

Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México

Alternation of beach erosion/accretion cycles related to wave action off Rosarito, Baja California, Mexico

R Lizárraga-Arciniega*, A Martínez-Díaz de León, O Delgado-González, CR Torres, LA Galindo-Bect

Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Km 103 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada CP 22830, Baja California, México. * E-mail: jroman@uabc.mx

Resumen

Se analizaron 1860 perfiles de playa levantados mensualmente en 29 puntos de control entre octubre de 1995 y diciembre de 2003 en la costa de Playas de Rosarito (Baja California, México). Se estimaron los volúmenes mensuales de arena en la playa subaérea y se relacionaron con registros de olas en mar abierto en California y en aguas cercanas a la costa en dos localidades frente a Rosarito. En el análisis espectral de las series de tiempo de volumen de arena se identificaron dos picos espectrales importantes cuyos periodos son de 12 y 36 meses, respectivamente. Este último se identificó por primera vez en las playas de Rosarito y mostró una amplitud ligeramente mayor en las playas cercanas al rompeolas de la Comisión Federal de Electricidad y en las playas en la parte sur del área de estudio. La contribución al movimiento de arena producido por el ciclo anual fue de $80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$, mientras que el transporte inducido por el ciclo de 36 meses fue de $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. El ciclo de erosión y acreción se presentó en invierno y verano, respectivamente, pero en dos localidades este ciclo se muestra invertido. El ciclo estacional del cambio en el volumen de arena, definido en términos del número de Dean ($\Omega = H_s/w_s T$), está controlado por la estacionalidad en las características del oleaje, mientras que en el ciclo invertido es controlado por los cambios locales en la morfología de la costa y por el ángulo de ataque de las olas rompientes. El factor que ayuda a explicar el ciclo de 36 meses está relacionado con los patrones interanuales de oleaje y éstos a su vez con la ocurrencia de eventos ENSO.

Palabras clave: ciclo de playa, erosión/acreción de playa, clima de oleaje, Rosarito, Baja California.

Abstract

A total of 1860 beach profiles were surveyed monthly from October 1995 to December 2003 at 29 control points along the coast of Rosarito (Baja California, Mexico). Sand volumes were estimated for the subaerial beach and related to deep-water wave records off California and nearshore waters at two localities off Rosarito. The spectral analysis of the sand volume time series revealed two main spectral peaks of 12- and 36-month periods. The latter cycle was identified for the first time along Rosarito beaches, showing a slightly larger amplitude on the beaches near the Federal Electricity Commission's breakwater and in the southern part of the study area. The contribution to sand movement produced by the annual cycle was $80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$, while the transport induced by the 36-month cycle was $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. The erosion and accretion cycle corresponded to winter and summer, respectively, but this pattern was inverted at two localities. The annual or seasonal cycle of sand volume change, defined in terms of the Dean number ($\Omega = H_s/w_s T$), is controlled by the seasonal wave pattern, while the inverted cycle is due to local changes in beach morphology and approach angle of breaking waves. The factor that accounted for this cycle is associated with interannual wave pattern variations and this, in turn, with ENSO events.

Key words: beach cycles, beach erosion/accretion, wave climate, Rosarito, Baja California.

Introducción

El municipio de Playas de Rosarito, en adelante Rosarito, es uno de los corredores turísticos de mayor importancia en el noroeste de Baja California y de México. La franja costera de este municipio se encuentra bajo una constante presión de uso de suelo por una población que creció al 7.7% anual en el periodo de 1995 a 2000 (COPLADE 2002). La rápida y extensiva construcción de infraestructura habitacional, industrial y recreativa al borde de cantiles costeros y aun sobre la cara de la playa ha sido producto de un crecimiento

Introduction

The municipality of Rosarito Beach, henceforth referred to as Rosarito, is a major tourist destination in northwestern Baja California (Mexico). Its coastal fringe is under constant land use pressure by a population that increased 7.7% during the period 1995–2000 (COPLADE 2002). The rapid and extensive construction of residential, industrial and recreational infrastructure along the coastal cliffs and even on the beach face has occurred without appropriate development planning. Despite the importance of the Rosarito beaches for the economic and

pobremente planificado. A pesar de la importancia que tienen las playas de Rosarito para el desarrollo económico y social de su comunidad, poco se conoce sobre los cambios en el frente de playa en el corto, mediano y largo plazo, así como de los agentes que los producen.

Los cambios de playa erosionales o acrecionales que ocurren en el corto plazo están asociados con eventos aislados, ocasionalmente catastróficos y, por lo tanto, no periódicos. Un evento de esta naturaleza se presentó en las playas de Rosarito durante el invierno 1998, bajo condiciones de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), el cual ocasionó pérdidas de arena hasta de $6.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y retrocesos de la línea de playa de hasta 2.3 m día^{-1} (Lizárraga-Arciniega *et al.* 2003). Los cambios de playa en el mediano plazo usualmente presentan patrones cíclicos de erosión o acreción a intervalos relativamente regulares, aunque no en un sentido estricto pues en el lapso de algunos años la forma del perfil no es exactamente igual a la inicial (Eliot y Clarke 1989, Jiménez *et al.* 1997). Los cambios de largo plazo se consideran variaciones que ocurren en lapsos de décadas y los factores que los inducen están asociados a patrones cambiantes en el suministro de arena o al nivel relativo del nivel del mar (Jiménez *et al.* 1997). Delgado-González *et al.* (2005) señalan que en playas asociadas a lagunas costeras, además de los factores indicados, la variación en el prisma de marea puede ser factor de control en la erosión o acreción de playas.

El propósito de este trabajo fue determinar los cambios de mediano plazo del volumen de arena en la playa subaérea de Rosarito y su relación con la climatología del oleaje que llega a esa zona.

Área de estudio

Rosarito se encuentra 15 km al sur de Tijuana y la frontera con California, EUA. El área de estudio fue el litoral desde San Antonio del Mar hasta Punta La Paloma, con una extensión aproximada de 11 km (fig. 1). La línea de costa es relativamente recta y el depósito costero de arena del cuaternario sobre el que parcialmente se asienta la principal mancha urbana de Rosarito se estrecha hacia el norte hasta su límite con un derrame basáltico. La costa está parcialmente protegida de las condiciones oceánicas por las Islas Coronado, tres cuerpos insulares cuyos ejes longitudinales miden 1, 1.8 y 3.6 km, y que se encuentran 14 km mar adentro frente a Rosarito dando lugar a una compleja topografía submarina entre ellos y el bloque peninsular (fig. 1). Frente a la Planta Termoelectrica Juárez de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se encuentran un rompeolas en forma de *J* y un par de espigones que dan cuerpo a la toma de agua de enfriamiento para la planta y que obstaculizan el transporte litoral de arena generando zonas preferentes de acumulación.

En la sección norte del área de estudio son comunes extensos muros costeros que protegen el pie del cantil sobre el que se asienta la infraestructura residencial. Las playas están

social development of the community, little is known about the short-, medium- and long-term beach changes and the agents causing them.

Short-term beach erosion or accretion is associated with isolated, nonperiodic events that can occasionally be catastrophic. Such an event occurred along the coast of Rosarito during the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) winter of 1998, causing sand losses of up to $6.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ day}^{-1}$ and shoreline retreat of up to 2.3 m day^{-1} (Lizárraga-Arciniega *et al.* 2003). Medium-term beach changes usually present cyclical erosion or accretion patterns at relatively regular intervals, though not in a strict sense since after a few years the profile is not exactly the same as the initial one (Eliot and Clarke 1989, Jiménez *et al.* 1997). Long-term changes are considered variations that occur over time scales of decades and the factors causing them are related to changing patterns in sand supply or relative sea level (Jiménez *et al.* 1997). Delgado-González *et al.* (2005) indicated that in coastal lagoons, apart from the factors mentioned, variations in the tidal prism could be a factor controlling beach erosion or accretion.

This study aimed to determine the medium-term changes in the volume of sand of the subaerial beach in relation to wave climatology on the coast of Rosarito.

Study area

Rosarito is located 15 km south of the border between Tijuana (Mexico) and California (USA), on the Pacific coast of the Baja California Peninsula. The study area comprises an approximately 11-km-long stretch of coastline between San Antonio del Mar and Punta La Paloma (fig. 1). The coast is relatively straight and the Quaternary sand deposit, over which most of the urban sprawl extends, narrows northwards until reaching a basaltic spill. The coast is partially protected from ocean conditions by the three Coronado Islands (longitudinal axes of 1, 1.8 and 3.6 km) situated 14 km off Rosarito, giving rise to a complex underwater topography between them and the mainland (fig. 1). In front of the Juárez thermoelectric plant of the Federal Electricity Commission (Comisión Federal de Electricidad, CFE), a *J*-shaped breakwater and a pair of piers, which form part of the cooling water intake structure, obstruct littoral transport and produce areas of preferential sand accumulation.

Vast seawalls protecting the cliff base on which the residential infrastructure sits are more common in the northern part of the study area, where the beaches are composed of sedimentary material ranging in size from medium sand to pebbles; at some sites rocky igneous outcrops form headlands. To the south of the breakwater, the cliffs disappear and there are fewer seawalls, and the beaches tend to be wider and entirely sandy.

The highly-seasonal Guagatay and Rosarito streams drain a basin of approximately 126 km^2 and are the main source of sand to the littoral system (Pou-Alberú and Pozos-Salazar 1992, Appendini-Albretchen 1998); their mouths are located 2000 and 4000 m to the south of the CFE breakwater.

constituidas por material sedimentario que varía en tamaño desde arena media hasta canto rodado y en algunas localidades se observan afloramientos rocosos ígneos formando salientes de la línea de costa. Hacia el sur del rompeolas los cantiles se desvanecen, las playas tienden a ser más anchas y exclusivamente arenosas, y los muros costeros son menos numerosos.

Los arroyos Guaguatay y Rosarito, con flujos fuertemente estacionales, drenan una cuenca de aproximadamente 126 km² y son las principales fuentes de arena al sistema litoral (Pou-Alberú y Pozos-Salazar 1992, Appendini-Albretschsen 1998); sus desembocaduras se encuentran a 2000 y 4000 m al sur del rompeolas.

Métodos

Los cambios de mediano plazo en el volumen de arena de playa se estudiaron a partir del análisis de 1860 perfiles de playa que se levantaron mensualmente de octubre de 1995 a diciembre de 2003 en 29 puntos de control separados a distancias variables a lo largo de la playa bajo estudio (fig. 1). Los levantamientos se efectuaron con nivel fijo, estadal y cinta métrica usando como datum de referencia el nivel de bajamar media inferior (NBMI) y se efectuaron durante la marea más baja del mes durante el día.

Para cada perfil se calculó el volumen de arena contenido por arriba del NBMI y para identificar las características periódicas de la serie de tiempo, los volúmenes calculados se transformaron al campo de frecuencias mediante un análisis espectral utilizando el método de promediado de los periodogramas de Welch (1967). Para estimar la contribución de cada una de las frecuencias más energéticas al movimiento de arena, a cada una de las series de tiempo de volumen de arena se ajustó una función seno con dichas frecuencias.

Para determinar la influencia del oleaje en los cambios de volumen de arena se analizaron datos de altura, periodo y dirección de propagación de las olas de tres fuentes de información: de la boya 071 del Programa de Información de Datos Costeros (CDIP 2004), localizada frente a Punta Concepción, California, EUA, de donde se obtuvieron registros históricos (marzo de 1995 a marzo de 2002) a los que se aplicó la técnica de análisis espectral para identificar patrones recurrentes de altura (energía); de la CFE, generados con un sensor de presión autónomo (Sea Data 12) instalado frente a su rompeolas, a 10 m de profundidad, de junio de 1995 a enero 1999, y de los que se obtuvieron promedios estacionales de altura, periodo y dirección de viaje de las olas; y, por último, de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) se obtuvieron datos de octubre de 2002 a julio de 2003 con un sensor de oleaje (Analizador Doppler de presión, tipo Triton) a 10 m de profundidad frente a la localidad El Oasis ubicada a 4 km al norte del rompeolas de la CFE, en particular para analizar la dirección de viaje de las olas.

El efecto acrecional o erosional del oleaje sobre el perfil de playa depende del nivel energético de las olas. Un indicador para predecir una u otra condición es el parámetro conocido

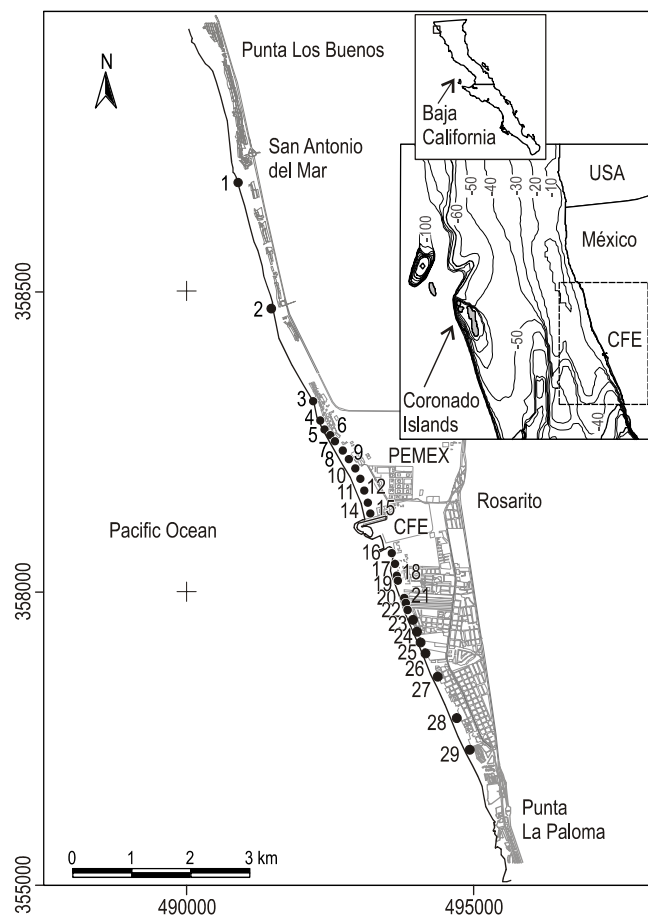


Figura 1. Área de estudio. Ubicación de los puntos de control en los que se midieron mensualmente los perfiles de playa. Nótese la compleja batimetría frente a la zona de estudio en el mapa inserto.

Figure 1. Study area and location of the control points where monthly beach profiles were surveyed. The inset shows the complex bathymetry off the study area.

Methods

Medium-term changes in sand volume were determined based on the analysis of 1860 beach profiles that were surveyed monthly from October 1995 to December 2003 at 29 unequidistant control points along the study area (fig. 1). The surveys were conducted using a fixed level, stadia rod and tape measure, and mean lower low water (MLLW) as reference datum. All measurements were made during the lowest tide of the month and during the day.

For each profile, the volume of sand contained above MLLW was calculated. To identify the periodic characteristics of the time series, the data were transformed to the frequency domain by spectral analysis using Welch's (1967) method of averaging modified periodograms. To estimate the contribution of each one of the more energetic frequencies to the movement of sand, a sine function with those frequencies was fitted to every sand volume time series.

To determine the relation between wave action and sand volume changes, we analyzed data of wave height, period and

como velocidad de asentamiento adimensional o número de Dean, cuya expresión es:

$$\Omega = H_s/w_sT$$

donde H_s es la altura significativa de la ola, w_s es la velocidad de asentamiento del sedimento y T es el periodo de la ola (Dean 1973). Este parámetro es ampliamente utilizado para predecir la formación de barras (erosión de playa) o de bermas (acreción de playa) (Dalrymple 1992).

El tamaño de grano del sedimento en la zona de estudio es arena media y sólo algunos segmentos de playa presentan canto rodado durante el invierno; sin embargo, en la mayoría de las playas la arena en la zona subaérea está presente prácticamente todo el año. Por ello, para estimar el número de Dean, se empleó un tamaño medio de grano de 0.34 mm (Carrillo-Berumen 1998).

Resultados

Los perfiles de playa presentaron cambios morfológicos con una marcada estacionalidad donde se observa que la máxima acreción fue en verano y la máxima erosión en invierno (fig. 2). La presencia de una berma fue típica del verano y la pendiente de la playa en su conjunto resultó ser mayor que en el invierno; en contraste, la ausencia de berma y la menor pendiente de la playa resultó ser el perfil típico de invierno. En la primavera y el otoño los perfiles mostraron una característica transicional entre las condiciones extremas de invierno y verano. Estos cambios ocurrieron en todos los puntos de control a lo largo de la playa, excepto en los puntos 2 y 3, en los que por primera vez se registró la estacionalidad

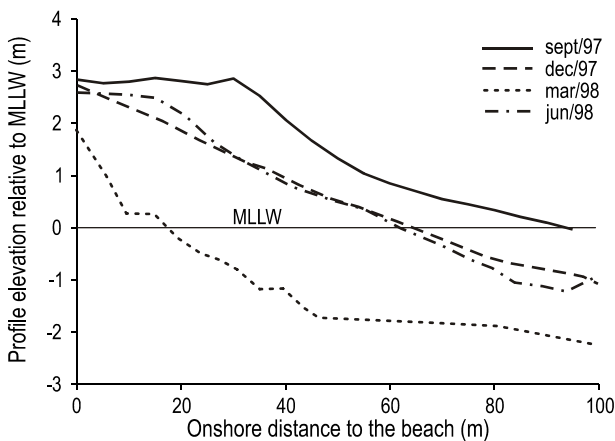


Figura 2. Perfiles de playa levantados en el punto de control 1. Estos perfiles son representativos de la morfología típica del perfil de playa en prácticamente todos los puntos de control del área de estudio para cada una de las estaciones del año.

Figure 2. Beach profiles surveyed at control point 1. These profiles are representative of the typical morphology of the beach profile in practically all control points in the study area for each season.

propagation direction from three sources. Firstly, the Coastal Data Information Program (CDIP 2004) yielded historical records (March 1995 to March 2002) for buoy 071, located off Point Conception (California, USA), which were subjected to spectral analysis to identify recurrent height (energy) patterns. Secondly, from the CFE database, generated by an independent pressure sensor (Sea Data 12) installed in the vicinity of the CFE breakwater at 10 m depth from June 1995 to January 1999, we obtained seasonal mean wave heights, periods and directions. Thirdly, the database of the Autonomous University of Baja California (UABC) for October 2002 to July 2003, generated by a wave pressure sensor (Triton Doppler analyzer) installed at 10 m depth off El Oasis, 4 km to the north of the breakwater, was used to analyze wave propagation behaviour.

The accretional or erosional effect of wave action on the beach profile depends on the energy level of the waves. An indicator used to predict one condition or the other is the parameter known as the nondimensional settling velocity or Dean number:

$$\Omega = H_s/w_sT$$

where H_s is the significant wave height, w_s is the sediment settling velocity and T is the wave period (Dean 1973). This parameter is widely used to predict the formation of bars (beach erosion) or the formation of berms (beach accretion) (Dalrymple 1992).

Medium sand is the main grain size in the study area, pebbles occurring in only a few segments of the beach during winter. Since at most sites the sand of the subaerial beach is present throughout most of the year, a mean grain size of 0.34 mm was used to estimate the Dean number (Carrillo-Berumen 1998).

Results

The beach profiles showed marked seasonal morphological changes, with maximum accretion occurring in summer and maximum erosion in winter (fig. 2). In summer, the presence of a beach berm was typical and the overall beach slope was greater than in winter. In contrast, the winter profile was characterized by the absence of a berm and gentler slope. In spring and autumn the profiles showed a transition between the extreme winter and summer conditions. These changes were observed at all the control points along the beach, except at points 2 and 3, which showed an inverted seasonality, with maximum accretion occurring in winter and maximum erosion in summer (fig. 3).

The spectral analysis of the volume time series revealed three dominant spectral peaks: one occurred with a period of less than one year, another with a period of one year and the third with a period of two to three years. The less than one-year peak occurred at the 29 control points but with little spectral power. The annual signal was observed at only 23 points but particularly at 11, and was relatively low at only 5. The two-to-three-year peak showed greater energy at only 8 of the 29

invertida, esto es, la máxima acreción se presentó en invierno y la máxima erosión en verano (fig. 3).

Del análisis espectral de las series de volumen resultaron tres picos dominantes de potencia espectral, uno con periodo menor a un año, otro con periodo de un año y el tercero con periodo entre dos y tres años. El pico con periodo menor a un año se presentó en los 29 puntos de control aunque con poca potencia espectral. La señal anual se notó en sólo 23 puntos, pero en particular en 11 de ellos, y sólo en 5 fue relativamente baja. El pico espectral con periodo entre dos y tres años mostró mayor energía en sólo 8 de los 29 puntos de control. En general, la limitación en el número de datos indica que el intervalo de confianza al 95% no permite establecer una diferencia significativa entre los periodos de recurrencia (fig. 4).

El ajuste de la función seno con periodos de un año y tres años de cada una de las series de tiempo del volumen resultó de mayor amplitud para el ciclo anual (fig. 5). La contribución máxima al movimiento de arena representada por la amplitud del seno con frecuencia de 12 meses fue de $79 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ de playa, y la mínima fue de $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. En contraste, la contribución máxima del ciclo de 36 meses fue de $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ y la mínima fue de $2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$. En general, la cantidad de varianza que explican

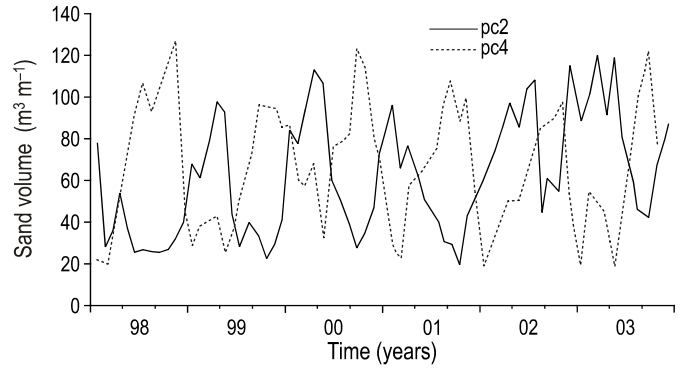


Figura 3. Ciclo estacional de playa. La línea punteada corresponde al ciclo "normal" y la línea llena al ciclo de playa "invertido" que se registró en el punto de control 2.

Figure 3. Seasonal beach cycle. The dotted line corresponds to the "normal cycle" and the black line to the inverted cycle observed at control point 2.

control points. In general, because of the limited number of data, it was not possible to establish significant differences between the recurring periods with the 95% confidence interval (fig. 4).

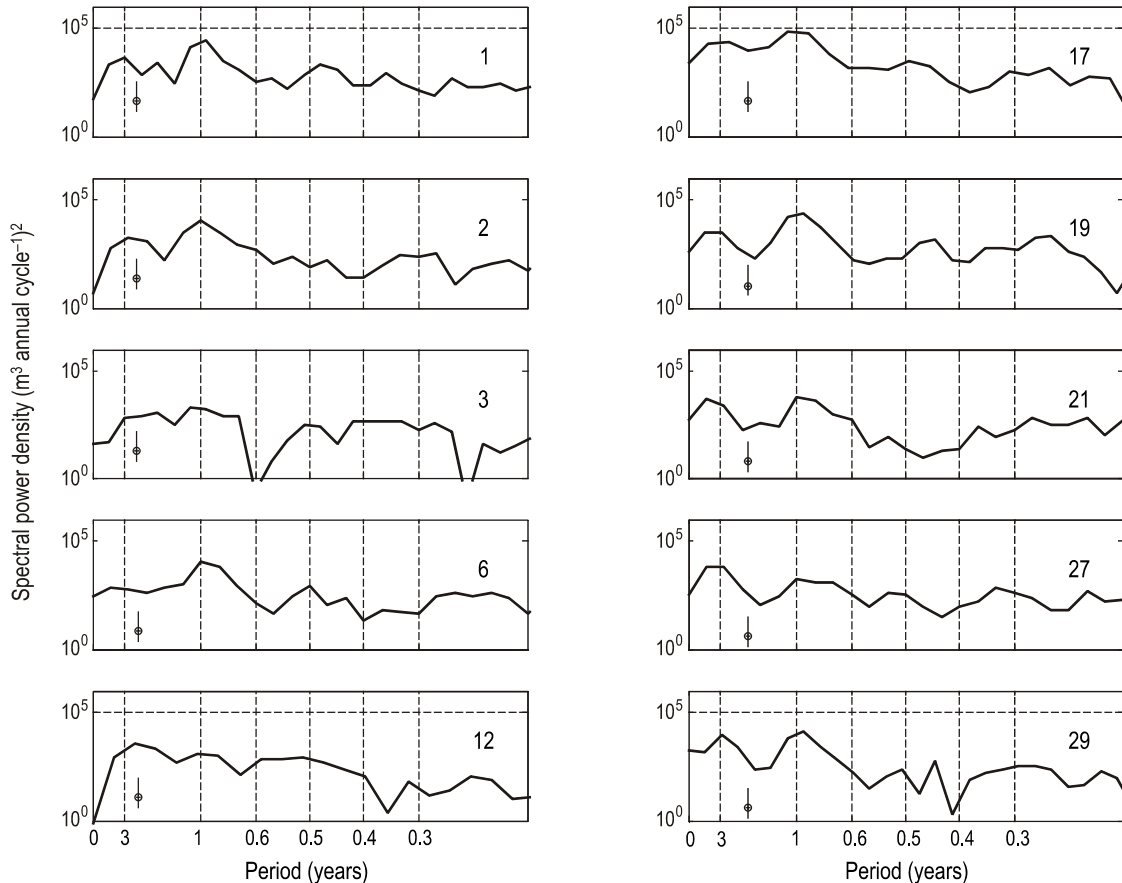


Figura 4. Espectros de las series de tiempo de volumen de arena en algunos puntos de control de la zona de estudio indicados con el número en la parte superior derecha de cada gráfica. La barra indica el intervalo de confianza al 95%.

Figure 4. Sand volume time series spectra for some control points (indicated by the number on the top right-hand corner of each plot) in the study area. The bar indicates the 95% confidence interval.

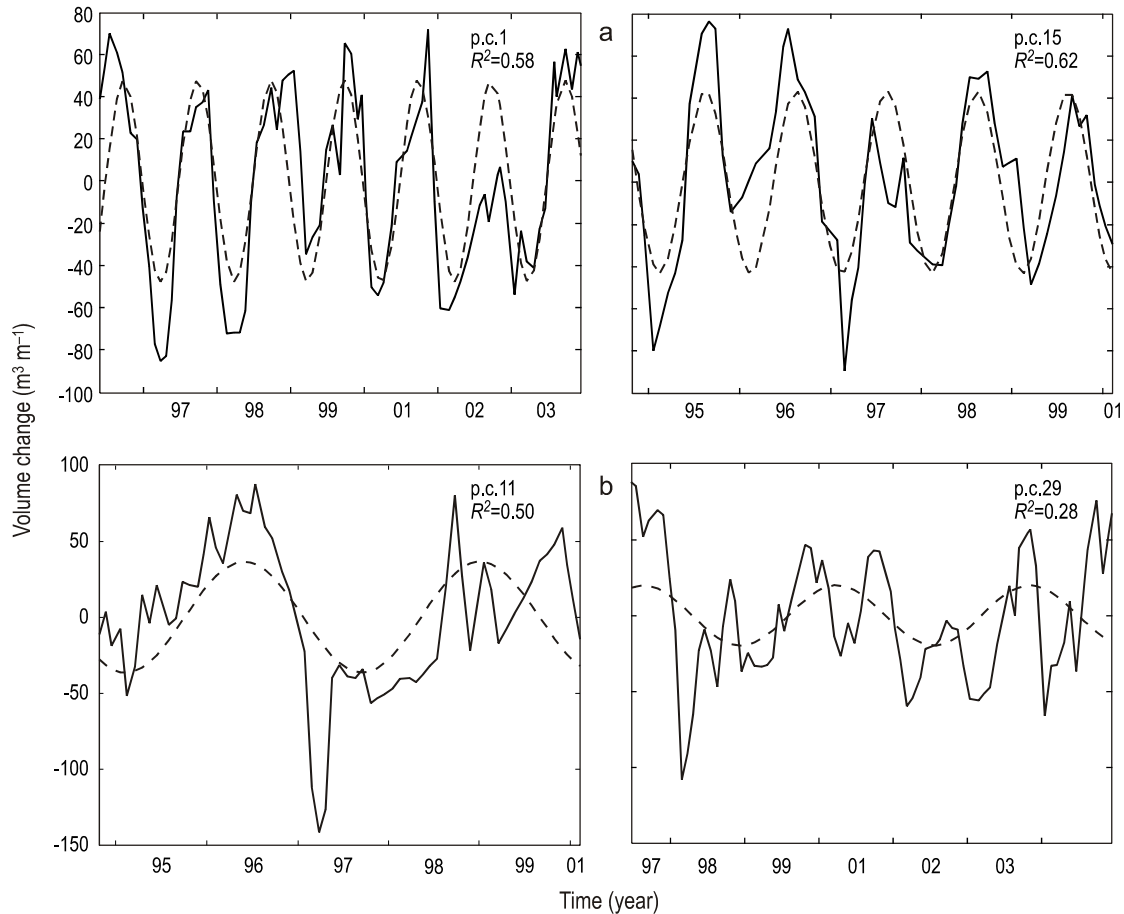


Figura 5. Mejores ajustes de la función seno (línea punteada) con periodo de 12 meses (a) y de 36 meses (b) para los puntos de control indicados; se señala también la cantidad de varianza explicada por el ajuste (R^2).
Figure 5. Best fits of the 12-month (a) and 36-month (b) sine function (dotted line) for control points 1, 15, 11 and 29. Also shown is the amount of variance explained by the fit (R^2).

estos ajustes (R^2) resultó mayor de 0.5 en 11 puntos de control para el ciclo anual, mientras que el R^2 máximo en el ajuste del seno con frecuencia de 36 meses fue de 0.5 sólo en el punto de control 11 y entre 0.1 y 0.4 en el resto.

Del análisis espectral de los registros de oleaje en condiciones de mar abierto frente a Punta Concepción (EUA) resultaron dos picos espectrales, uno con periodo de un año y otro con periodo de 2.8 años. En particular, las alturas significativas medias de las olas en los inviernos fue de 2.6 m, en los veranos de 1.7 m y en las primaveras y otoños de 2.1 m. La dirección de proveniencia de las olas en mar abierto fue de los cuadrantes NW y SW aunque con más frecuencia provenían del primero.

El registro de oleaje en aguas someras frente a la costa de Rosarito mostró un patrón estacional en las alturas de las olas (tabla 1). La altura media de las olas en los inviernos de 1994 a 1999 fue de 1.3 a 2.1 m, mientras que en los veranos de 1994 a 1998 ésta fue de 1.0 a 1.3 m, y en las primaveras y los otoños mostró un carácter transicional entre ambas, de 1.2 a 1.4 m. Generalmente, el número de Dean presentó valores mayores ($\Omega > 3.2$) en los inviernos, particularmente en los de 1995 y

The sine function with one- and three-year periods fitted to each of the volume time series showed greater amplitude for the annual cycle (fig. 5). The maximum contribution to sand movement represented by the amplitude of the 12-month sine function was $79 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ and the minimum was $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ of beach. In contrast, the maximum and minimum contributions of the 36-month cycle were 50 and $2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$, respectively. In general, the amount of variance explaining these fits (R^2) was greater than 0.5 at 11 control points for the annual cycle, while for the 36-month cycle it was 0.5 only at control point 11 and from 0.1 to 0.4 at the rest.

The spectral analysis of the wave data for open sea conditions off Point Concepción (USA) showed two spectral peaks, one occurring with a period of one year and the other with a period of 2.8 years. Significant mean wave heights were 2.6 m during winter, 1.7 m during spring and 2.1 m during spring and autumn. Swell direction was from the NW and SW quadrants, but more frequently from the former.

Shallow-water waves off the coast of Rosarito indicated a seasonal height pattern (table 1). Mean wave heights ranged from 1.0 to 1.3 m during the summers of 1994 to 1998 and

Tabla 1. Estacionalidad del oleaje indicado principalmente por la altura media (H_s), el periodo medio (T_z) y la dirección de aproximación en promedio (D) del oleaje en cada una de las estaciones frente a Rosarito en el periodo de junio de 1994 a enero de 1999.

Table 1. Seasonality of waves according to wave height (H_s), mean period (T_z), and mean wave approach direction (D) off Rosarito (Baja California) for the period from June 1994 to January 1999.

Season	H_s	T_z	D
Winter	1.7 ± 0.7	11.9 ± 1.7	225 ± 20
Spring	1.4 ± 0.6	11.6 ± 1.6	209 ± 24
Summer	1.1 ± 0.6	11.3 ± 1.5	204 ± 24
Autumn	1.2 ± 0.4	11.8 ± 1.5	213 ± 23

1998, menores ($\Omega < 3.2$) en el verano, y valores de transición en primavera y otoño (fig. 6).

El comportamiento interanual invernal del oleaje en mar abierto frente a la costa de California en términos de duración del arribo de oleaje de tormenta, mostró una variación relativamente periódica (fig. 7). Sobresale la mayor duración en el arribo del oleaje de tormenta en los inviernos de 1995 y 1998 cuyas olas con alturas medias respectivas de 2.5 y 3.1 m atacaron la playa. En contraste, en los inviernos de 1996–2002 (excepto en 1998) las tormentas fueron de menor duración y produjeron olas con alturas medias de 2.3 a 2.7 m.

Discusión

Los cambios cíclicos asociados con periodos menores de 0.5 años y que se presentaron en todos los puntos de control se han identificado principalmente como la respuesta a eventos individuales de tormenta. Larson y Kraus (1994) estimaron que

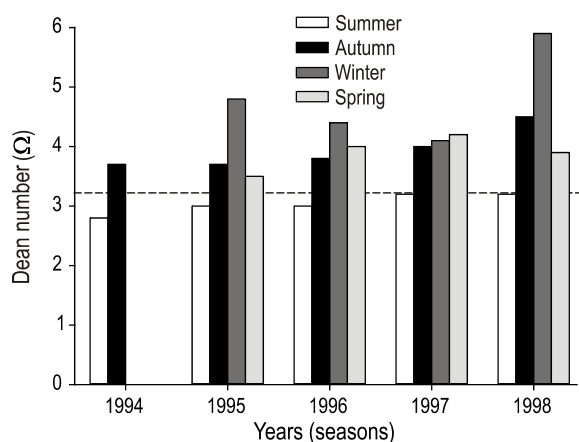


Figura 6. Promedio estacional del número de Dean. Sobresale la muy alta probabilidad de erosión de la playa ($\Omega \geq 3.2$) especialmente en los inviernos ENSO de 1995 y 1998 así como la muy alta probabilidad de acreción de playa ($\Omega \leq 3.2$) en los veranos.

Figure 6. Seasonal mean of the Dean number, showing the very high probability of beach erosion ($\Omega \geq 3.2$) especially during the 1995 and 1998 ENSO winters, as well as the very high probability of beach accretion ($\Omega \leq 3.2$) in summer.

from 1.3 to 2.1 m during the winters of 1994 to 1999, whereas during the spring and autumn seasons they showed transitional values relative to the first two, ranging from 1.2 to 1.4. The values of the Dean number were generally highest ($\Omega > 3.2$) in winter, particularly in 1995 and 1998, lowest ($\Omega < 3.2$) in summer and transitional in spring and autumn (fig. 6).

The interannual winter deep-water wave behaviour off the coast of California, in terms of the timing of the arrival of storm conditions, showed a relatively periodic variation (fig. 7). Particularly noteworthy is the longer duration in the arrival of storm surge in the winters of 1995 and 1998, when waves with mean heights of 2.5 and 3.1 m, respectively, attacked the beach. In contrast, the winter storms of 1996 to 2002 (except 1998) were of shorter duration, with mean wave heights of 2.3–2.7 m.

Discussion

The cyclical changes associated with periods of less than 0.5 years, observed at all the control points, have been primarily linked to the occurrence of individual storm events. Larson and Kraus (1994) estimated that the incidence of waves from two extreme storms ($H_s > 4$ m) that occurred in a lapse of approximately 40 days removed an average of $230 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ of material from four beach profiles. Lizárraga-Arciniega *et al.* (2003) documented the impact of storm waves of similar intensity as those reported by Larson and Kraus (1994), and calculated sand losses of up to $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$, a decrease of up to 70 m in beach width and a decrease of up to 3.5 m in beach profile height, conditions that facilitated the attack of waves on Rosarito's residential and urban infrastructure. Nevertheless, though storms can produce dramatic short-term changes in the volume of beach sand, the average contribution to sand movement of the erosion/accretion cycles of less than 0.5 years for the Rosarito beaches, defined in terms of the amplitude of the sine function that best fits the temporal record of volume, only represents a movement of $22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ in comparison with the mean annual cycle amplitude of $32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$.

The greater annual volume variation during summer/autumn and smaller volume during winter/spring is consistent at all except two of the control points. This behaviour indicates

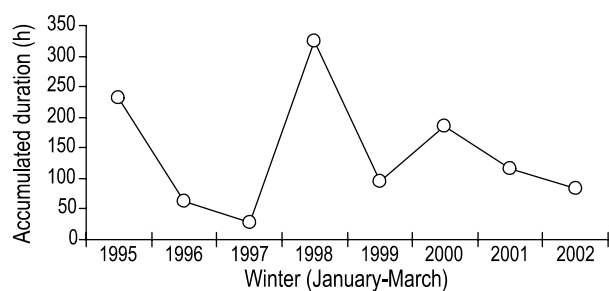


Figura 7. Periodicidad relativa interinvernal en la duración del oleaje de tormenta en mar abierto frente a la costa de California.

Figure 7. Relative inter-winter periodicity in the duration of storm wave arrival in deep waters off the coast of California (USA).

la incidencia del oleaje de dos tormentas extremas ($H_s > 4$ m) ocurridas en un lapso de aproximadamente 40 días fue capaz de remover un promedio de $230 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ de arena en cuatro perfiles de playa. Lizárraga-Arciniega *et al.* (2003) documentaron el impacto del oleaje de tormentas de intensidad similar a las analizadas por Larson y Kraus (1994) y calcularon pérdidas de arena de hasta $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$, pérdidas de hasta 70 m de ancho de playa y reducciones de hasta 3.5 m en la altura del perfil de playa, lo que facilitó el ataque de las olas sobre la infraestructura urbana-residencial de Rosarito. Sin embargo, aunque las tormentas pueden producir cambios dramáticos en el volumen de arena de la playa en el corto plazo, la contribución media al movimiento de arena de los ciclos de erosión/acreción con periodo menor de 0.5 años para las playas de Rosarito, definida en términos de la amplitud de la función seno que mejor se ajusta al registro temporal de volumen, sólo representa un movimiento de $22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ en comparación con la amplitud media de $32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ del ciclo anual.

La mayor variación anual en el volumen durante verano/otoño y la menor durante invierno/primavera está en fase en todos los puntos de control excepto en dos de ellos. Este comportamiento indica que la predominancia de los procesos erosionales/acrecionales estacionales de la playa subaérea está controlada por el transporte de arena perpendicular a la playa que responde al arribo de oleaje más energético en invierno que en verano. La fase constructiva o acrecional de la playa está claramente definida durante el verano-otoño, cuando el oleaje es de menor altura ocasionando la predominancia del transporte de arena de atrás de la zona de rompiente hacia la playa subaérea como lo indica el número de Dean ($\Omega < 3.2$) (fig. 6) (USACE 1992). Durante la fase destructiva o erosional de la playa característica de invierno-primavera, cuando el oleaje es de mayor altura, el número de Dean, $\Omega = 3.2$ (fig. 6), indica que el transporte de arena ocurre en sentido inverso, esto es, la arena se transporta desde la zona subaérea de la playa y se deposita en la parte posterior de la zona de rompiente como ha sido señalado para otras playas alrededor del mundo (USACE 1992). En su conjunto, estos comportamientos permiten concluir que el patrón de cambio estacional en el volumen de arena responde fielmente a la variación estacional del oleaje expresada en términos del número de Dean (Ω) y que puede corresponder a playas de tipo disipativo o reflectivo de acuerdo a lo descrito por Anfuso y Benavente (2006).

Bajo la consideración general de las características del oleaje estacional, el número de Dean predice adecuadamente la condición erosional/acrecional de la playa en Rosarito. Sin embargo, esta predicción no concuerda satisfactoriamente con el comportamiento de las playas en las que se detectó el ciclo invertido de erosión/acreción, ya que en éstas hubo acumulación de arena durante el invierno a pesar del arribo del oleaje más energético. Por el contrario, durante el verano, aun con el arribo de oleaje de baja energía, dominó la erosión de la playa. Esto indica que en particular en estas playas, son otros factores los responsables de la inversión erosional/acrecional observada y, por tanto, es necesario tener en cuenta

que la predominancia de los procesos de erosión/acreción estacionales de la playa subaérea está controlada por el transporte de arena perpendicular a la playa que responde al arribo de oleaje más energético en invierno que en verano. La fase constructiva o acrecional de la playa está claramente definida durante el verano-otoño, cuando el oleaje es de menor altura ocasionando la predominancia del transporte de arena de atrás de la zona de rompiente hacia la playa subaérea como lo indica el número de Dean ($\Omega < 3.2$) (fig. 6) (USACE 1992). Durante la fase destructiva o erosional de la playa característica de invierno-primavera, cuando el oleaje es de mayor altura, el número de Dean, $\Omega = 3.2$ (fig. 6), indica que el transporte de arena ocurre en sentido inverso, esto es, la arena se transporta desde la zona subaérea de la playa y se deposita en la parte posterior de la zona de rompiente como ha sido señalado para otras playas alrededor del mundo (USACE 1992). En su conjunto, estos comportamientos permiten concluir que el patrón de cambio estacional en el volumen de arena responde fielmente a la variación estacional del oleaje expresada en términos del número de Dean (Ω) y que puede corresponder a playas de tipo disipativo o reflectivo de acuerdo a lo descrito por Anfuso y Benavente (2006).

Considerando las características de las olas, el número de Dean apropiadamente predice la condición de la playa en Rosarito. Esta predicción, sin embargo, no coincide satisfactoriamente con el comportamiento en los puntos de control mostrando un ciclo invertido de erosión/acreción, donde la erosión/acreción ocurrió en invierno a pesar de la llegada de olas más energéticas y la erosión predominó en verano con olas de menor energía. Esto indica que otros factores fueron responsables del ciclo invertido observado en estos sitios y deben ser considerados cuando se utiliza el número de Dean para predecir la erosión/acreción de la playa.

Los factores que causan el ciclo invertido de erosión/acreción en dos de los puntos de control estudiados no son evidentes. La forma de la playa con fondo rocoso en los extremos y los pequeños cambios en el ángulo de las olas que se rompen sobre la playa pueden ser responsables del cambio estacional en el ciclo de erosión/acreción. Aunque este comportamiento es inusual para playas rectas, semiexpuestas y arenosas (Masselink y Pattiaratchi 2001), comúnmente ocurre en playas de bolsillo, ya que los ángulos de las olas que se rompen sobre la costa generalmente difieren de un extremo de la playa al otro (Short *et al.* 2000). Según Eliot y Clarke (1982) y Bittencourt *et al.* (1997), las características fisiográficas locales pueden causar pequeños cambios en el ciclo de la playa.

La importancia relativa del cambio estacional en el volumen de arena aumenta en la proximidad de un obstáculo y con su tamaño. En playas rectas no interrumpidas por estructuras costeras, el ciclo estacional está principalmente relacionado con el régimen de las olas y la amplitud del ciclo estacional es generalmente menor que en playas cercanas a rompeolas o puentes (Masselink y Pattiaratchi 2001). Anfuso *et al.* (2006) también reportó que las playas cercanas a estructuras costeras antropogénicas muestran mayor variabilidad. Este comportamiento fue verificado en este estudio, donde la contribución media al movimiento de arena inducida por el ciclo estacional de $32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ alcanzó valores máximos ($59\text{--}79 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$) en el sitio inmediatamente al sur del rompeolas. Este es el resultado de ambos transportes de arena, el onshore y el longshore, el último

excepciones al utilizar el número de Dean como predictor de la erosión/acreción de playa.

Los factores que afectan el desfase en la erosión y acreción durante invierno y verano, respectivamente, observado en dos de los puntos de control, no son tan evidentes. Si bien el efecto del oleaje estacional está presente, la forma arqueada de la playa, con fondo rocoso en sus extremos y ligeros cambios en el ángulo del oleaje rompiente con respecto a la playa, son los responsables del desfase erosional/acrecional y dan lugar al ciclo de playa anual invertido. Aunque este comportamiento es poco usual en playas arenosas rectas y semiexpuestas (Masselink y Pattiaratchi 2001), es común que ocurra en playas de bolsillo, ya que los ángulos de rompiente con respecto a la orientación de la playa son por lo general contrarios en uno y otro extremo de la playa de bolsillo (Short *et al.* 2000). Eliot y Clarke (1982) y Bittencourt *et al.* (1997) señalan que es común que las características fisiográficas locales en el litoral ocasionen ligeras variantes en el ciclo de playa.

La importancia relativa del cambio estacional en la variación de volumen se incrementa con la proximidad de un obstáculo y con el tamaño de éste. En playas rectas y no interrumpidas por estructuras costeras el ciclo estacional responde principalmente al régimen estacional de oleaje y la amplitud del ciclo estacional es generalmente menor que en playas cercanas a rompeolas o espigones (Masselink y Pattiaratchi 2001). Anfuso *et al.* (2006) también señalan que las playas cercanas a estructuras costeras antrópicas son las que presentan mayor variabilidad. Este comportamiento se verifica para las playas de Rosarito, en donde la contribución media al movimiento de arena inducido por el ciclo estacional de $32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ alcanzó sus máximos valores ($59\text{--}79 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$) en la playa inmediata al sur del espigón de la CFE, en respuesta a la combinación del transporte de arena en sentido perpendicular y en sentido paralelo a la playa. Este último es sugerido por el efecto de trampa de arena que tiene el espigón sur al retener la arena que potencialmente se transportaría en sentido paralelo a la playa del sureste hacia el noroeste tal y como lo sugiere el patrón de dirección de aproximación del oleaje en esta zona (Marichal-González 2001).

El mecanismo de interacción descrito, también se aplica para otros puntos de control (e.g., 2, 3 y 4) en los que la amplitud de la contribución al movimiento de arena, por arriba del promedio pero de menor magnitud que las observadas en las cercanías del espigón de la CFE, también está asociado a la cercanía con afloramientos rocosos, a manera de salientes, que producen cambios en la orientación de la línea de playa, y al efecto trampa de arena señalado y que ha sido caracterizado en playas morfológicamente similares (Bokuniewicz y Tangren 1985, Masselink y Pattiaratchi 2001). Como lo indican los perfiles de playa, las estructuras costeras en combinación con las salientes rocosas, al modificar la incidencia del oleaje, han cambiado el transporte litoral de arena (perpendicular y paralelo) dando como resultado zonas preferenciales de erosión/acreción en el litoral estudiado, tal y como se esquematiza en la figura 8.

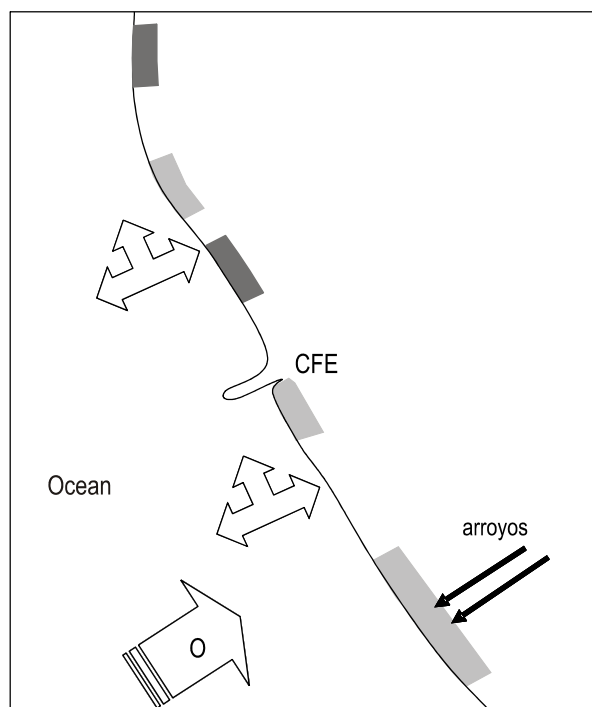


Figura 8. Esquemización fuera de escala de zonas preferenciales de erosión (gris oscuro) y de acreción (gris claro) debidas a la acción del oleaje (flecha O) y el transporte litoral inducido por el mismo (flecha de tres puntas).

Figure 8. Non-scale diagram showing preferential erosion zones (dark gray) and accretion zones (light gray) due to wave action (arrow O) and wave-induced littoral transport (three-pronged arrow).

suggested by the effect of the southern CFE pier, which traps sand that is potentially transported parallel to the beach from the SE to the NW, as suggested by the wave approach pattern in this area (Marichal-González 2001).

The mechanism of interaction described also applies to other control points (e.g., 2, 3 and 4), where the amplitude of the contribution to sand movement, above the mean but of lesser magnitude than that observed in the vicinity of the CFE breakwater, is also related to their proximity to rocky outcrops (headlands) that produce changes in the orientation of the beach line and to the sand trap effect mentioned, which has been characterized at morphologically similar beaches (Bokuniewicz and Tangren 1985, Masselink and Pattiaratchi 2001). As indicated by the beach profiles, by modifying the wave incidence the coastal structures and rocky outcrops have altered the littoral sand transport (onshore and longshore), resulting in preferential erosion and accretion zones in the study area (fig. 8).

The constant accumulation of sand at the southern CFE pier and the wave data obtained by Marichal-González (2001) indicate that seasonal inversions in the longshore sand transport are few or nill, and that the predominant transport direction is northwesterly. Marmolejo-Lara (1985), however, reported a net littoral sand transport of $130,000\text{--}150,000 \text{ m}^3$ towards the

La continua acumulación de arena en la parte sur del espigón en combinación con los registros de oleaje de Marichal-González (2001) indican que las inversiones estacionales en la dirección del transporte de arena en sentido paralelo a la playa son pocas o nulas, dominando el transporte en dirección noroeste. Esta condición contrasta con la estimación de Marmolejo-Lara (1985) de que el transporte litoral neto de arena entre 130,000 y 150,000 m³ es hacia el sur, aunque también indica que las corrientes litorales al sur del espigón son hacia el norte. El registro de series de tiempo de largo plazo del perfil de playa y el oleaje en la zona de Rosarito permitirá caracterizar y cuantificar con mayor certidumbre los volúmenes y direcciones de transporte litoral.

El ciclo de erosión/acreción con periodo de 36 meses que se evidenció en todas las series de tiempo es generalmente de menor amplitud que el anual. Se han identificado ciclos de erosión/acreción con periodos de alrededor de 29 meses (Clarke y Eliot 1988, Lacey y Peck 1998, Bittencourt *et al.* 1997) que se han asociado con variaciones en los patrones de transporte litoral, que a su vez se han relacionado con fenómenos de escala planetaria como el ENSO. Storlazzi y Griggs (2000) analizaron la ocurrencia del ENSO (1910 a 1995) y su relación con la erosión de cantiles costeros, y demostraron que conforme aumenta la intensidad de un ENSO, existen incrementos en la altura de las olas, del nivel del mar, de la precipitación y la actividad ciclónica, de manera que la erosión y daño costero por tormentas puede ser tres veces mayor que cuando no hay ENSO.

Dolan y Davis (1992) señalan que el impacto del oleaje de tormenta sobre la erosión de la playa no sólo depende de la intensidad de la tormenta en términos de la altura máxima de ola, sino también en términos de su duración. De acuerdo con Seymour *et al.* (1984), quienes definen un evento de tormenta como aquel que presenta alturas de olas mayores de 4 m por un lapso de 9 horas o más continuas, se encontró una periodicidad de 36 meses entre inviernos severos (1995, 1998 y 2000) que coincide con la periodicidad del cambio cíclico de volumen de arena para las playas de Rosarito. De esta manera, se puede concluir que la periodicidad de aproximadamente 36 meses entre inviernos en los que se observó una mayor duración en el arribo de oleaje de tormenta es el factor responsable del cambio cíclico de volumen de arena con el mismo periodo encontrado en este trabajo.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero de la Universidad Autónoma de Baja California y de CONACYT (proyecto SEP-2004-C01-47656). Se reconoce y agradece la información de oleaje y perfiles de playa facilitada por el grupo de oceanografía física de CFE con sede en Rosarito, Baja California, y a todos los estudiantes de la licenciatura en oceanología de la Facultad de Ciencias Marinas quienes apoyaron con entusiasmo el trabajo de campo bajo la supervisión de E Gil-Silva, R Blanco-Betancourt y R Cano.

south, but also observed northerly currents to the south of the breakwater. Long-term beach profile and wave data are necessary to characterize and determine with greater certainty the volumes and directions of littoral transport in the Rosarito area.

The 36-month erosion/accretion cycle obtained for all the sand volume time series generally showed less amplitude than the annual cycle. Erosion/accretion cycles with periods of about 29 months have been identified by Clarke and Eliot (1988), Lacey and Peck (1998) and Bittencourt *et al.* (1997), and have been associated with variations in the patterns of littoral transport, which in turn have been associated with planetary-scale phenomena such as ENSO. Storlazzi and Griggs (2000) analyzed the occurrence of ENSO events (from 1910 to 1995) and their relation to coastal cliff erosion. These authors noted that as the intensity of an event increases, there is an increase in wave height, sea level, rainfall and cyclonic activity, and that erosion and coastal damage can be three times greater than during non-ENSO conditions.

Dolan and Davis (1992) reported that the impact of storm waves on beach erosion not only depends on the intensity of the storm, estimated in terms of maximum wave height, but also on the duration. In accordance with Seymour *et al.* (1984), who defined a storm event as one that presents wave heights greater than 4 m during nine or more hours, we found a 36-month periodicity for severe winters (1995, 1998 and 2000), coinciding with the periodicity obtained for cyclical sand volume change in the Rosarito beaches. It can therefore be concluded that the approximate 36-month period between winters showing greater duration of storm conditions is the factor responsible for the cyclical change in sand volume with the same periodicity.

Acknowledgements

Financial support from UABC and the Mexican Council of Science and Technology (CONACYT project SEP-2004-C01-47656) is acknowledged. The CFE's physical oceanography group at Rosarito (Baja California) kindly provided beach profile and wave data. We thank all the students of the Marine Science Faculty (UABC) for their help in the field, under the supervision of E Gil-Silva, R Blanco-Betancourt and R Cano.

English translation by Christine Harris.

Referencias

- Anfuso G, Benavente J. 2006. Las playas entre Chipiona y Rota (Cádiz, SO de España): Aproximación a su clasificación y comportamiento morfodinámico. *Cienc. Mar.* 32: 605–616.
- Anfuso G, Bello E, Benavente J, Nachite D, Macías A. 2006. Características morfológicas y variabilidad volumétrica de las playas del litoral entre Ceuta y Cabo Negro (Marruecos). *Cienc. Mar.* 32: 579–588.
- Appendini-Albretschsen CM. 1998. Plan de manejo de la erosión costera para Playas de Rosarito, Baja California, México. Tesis de

- Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 123 pp.
- Bittencourt ACSP, Edson ESS, Farias FF. 1997. Beach imaging through the time evolution of topographical profiles. *J. Coast. Res.* 13: 1141–1149.
- Bokuniewicz HJ, Tangren S. 1985. Volume requirement for the subaerial beach at East Hampton, New York. *Shore Beach* 53: 16–18.
- Carrillo-Berumen RM. 1998. Dinámica sedimentaria en las inmediaciones de la obra de toma de la central termoeléctrica Presidente Juárez en Rosarito, BC, México. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 133 pp.
- CDIP, Coastal Data Information Program. 2004. [Http://cdip.ucsd.edu](http://cdip.ucsd.edu).
- Clarke DJ, Eliot IG. 1988. Low-frequency changes of sediment volume on the beachface at Warilla Beach, New South Wales, 1975–1985. *Mar. Geol.* 79: 189–211.
- COPLADE, Comisión de Planeación del Estado. 2002. Plan Estatal de Desarrollo 2002–2007. Gobierno del Estado de Baja California, México, 156 pp.
- Dalrymple RA. 1992. Prediction of storm/normal beach profiles. *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.* 118: 193–200.
- Dean RG. 1973. Heuristic model of sand transport in the surf zone. *Proc. 1st Australian Conf. on Coastal Engineering, Engineering Dynamics in the Surf Zone, Sydney, Australia*, pp. 209–214.
- Delgado-González O, Lizárraga-Arciniega R, Martínez-Díaz-de-León A, Galindo-Bect L, Fermán-Almada JL, Sánchez-Arcilla A, Mosso C, Pérez-Higuera R, Cruz-Varela A. 2005. Cambios en la posición de la línea de playa de la boca del Estero de Punta Banda, Baja California, durante 1972–2003. *Cienc. Mar.* 31: 707–717.
- Dolan R, Davis RE. 1992. An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. *J. Coast. Res.* 16: 145–152.
- Eliot IG, Clarke DJ. 1982. Seasonal and biennial fluctuation in subaerial beach sediment volume on Warilla Beach, New South Wales. *Mar. Geol.* 48: 89–103.
- Eliot I, Clarke D. 1989. Temporal and spatial bias in the estimation of shoreline rate-of-change statistics from beach survey information. *Coast. Manage.* 17: 129–156.
- Jiménez JA, Sánchez-Arcilla A, Maldonado A. 1997. Long- to short-term coastal changes and sediment transport in the Ebro Delta; a multi-scale approach. In: Frédéric B, Maldonado A (eds.), *Transformación and Evolution of the Mediterranean Coastline*. CIESM Science Series No. 3.
- Lacey EM, Peck JA. 1998. Long-term beach profile variations along the south shore of Rhode Island, USA. *J. Coast. Res.* 14: 1255–1264.
- Larson M, Kraus NC. 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. *Mar. Geol.* 117: 75–94.
- Lizárraga-Arciniega R, Chee-Barragán A, Gil-Silva E, Mendoza-Ponce E, Martínez-Díaz de León A. 2003. Effect of El Niño on the subaerial beach Playas de Rosarito, BC, Mexico. *Geofis. Int.* 42: 419–428.
- Marichal-González AM. 2001. Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito, BC, de 1994 a 1998. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 70 pp.
- Marmolejo-Lara M. 1985. Control del asolvamiento en una obra de toma de agua marina. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 60 pp.
- Masselink G, Pattiaratchi CB. 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia. *Mar. Geol.* 172: 243–263.
- Pou-Alberú S, Pozos-Salazar G. 1992. Cantidad de sedimento drenado hacia la costa del Pacífico en el noroeste de Baja California, México. *Cienc. Mar.* 18: 125–141.
- Seymour RJ, Strange RR III, Cayan DR, Nathan RA. 1984. Influence of El Niños on California's wave climate. In: Billy L (ed.), *Proc. 19th Coastal Engineering Conference*. ASCE, pp. 577–592.
- Short AD, Trembanis AC, Turner IL. 2000. Beach Oscillation, Rotation and the Southern Oscillation, Narrabeen Beach, Australia. *Proc. International Conference on Coastal Engineering, Sydney 2000*. ASCE, pp. 2–15.
- Storlazzi CD, Griggs GB. 2000. Influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events on the evolution of central California's shoreline. *Geol. Soc. Am. Bull.* 112: 236–249.
- USACE, US Army Corps of Engineers. 1992. *Engineering and Design: Coastal Littoral Transport*. Engineering Manual No. 1110-2-2502, Washington, DC.
- Welch PD. 1967. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* AU-15 (June): 70–73.

*Recibido en agosto de 2006;
aceptado en junio de 2007*