, an interpolation of 51 points at 10m intervals was used. The length of the reef-protected profile was 350 m, using a 36 points interpolation and the same separation up to -1 m depths. The occurrence of Pliocene marmites and reef points beyond this depth, causes significant alterations.

In the mid-term, two characteristic profiles were measured fortnightly, a complete profile (a profile completely composed by sand) and a reef-protected one. The surveys were carried out from April 1, 1995 to March 1, 1996. Profiles were measured up to -1.00 m depth that coincides with the rocky platform position. The studied profiles were named P-19, for the reef-protected profile and P-45, for the complete profile (fig. 2). For the short-term study, the same profiles were selected (P-19 and P-45) and were measured up to a -0.5 m depth. The surveys coincided with the first 1995 winter storm, carrying out a daily survey of both profiles.

Results and discussion

The profiles studied in Victoria beach allow the estimation of the geologic setting influence on the beach morphology. Two important aspects will be analysed: the morphological differences between a reef-protected profile and a complete profile, using the average slope and the seasonal variations of each profile.

Beach profile slope

In previous works, Muñoz-Pérez (1996) and Muñoz-Pérez *et al.* (1999) presented a theoretical model for the equilibrium profile in beaches with a rocky platform in the subtidal zone. This is a common characteristic in the beaches of Cádiz province (Spain). This model assumes that the incident energy dissipation per volume unit is constant, following the hypothesis proposed by Dean (1977) in his model. Moreover, it introduces a wave height variation model (Andersen and Fredsoe, 1983) across the surf zone, that takes into account the characteristic parameters of the rocky platform (width and depth). This model interprets the morphology variations between a complete and a reef-protected profile, as the result of the decrease in incident energy associated to the different topography of the profiles, determining the amount of energy that reaches the profile.

Figure 3 shows a sketch of this model, showing the complete and reef-protected profiles. The reference system is located over the mean sea level, with the origin in the shoreline of the complete profile, and the positive x-axis in the offshore

media-fina ($D_{50} = 0.25$ mm), formada por un 90-95% de cuarzo y el 5-10% restante de material bioclástico.

Metodología

En la primavera de 1991, la playa Victoria se regeneró con un aporte de $2,000,000$ m³ de arena procedentes del dragado del canal de entrada al puerto de Cádiz. En diciembre de ese mismo año se inicio un programa de seguimiento de la playa que se extendería durante cinco años. Las campañas llevadas a cabo cubren todo el abanico de largo, medio y corto plazo, siendo las características de las mismas distintas en función de la escala de tiempo que intentaban abarcar.

Así, se realizaron levantamientos topo-batimétricos con una periodicidad semestral, que permitieron recoger las variaciones estacionales. Estos levantamientos se llevaron a cabo en los meses de noviembre-diciembre y mayo-junio, teniendo en cuenta los períodos de tormentas frecuentes en el Golfo de Cádiz (entre diciembre y abril) que afectan de forma importante a la playa. Se desarrollaron siete campañas en total, entre diciembre de 1991 y diciembre de 1994, tomando 30 perfiles topográficos con una separación de 100 m entre sí, medidos desde el paseo marítimo hasta la cota -8.00 m. En el caso del perfil completo, no existían variaciones apreciables para profundidades superiores a -4.00 m, por lo que se preparó una interpolación de 51 puntos separados 10 m entre sí. Para el perfil apoyado sobre la laja se limitó su longitud a 350 m, es decir, 36 puntos con idéntica separación, llegando hasta la cota -1.00 m. A partir de esta profundidad comienzan las alteraciones producidas por la aparición de puntas y marmitas del Plioceno.

Para escalas de medio plazo, se tomaron datos topográficos en dos perfiles tipo, uno completo (perfil formado totalmente por arena) y otro apoyado en una laja, con periodicidad quincenal. Las campañas se desarrollaron a lo largo de un año desde el 1 de abril de 1995 hasta el 1 de marzo de 1996, con un total de 23 series temporales. Los perfiles se midieron hasta una profundidad de -1.00 m que coincide con la profundidad a la que se sitúa el sustrato rocoso que definíamos. Los perfiles estudiados fueron el P-19, perfil apoyado, con 22 puntos separados entre sí 10 metros, y el P-45, perfil completo, con 25 puntos e idéntica separación (fig. 2).

Para el seguimiento a corto plazo, se eligieron los mismos perfiles (P-19 y P-45), midiendo hasta una profundidad de -0.5 m. Las medidas coincidieron con el primer temporal de invierno de 1995, realizándose un seguimiento diario de ambos perfiles.

Resultados y discusión

El estudio de los perfiles medidos en playa Victoria ha permitido estimar la influencia que el entorno geológico tiene en la morfología de la playa. Se han analizado dos aspectos importantes: las diferencias morfológicas entre un perfil

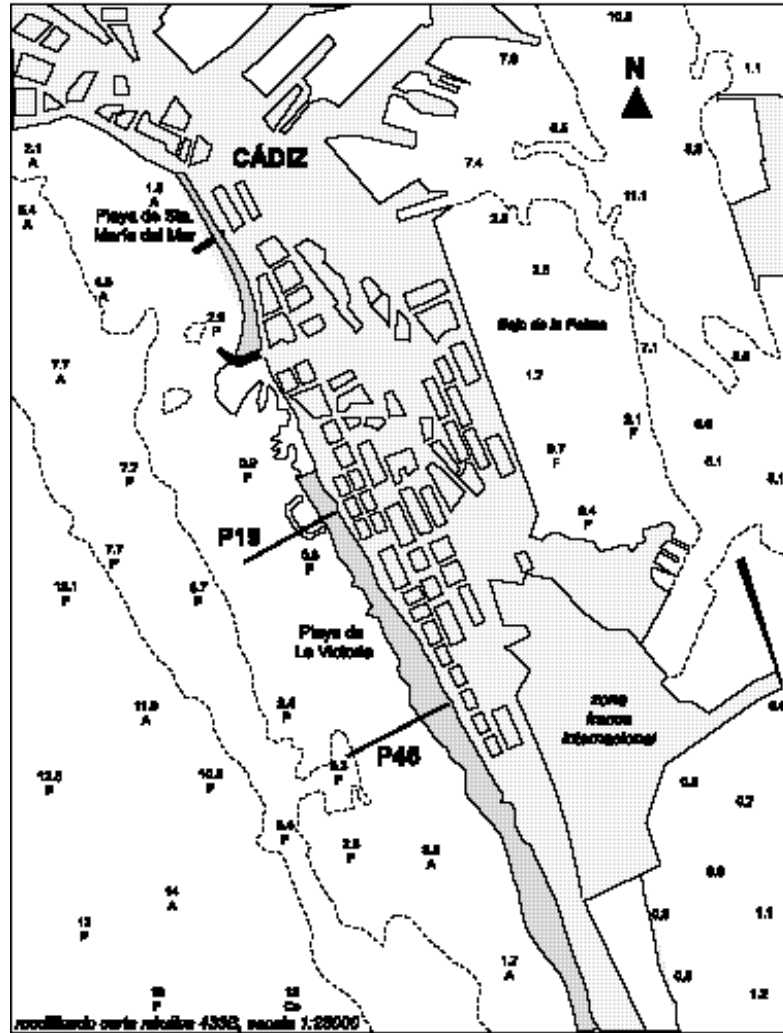


Figure 2. Victoria Beach (Cádiz, Spain) and location of the profiles studied (P-19 and P-45).
Figura 2. Playa Victoria (Cádiz) y localización de los perfiles estudiados (P-19 y P-45).

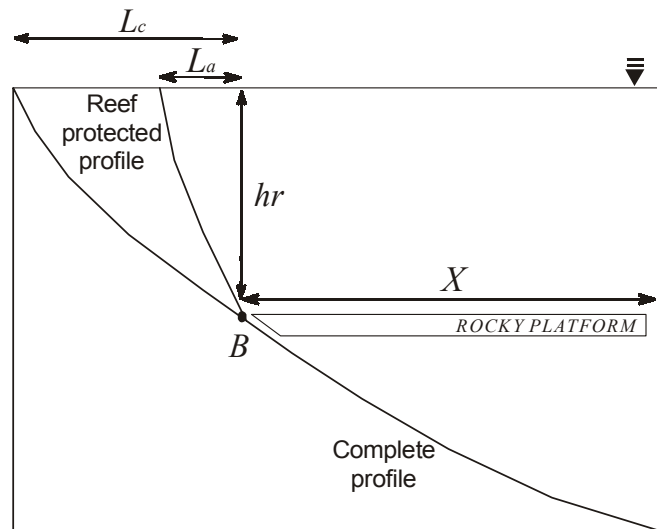


Figure 3. Equilibrium profile model for reef-protected beaches.
Figura 3. Esquema del modelo de perfil de equilibrio para playas con laja rocosa.

direction. For simplicity point B, that is the point where reef-protected profile rests on the rocky platform, is defined as the point where the complete and reef-protected profile intersects each other. L_c y L_a are the horizontal distances between the profile origin (complete and reef-protected, respectively) and the intersection point of both profiles. X is the width of rocky platform.

Assuming the linear wave theory and using the Dean (1977) formulation, equation (1), Muñoz-Pérez *et al.* (1999) obtained a relationship between the profiles lengths that reflects the slope variation:

$$\frac{L_a}{L_c} = \left[\frac{H_a}{H_c} \right]_{h_r}^2 \quad (2)$$

where H_c and H_a are the wave heights at h_r depth for the complete and the reef-protected profiles, respectively. Following the relation established by Andersen and Fredsoe (1983) for the surf zone, the wave height that reaches the depth h_r (point B in the fig. 3) for the reef-protected profile is smaller than the one for the complete profile. Notice that the former expression defines a length for the reef-protected profile shorter than that of the complete profile. The analytical model proposed predicts the reef-protected profile slope to be is steeper than that for the complete profile. Assuming that in the surf zone the wave height has a constant relationship with depth, $H_c = \gamma h_r$ for the complete profile and $H_a = \Gamma h_r$ for the reef-protected profile, and considering the profile shape as a Dean profile, equation (1), the formulation (2) can be expressed as:

$$\frac{A_a}{A_c} = \left[\frac{\Gamma}{\gamma} \right]_{h_r}^2 \quad (3)$$

In a wide platform ($X \rightarrow \infty$), the parameter Γ varies between 0.35–0.55 (Nelson, 1994), whilst the parameter γ ranges between 0.65–1.1, with a mean value of 0.79 (Kaminsky and Kraus, 1993). Accounting for these values, the obtained relationship between the shape parameter of the profiles (A_a / A_c) varies between 1.2–3.2 values.

In the present work, two characteristic profiles of Victoria beach (fig. 2) were used, profile P-19, that is localised in the northern part of the beach and is affected by rocky platform, and profile P-45 that is localised southwards and is a complete profile. These have allowed establishing the morphological differences between them, verifying the validity of the formulation proposed by Muñoz-Pérez *et al.* (1999).

In the figure 4a, b, both profiles are compared for the campaigns studied. Important morphologic differences between the complete profile (P-45) and the reef-protected profile (P-19) are observed for June (fig. 4a) and December surveys (fig. 4b). The slope difference between both profiles is marked, in spite of the same wave and tide conditions, as the analytic model predicts. Meanwhile the reef-protected profile has a 4.5% mean slope in the intertidal zone, which generates a wide

apoyado y un perfil completo, a través de la pendiente media y la oscilación estacional que sufre cada uno de estos perfiles.

Pendiente del perfil de playa

En trabajos anteriores, Muñoz-Pérez (1996) y Muñoz-Pérez *et al.* (1999) presentaron un modelo teórico de perfil de equilibrio para playas con laja rocosa en su zona submareal, característica frecuente en playas de la provincia de Cádiz. En este modelo se asume que la disipación de energía del oleaje incidente por unidad de volumen se mantiene constante, siguiendo la hipótesis propuesta por Dean (1977) en su modelo. Además, se introduce un modelo de evolución de la altura de ola (Andersen y Fredsoe, 1983) para la zona de rompientes que considera los parámetros que caracterizan la laja (anchura y profundidad). El modelo fundamenta la variación morfológica entre un perfil completo y uno apoyado en la disminución de la energía incidente asociada a la diferente topografía de los perfiles, lo cual determina la cantidad de energía que alcanza el perfil.

En la figura 3 se presenta un esquema de dicho modelo, donde aparece un perfil apoyado y un perfil completo. El sistema de referencia se sitúa sobre el nivel medio del mar, con el origen de coordenadas en la línea de costa del perfil completo, y el sentido positivo del eje x en la dirección hacia el mar. Para simplificar el planteamiento del modelo, el punto B, definido como el punto donde el perfil se apoya sobre la laja, se hace coincidir con el punto de encuentro entre perfil completo y perfil apoyado. L_c y L_a corresponden a la distancia horizontal entre el origen del perfil (completo y apoyado, respectivamente) y el punto de encuentro de ambos perfiles. X es la anchura del sustrato rocoso.

Asumiendo la teoría lineal de ondas y utilizando la formulación de Dean (1977), dada por la ecuación (1), Muñoz-Pérez *et al.* (1999) obtuvieron una relación entre la longitud de cada perfil que da idea de la variación de pendiente entre ambos:

$$\frac{L_a}{L_c} = \left[\frac{H_a}{H_c} \right]_{h_r}^2 \quad (2)$$

donde H_c y H_a son las alturas de ola a la profundidad h_r para perfil completo y apoyado, respectivamente. Según la relación establecida por Andersen y Fredsoe (1983) para la zona de rompientes, la altura de ola que alcanza la profundidad h_r (punto B en la fig. 3) en el perfil apoyado disminuye al aumentar la anchura del sustrato rocoso, por lo que será menor que para el perfil completo. La expresión anterior nos define una longitud del perfil apoyado también menor. El modelo analítico propuesto predice una pendiente del perfil apoyado más pronunciada que para el perfil completo. Asumiendo que, tras la rotura, la altura de ola mantiene una relación constante con la profundidad, la cual varía entre el perfil completo ($H_c = \gamma h_r$) y el perfil apoyado ($H_a = \Gamma h_r$) y considerando que la forma del

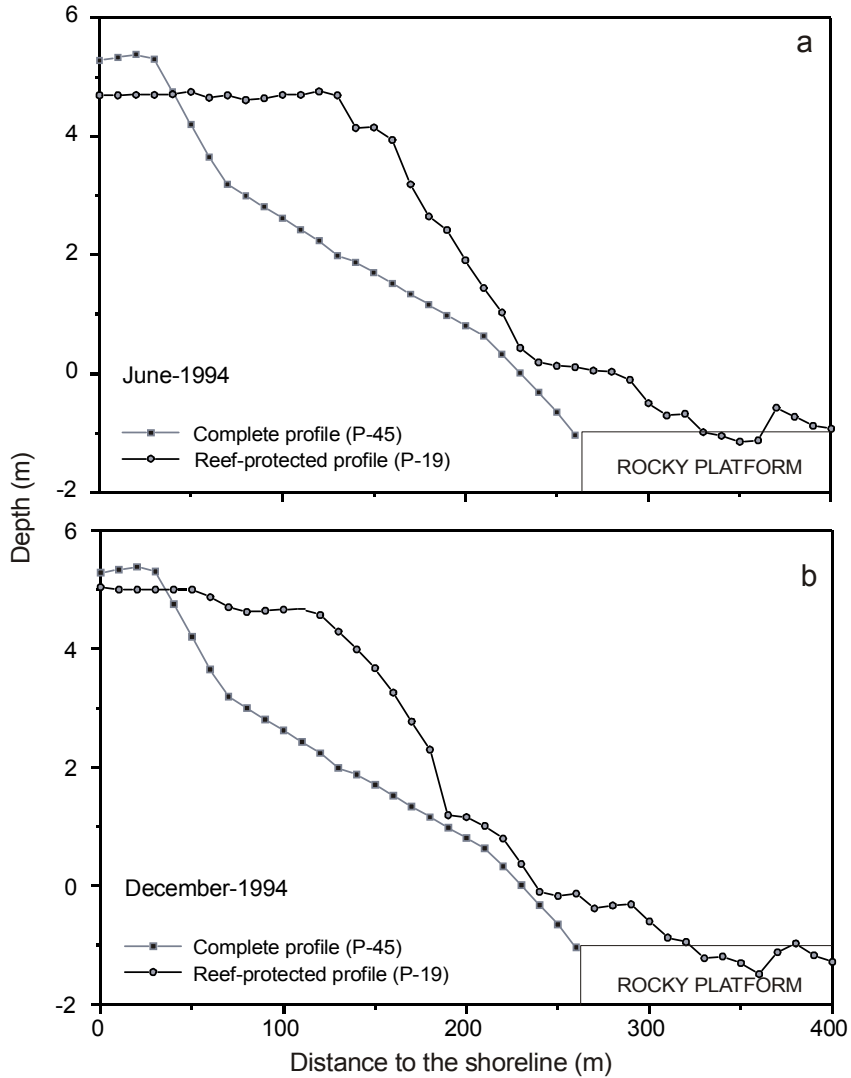


Figure 4. Comparison between the complete profile (P-45) and the reef-protected profile (P-19) for different campaigns: **(a)** June, 1994; **(b)** December, 1994.

Figura 4. Comparación entre perfil completo (P-45) y perfil apoyado (P-19) para distintas campañas: **(a)** Junio 1994; **(b)** Diciembre 1994.

Table 1. Parameters associated to the Dean's profile fit for the complete (P-45) and the reef-protected (P-19) profiles measured in Victoria Beach. **Tabla 1.** Parámetros asociados al ajuste del perfil de Dean al perfil completo (P-45) y al perfil apoyado (P-19) medidos en la Playa Victoria (Cádiz).

	Reef-protected profile (P-19)		Complete profile (P-45)		A_a/A_c
	Profile length (L_a)	Parámetro A_a	Profile length (L_c)	Parámetro A_c	
June, 1994	70	0.375	160	0.14	2.68
December, 1994	80	0.385	140	0.15	2.57
June, 1995	90	0.16	200	0.09	1.77
December, 1995	160	0.10	140	0.10	1.00

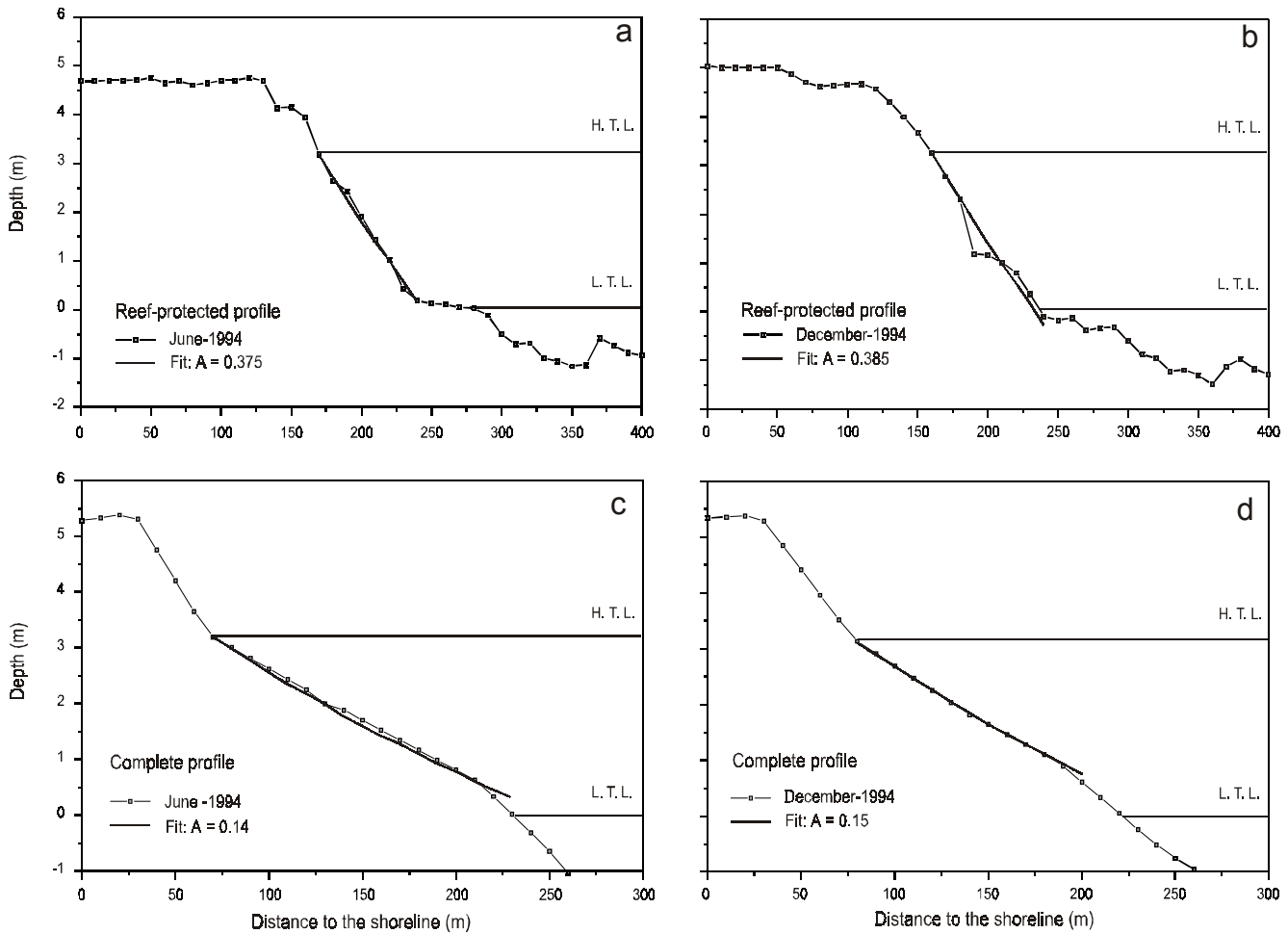


Figure 5. Profile fits to the profiles studied: **(a)** reef-protected profile, June, 1994; **(b)** reef-protected profile, December, 1994; **(c)** complete profile, June 1994 and **(d)** complete profile, December 1994.

Figura 5. Ajustes a los perfiles estudiados: **(a)** perfil apoyado, junio de 1994; **(b)** perfil apoyado, diciembre de 1994; **(c)** perfil completo, junio de 1994 y **(d)** perfil completo, diciembre de 1994.

supratidal zone, the complete profile is flatter, with a 2.5%-mean slope, decreasing the supratidal beach zone. Table 1 shows the length of the profiles P-19 (L_a) and P-45 (L_c), verifying the difference between both cases.

In the figure 5 (a, b, c, d) the intertidal zone best fits for the Victoria beach profiles are shown. For each case the Dean equilibrium profile was used and the value of the A parameter was calculated. In table 1, these values and the relation between the A parameter of profiles P-45 (A_c) and P-19 (A_a) are presented. The values obtained (2.68, in June, and 2.57, in December) are within the interval predicted by the Muñoz-Pérez *et al.* model (1999). The analysed profiles validate this model and make clear the influence of the rocky platform situated in the subtidal zone over the profile morphology.

Seasonal variations in the profile

The existence of a submerged rocky platform controls the energy flux that reaches the beach. In this way, the influence of

perfil se aproxima a un perfil de Dean, ecuación (1), la expresión (2) quedará:

$$\frac{A_a}{A_c} = \left[\frac{\gamma}{\Gamma} \right]_{h_r}^2 \quad (3)$$

Para una plataforma amplia ($X \sim \infty$), los valores típicos de Γ varían entre 0.35–0.55 (Nelson, 1994). El parámetro γ oscila entre 0.65–1.1, tomando un valor promedio de 0.79 (Kaminsky y Kraus, 1993). Teniendo en cuenta estos valores, la relación obtenida entre los parámetros de forma de los perfiles (A_a / A_c) oscilará entre valores de 1.2 a 3.2.

En el presente trabajo, se tomaron dos perfiles característicos en la playa Victoria (fig. 2), el perfil P-19 situado más al norte y, por tanto, afectado por la laja, y el perfil P-45 situado más al sur y que comprende un perfil completo. Esto permitía establecer las diferencias morfológicas entre ambos, verificando además la validez de la formulación propuesta por Muñoz-Pérez *et al.* (1999).

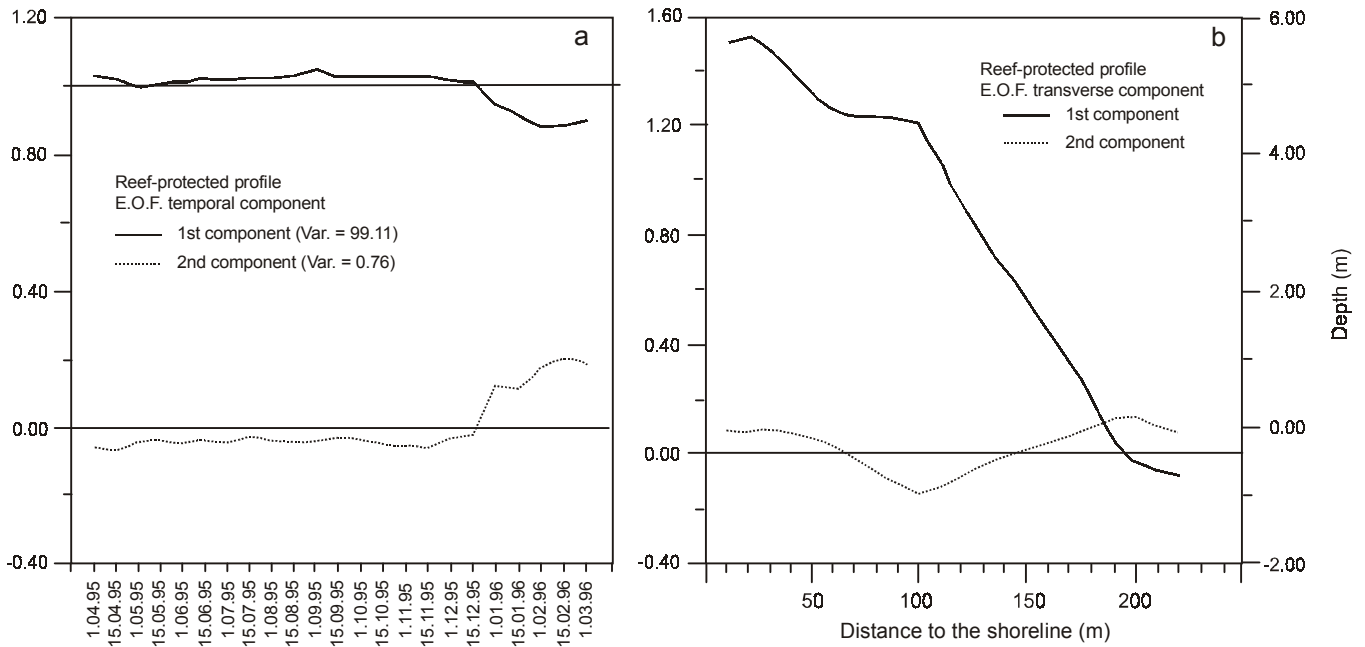


Figure 6. Results of the application of the empirical orthogonal functions (EOF) method to the reef-protected profile (P-19): (a) temporal component, and (b) transverse component.

Figura 6. Resultados de la aplicación del método de las funciones ortogonales empíricas (EOF) al perfil apoyado (P-19): (a) componente temporal, y (b) componente transversal.

the geologic setting in the beach profile is not only clearly shown in the profile slope but in its seasonal oscillations associated to wave climate changes as well. For the mid-term changes study, the empirical orthogonal eigenfunctions method (EOF) was applied to analyze fortnightly measures of the profiles P-19 and P-45 carried out during the period including April 1995 and March 1996. Figure 6 shows the results for the reef-protected profile and figure 7 for the complete profile.

Figures 6a and 7a present the temporal components of the analysis. In both cases the 1st component explains 99% of the data variance and has a constant value for most of the monitoring. However, it diminishes in December 1995 until it reaches a new constant value. These changes are reflected in the morphology of the profiles P-19 and P-45 as a generalised and parallel retreat of the entire profile. The 2nd temporal component explains a very small percentage of the data variance (0.76 in the reef-protected profile and 0.40 in the complete profile) but it is reflected in the profile morphology as a slope change. This component changes its trend in December 1995, defining a slope change during the summer-winter transition. Taking into account the transverse component (fig. 6b), the slope change in the reef-protected profile, allows us to differentiate three zones. These are: the berm, and the upper and lower parts of the intertidal zone. The zero crossing of the 2nd transverse component is around the +2.00 m depth (fig. 6b), defining the position of a pivoting point, that is invariable in time and over which the beach profile oscillates. In the complete profile, the transverse component (fig. 7b) does not define so clearly the

En la figura 4a, b, se comparan ambos perfiles para las campañas analizadas. Se observan diferencias morfológicas importantes entre el perfil completo (P-45) y el perfil apoyado (P-19), tanto para la campaña de junio (fig. 4a), como para la de diciembre (fig. 4b). Así, se puede observar la diferencia de pendiente entre estos dos perfiles, sometidos a las mismas condiciones de oleaje y marea, tal y como predice el modelo analítico. Mientras, el perfil con laja (P-19) presenta una pendiente media en la zona intermareal de un 4.5%, dando lugar a una zona supramareal más amplia; el perfil sin laja es mucho más tendido con una pendiente media del 2.5%, disminuyendo la zona supramareal de la playa. En la tabla 1 se presenta la longitud correspondiente al perfil P-19 (L_a) y al perfil P-45 (L_c), para las campañas estudiadas, verificándose la diferencia existente entre ambos casos.

En la figura 5 (a, b, c, d) se presentan los ajustes realizados al tramo intermareal de los perfiles estudiados en la playa Victoria. Se utilizó el perfil de Dean y se obtuvo el valor del parámetro A para cada caso. En la tabla 1, se presentan estos valores así como la relación entre el parámetro de forma del perfil P-45 (A_c) y el perfil P-19 (A_a). Los valores obtenidos (2.68, para el mes de junio, y 2.57, para el mes de diciembre) se sitúan dentro del intervalo que predice el modelo de Muñoz-Pérez *et al.* (1999). Por tanto, los perfiles analizados validan dicho modelo y ponen de manifiesto la influencia que la existencia de una sustrato rocoso en la zona submareal tiene sobre la morfología del perfil.

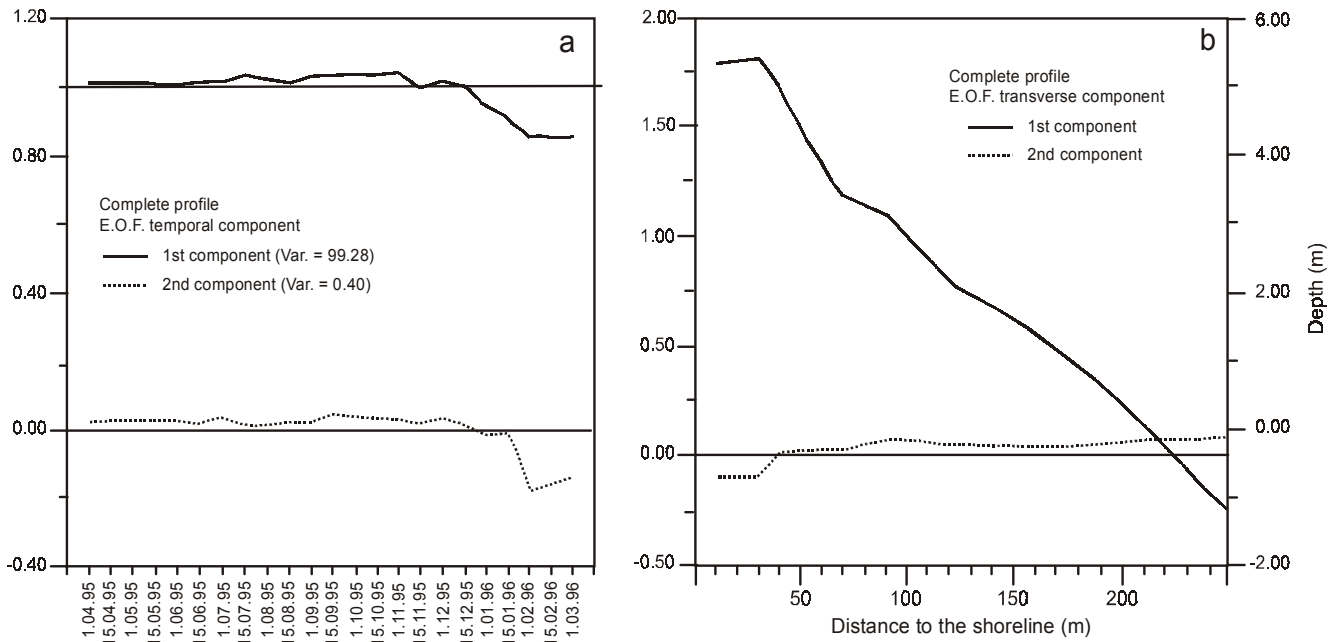


Figure 7. Results of the application of the empirical orthogonal functions method (EOF) to the complete profile (P-45): **(a)** temporal component, and **(b)** transverse component.

Figura 7. Resultados de la aplicación del método de las funciones ortogonales empíricas (EOF) al perfil completo (P-45): **(a)** componente temporal, y **(b)** componente transversal.

slope change, since the pivoting point in the profile P-45 is located at the greatest depth measured (-1.00 m).

The seasonal variations of dynamic phenomena, essentially the wave climate, induce a beach response. The beach morphology adapts to changing conditions, smoothing the profile slope from summer to winter conditions. This slope decrease can be represented by a profile tilt in respect to a fix point, being different to complete and reef-protected profiles. This seasonal evolution varies in function of the different dissipation processes along each profile.

In the reef-protected profile, the constant depth rocky platform constrains the amount of energy that reaches the profile, marking out a threshold value of the maximum incident wave height, H_{max} . When the wave height is higher than this threshold value before the breakers, the rocky bottom friction dissipates the excess of energy, reaching the limit value, H_{max} , determined by the evolution model ($H_a = \Gamma \text{ hr}$). For wave heights lower than the threshold value ($H < H_{max}$), the energy that reaches the complete and the reef-protected profiles is similar. However, while the active profile in the reef-protected beaches is restricted between the berm and the point B (fig. 3), the active profile in complete beaches is placed between the berm and a point in the subtidal zone determined by the wave climate. Although the energy level is similar, the sand volume that is mobilised is greater in the complete profile. This determines the position of the pivot point around which the profile rotates downward in the winter-summer transition, being higher in the reef-protected profile (fig. 6b) where it coincides with the middle point of the intertidal zone (at about +2.00 m),

Variaciones estacionales del perfil

Como hemos visto, la existencia de un sustrato rocoso sumergido determina el flujo de energía que alcanza la playa. De este modo, la influencia del entorno geológico en el perfil de playa no sólo se manifestará en la pendiente del perfil, sino también en las oscilaciones estacionales del mismo asociadas a las variaciones del oleaje. Para analizar estos cambios de medio plazo, se aplicó el método de las funciones ortogonales empíricas (EOF) a las medidas quincenales realizadas en los perfiles P-45 y P-19 durante el periodo comprendido entre abril de 1995 y marzo de 1996. En la figura 6, se presentan los resultados para el perfil apoyado y en la figura 7, para el perfil completo.

En las figuras 6a y 7a se presentan las componentes temporales, en ambos casos la 1ª componente explica el 99% de varianza de los datos. Dicha componente presenta un valor casi constante a lo largo de la mayor parte del periodo de mediciones hasta finales de diciembre de 1995 donde se produce una disminución hasta alcanzar un nuevo valor constante. Estos cambios se reflejan en la morfología de los perfiles P-19 y P-45, como un retroceso generalizado de todo el perfil paralelo a sí mismo. La 2ª componente temporal explica un porcentaje de la varianza bastante menor (0.76 para el perfil con laja, 0.40 para el perfil completo), pero se refleja en la morfología de estos perfiles como un basculamiento o cambio de pendiente. Esta componente cambia de signo a mediados del mes de diciembre de 1995, definiendo un cambio de pendiente en la transición verano-invierno. Teniendo en cuenta la componente transversal (fig. 6b), en el perfil con laja podemos definir el

higher than in the complete profile (fig. 7b), located at the -1.00 m depth.

Generally, the arrival of high and steep waves helps the seaward motion of sand grains. The complete profile adapts to increasing waves, decreasing its slope, as it lacks a rigid protection. In the reef-protected profile, the sand moves over the rocky platform, generating a temporary retreat of the active profile. Figure 6a justifies the retreat of the profile for increasing energetic conditions. The typical seasonal decrease in slope is superimposed in the profile retreat.

Conclusions

The analysis of the data measured at Victoria beach has demonstrated the influence exerted by a submerged rocky platform exerts on the profile morphology, determining its behaviour. The different models of equilibrium profile assume several hypotheses that are not always valid. In some beaches, the geologic setting determines its shape and seasonal evolution.

The main morphological differences between the reef-protected and the complete profiles, with similar dynamic conditions (waves and tides) have been established. The mean slope of the complete profile is smoother than the one in the reef-protected profile. In the profiles studied, it varies from a value of 2.5% in the complete profile to a 4.5% slope in the reef-protected profile. The study of the P-19 and P-45 profiles has allowed verifying the validity of the formulation proposed by Muñoz-Pérez *et al.* (1999) which predicts the slope difference between both profiles.

In general terms, the winter-summer oscillations generate a decrease in slope, because of the tilting around the mean point of the active profile. There is an important difference in the position of this point, when comparing reef-protected and complete profiles. In the reef-protected profile, the mean point is situated in the beachface, whilst in the complete profile, this point is situated around the spring low tide level.

The reef-protected profile suffers a retreat in its active profile, because of the seaward material displacement in response to high waves. The complete profile, due to the greater sand volume moved during the seasonal variations, modifies its slope gradually, varying firstly the zones associated to high and low tide levels.

The geologic setting and the wave propagation along the beach profile play an important role in the determination of its final shape, being possible to obtain an analytic equilibrium profile model that incorporates the existence of a rocky platform in the subtidal zone.

Acknowledgements

The authors acknowledge to José M. Gutiérrez Más his invaluable advice in the geologic aspects of this work. The

proceso de basculamiento, diferenciándose tres zonas a lo largo del perfil: la berma de coronación, y las partes superior e inferior del intermareal. El cruce por cero de la 2ª componente transversal se produce alrededor de la cota $+2.00$ m (como se marca en la fig. 6b), definiendo la posición de un punto pivote, cuya posición no varía en el tiempo y sobre el que oscila el frente de playa. En el perfil completo, la componente transversal (fig. 7b) no define tan claramente el cambio de pendiente ya que el punto pivote del perfil P-45 se encuentra situado en la cota límite medida, alrededor de la cota -1.00 m.

Las variaciones estacionales de los fenómenos dinámicos, fundamentalmente el oleaje, generan una respuesta en la playa tanto en la zona protegida por el sustrato rocoso como en el resto. La morfología se adapta a las condiciones cambiantes, suavizando la pendiente del perfil al pasar de condiciones de bonanza a condiciones más energéticas. Esta disminución de pendiente se produce mediante el basculamiento del perfil respecto a un punto fijo, el cual cambia entre el perfil completo y el perfil apoyado. Esta evolución estacional varía en función de los distintos procesos de disipación que tienen lugar a lo largo de cada perfil.

En el perfil apoyado, la presencia de una laja rocosa de profundidad constante limita la energía que alcanza el perfil, puesto que acota la altura de ola máxima incidente, H_{max} . Cuando, antes de la rotura, se produzcan alturas superiores a este valor máximo ($H > H_{max}$), la fricción con el fondo rocoso de escasa profundidad disipará la energía excedente hasta alcanzar el valor límite de H_{max} , determinado por el modelo de evolución ($H_a = \Gamma h_r$). Para alturas inferiores al valor máximo acotado por la laja ($H < H_{max}$), la energía que alcanza el perfil apoyado y el perfil completo será similar. Sin embargo, mientras en playas apoyadas el perfil activo queda delimitado entre la berma de la playa y el punto B (fig. 3), en playas completas, el perfil activo se sitúa entre la berma y un punto en la zona submareal que viene marcado por el propio oleaje. Por tanto, a pesar de que el nivel de energía es el mismo, el volumen de arena que se moviliza es mucho mayor en el perfil completo. Esto determina la posición del punto pivote sobre el que basculan los perfiles en su transición invierno-verano, siendo más elevado en el caso del perfil apoyado (fig. 6b), donde coincide con el punto medio del intermareal, alrededor de la cota $+2.00$ m, que en el perfil completo (fig. 7b) donde se sitúa sobre la cota -1.00 m.

En general, la llegada de olas suficientemente grandes y peraltadas favorece la movilización de los granos de arena en dirección hacia el mar. El perfil completo, puesto que carece de una defensa natural rígida, se adaptará a las alturas de onda cada vez mayores, disminuyendo su pendiente. En el perfil apoyado, la arena viaja sobre la laja, generando un retroceso temporal del perfil activo. En la figura 6a se justifica el retroceso generalizado que sufre el perfil en la transición hacia condiciones de mayor energía. La disminución de pendiente, característica de la evolución estacional, se superpone al retroceso del perfil.

field data have been kindly provided by the Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente). The first author is partially supported by the Xunta de Galicia under the projects PGIDT00MAR30103PR and PGIDT00PX130105PR and by the project CICYT REN2000-1102 MAR. This is the work number 232 of the research group EX1 of the University of Vigo. The third author was partially funded by project CICYT AMB-99-0543.

References

- Andersen, O.H. and Fredsoe, J. (1983). Transport of suspended sediment along the coast. Progress Report n° 54, Inst. of Hydrodynamics and Hydraulic Eng., ISVA, Tech. Univ. of Denmark: 33–46.
- Bernabeu, A.M. (1999). Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas. Tesis Doctoral, Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y del M.A., Universidad de Cantabria, 170 pp.
- Bodge, K. (1992). Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *J. Coast. Res.*, 8–1: 47–55.
- Brunn, P. (1954). Coast erosion and the development of beach profiles. Beach Erosion Board, Tech. Memo. N° 44.
- Dean, R.G. (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and gulf coasts. Ocean Eng. Tech. Rep. N° 12, University of Delaware.
- Dean, R.G. (1987). Coastal sediment processes: Toward engineering solutions. Proc. ASCE, Specialty Conference on Coastal Sediments'87.
- Dean, R.G. (1991). Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *J. Coast. Res.*, 7–1: 53–84.
- González, E.M. (1995). Morfología de playas en equilibrio: planta y perfil. Tesis Doctoral, Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y del M.A., Universidad de Cantabria.
- Gutierrez-Más, J.M., Martín-Algarra, A., Domínguez-Bella, S. y Moral Cardona, J.P. (1991). Introducción a la geología de la provincia de Cádiz. Serv. Publ. Universidad de Cádiz.
- Inman, D.L., Elwany, M.H.S. and Jenkins, S.A. (1993). Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, n° C10: 18181–18199.
- Kaminsky, G.M. and Kraus, N.C. (1993). Evaluation of depth-limited wave breaking criteria. Proc. Ocean Waves Measurements WAVES'93, ASCE: 180–193.
- Komar, P.D. and McDougal, W.G. (1994). The analysis of exponential beach profiles. *J. Coast. Res.*, 10–1: 59–69.
- Larson, M. (1991). Equilibrium profile of a beach with varying grain size. Coastal Sediments'91, ASCE: 905–919.
- Muñoz-Pérez, J.J. (1996). Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas. Tesis Doctoral, Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Cádiz.
- Muñoz-Pérez, J.J., Tejedor, L. and Medina, R. (1999). Equilibrium beach profile model for reef-protected beaches. *J. Coast. Res.*, Vol. 15, No. 4: 950–957.
- Nelson, R.C. (1994). Depth limited design wave heights in very flat regions. *Coast. Eng.*, Vol. 23: 43–59.
- Pilkey, O.H., Young, R.S., Riggs, S.R., Smith, A.W.S., Wu, H. and Pilkey, W.D. (1993). The concept of shoreface profile of equilibrium: A critical review. *J. Coast. Res.*, 9–1, pp. 255–278.

Conclusiones

El análisis de los datos recogidos en la playa Victoria ha demostrado la influencia que la existencia de un sustrato rocoso sumergido ejerce sobre la morfología del perfil de playa. Por tanto, la hipótesis asumida por los distintos modelos de perfil de equilibrio, donde se considera que el entorno geológico no tiene influencia en la forma del perfil, no siempre es válida.

Se han establecido las principales diferencias morfológicas existentes entre un perfil apoyado y un perfil completo sometidos a las mismas condiciones dinámicas (oleaje y marea). La pendiente media del perfil completo es más tendida que la del perfil apoyado. En los perfiles estudiados varía desde un valor de 2.5% para el perfil completo a una pendiente del 4.5% para el perfil apoyado. El estudio de los perfiles P-19 y P-45, pertenecientes a la playa Victoria (Cádiz), ha permitido verificar la bondad de la formulación propuesta por Muñoz-Pérez *et al.* (1999), la cual predice esta diferencia de pendiente.

Las oscilaciones estacionales generan, en términos generales, una disminución de la pendiente debido al basculamiento alrededor del punto medio del perfil activo. Se establece una diferencia importante en la posición de dicho punto. Para el perfil apoyado, se sitúa en el punto medio del frente de playa, mientras que para el perfil completo dicho punto se sitúa más abajo, alrededor de la cota de bajar viva.

El perfil con laja sufre un retroceso de su perfil activo, debido al desplazamiento de parte del material hacia el sustrato rocoso como respuesta a alturas de ola grandes. El perfil completo, debido al mayor volumen de arena que se debe movilizar durante las variaciones estacionales, modifica su pendiente de forma gradual, variando inicialmente los tramos correspondientes a la cota de pleamar y de bajar.

El entorno geológico y la propagación del oleaje a lo largo del perfil juegan un papel decisivo en la determinación de la forma final del mismo, siendo posible obtener un modelo analítico de perfil de equilibrio, incorporando la existencia de una sustrato rocoso en el submareal del perfil.

Agradecimientos

Los autores agradecen a José Manuel Gutiérrez Más su inestimable asesoramiento en los aspectos más geológicos de este trabajo. La Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente cedió amablemente los datos utilizados. R.M. agradece al Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto CICYT AMB-99-0543) la financiación recibida para la realización de este trabajo. A.M.B. ha sido parcialmente financiado por la Xunta de Galicia (proyectos PGIDT00MAR30103PR y PGIDT00PX130105PR) y por el proyecto CICYT REN2000-1102 MAR. Este trabajo es el número 232 del grupo de investigación EX1 de la Universidad de Vigo.

Traducido al español por los autores.