

Influence of winter waves on the longitudinal growth of the Punta Banda Estuary sandbar, Todos Santos Bay, Baja California, Mexico

Influencia del oleaje invernal en el crecimiento longitudinal de la barra del Estero de Punta Banda, Bahía de Todos Santos, Baja California, México

A Martínez-Díaz-de-León*, R Lizárraga-Arciniega, O Delgado-González, L Galindo-Bect, CR Torres-Navarrete,
R Blanco-Betancourt, E Gil-Silva, R Cano-Cetina

Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Apartado postal 453, Ensenada 22800,
Baja California, México. * E-mail: asdrubal@uabc.mx

Abstract

Punta Banda Estuary, located within Todos Santos Bay, on the northwest coast of the Baja California Peninsula, is separated from the bay by a single sandbar, approximately 8 km long. From 1972 to 2003 this sandbar showed a longitudinal net growth of 420 m, which decreased the width of the estuary mouth by more than 400 m. Despite the bar's rapid growth it has been suggested that the estuary mouth remains open because in spring, summer and autumn the longshore sand transport is northeastward, but during winter the longshore sand transport should be toward the southwest, away from the mouth, establishing a balance between the amount of sediment transported both ways. In this study we analyze wave data acquired from November 2004 to March 2005 on the bay side of the sandbar, and for the first time provide the magnitude and direction of the longshore sand transport during winter. The results show that during this season the dominant waves approach the bay from the west-northwest and the sandbar from the west, inducing a net longshore sand transport of $817 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ to the northeast. This result contradicts the hypothesis of a longshore sand transport balance, and shows that throughout a typical year the net longshore sand transport is to the northeast. The fact that the estuary mouth has not closed up should be attributed to other causes, such as extraordinary amounts of rain during the rainy season or inequalities between the ebb and flood tidal current velocities to the estuary.

Key words: winter waves, refraction, sediment transport, Punta Banda Estuary.

Resumen

El Estero de Punta Banda, localizado dentro de la Bahía de Todos Santos, en el noroeste de la Península de Baja California, se encuentra delimitado hacia el mar por una barra arenosa de 8 km de longitud. De 1972 a 2003 la barra tuvo un crecimiento longitudinal neto de 420 m, lo que redujo el ancho de la boca del estero en más de 400 m. A pesar de dicho crecimiento, se ha sugerido que la boca del estero no se ha cerrado debido a la existencia de un balance anual en los volúmenes de sedimento que se transportan en ambas direcciones a lo largo de la barra. Mientras que mediciones directas indican que en las épocas de primavera, verano y otoño la dirección del transporte litoral de sedimento es hacia el noreste, se ha planteado la hipótesis de que durante la época invernal el transporte litoral en la barra debería ser hacia el suroeste. En este trabajo se analizan mediciones de oleaje realizadas de noviembre de 2004 a marzo de 2005 frente a la barra del Estero de Punta Banda y se infiere por primera vez la magnitud y dirección del transporte litoral de sedimento en esta barra durante la época invernal. Los resultados muestran que durante la época invernal el oleaje dominante que arriba a la bahía proviene del oeste-noroeste, aproximándose a la barra del estero con dirección oeste franco, lo que en combinación con la orientación de la barra induce un transporte litoral de sedimento en dirección noreste, hacia la boca del estero. Este resultado contradice la hipótesis de que durante el invierno la dirección del transporte litoral es hacia el sur y permite establecer que a lo largo de un año típico la dirección dominante del transporte litoral de sedimento en la barra del estero es hacia el noreste. El hecho de que la boca del estero no se haya cerrado debe ser atribuible a otros procesos físicos, como por ejemplo a aportes pluviales extraordinarios durante la época de lluvias o posibles desigualdades entre las velocidades del flujo y reflujo de la marea al estero.

Palabras clave: oleaje invernal, refracción, transporte de sedimento, Estero de Punta Banda.

Introduction

Punta Banda Estuary (PBE), one of the northernmost coastal lagoons on the Pacific coast of Mexico, is located within Todos Santos Bay, on the northwest side of the Baja California Peninsula (fig. 1). One of the estuary's most notable

Introducción

El Estero de Punta Banda (EPB), una de las lagunas costeras más norteñas en el litoral Pacífico mexicano, se localiza dentro de la Bahía de Todos Santos, en el noroeste de la Península de Baja California (fig. 1). Una de sus características más

features is the approximately 8-km-long and 1-km-wide sandbar that separates it from the bay. This sandbar consists of well-classified quartz sands of approximately 2ϕ in diameter (Blanco-Betancourt 1987) and numerous dunes, and on the bay side, a moderately wide (~ 250 m) beach slopes gently (0.02) to the sea. These characteristics make it highly attractive for recreational use and for the construction of tourism-related infrastructure.

Between 1972 and 2003, the PBE sandbar showed a longitudinal net growth of 420 m and the width of the estuary mouth decreased from 600 to 180 m (Delgado-González *et al.* 2005). This longitudinal growth has been attributed to the fact that in spring, summer and autumn the longshore sand transport along the bar is predominantly northeastward, in the direction of the mouth, as inferred from wave measurements made during those seasons (Torres-Navarrete 1991). Despite the bar's rapid growth, it has been suggested that the mouth remains open because during winter, when waves approach from the northwest and maximum wave heights occur in the bay, the longshore sand transport should be toward the south and of greater magnitude than at other times of the year, establishing an annual balance between the amounts of sediment that are transported in both directions along the bar (Torres-Navarrete 1991).

The objective of this study was to analyze wave measurements taken during winter, from November 2004 to March 2005, off the PBE sandbar. This is the first time that the characteristics of the waves approaching the sandbar and that the magnitude and direction of the wave-induced longshore sediment transport are inferred for this season. Moreover, the data were compared with existing measurements to determine the possible occurrence of an annual balance between the amounts of sediment that are transported in both directions along the sandbar.

Material and methods

To determine the winter wave climate off PBE and the direction of the longshore sand transport along the sandbar, coastal wave measurements were taken at three stations, identified as Ciprés ($31^{\circ}45.5' \text{ N}$, $116^{\circ}37.9' \text{ W}$), Boca ($31^{\circ}47.0' \text{ N}$, $116^{\circ}38.6' \text{ W}$) and Barra ($31^{\circ}45.5' \text{ N}$, $116^{\circ}39.4' \text{ W}$) (fig. 1). Measurements were taken with acoustic doppler profilers (ADPs) capable of resolving the directional wave field. One 600 kHz (RD Instruments) and two 1000 kHz (SonTek) ADPs were used. The instruments were programmed to record, every hour, 2048 samples of pressure (p) and of the horizontal components of the velocity field (u , v), with a sampling interval of 0.5 s. The software of these instruments, which combine p , u and v , provide significant wave height (H_s), spectral peak period (T_p), and wave propagation direction (θ) data for each measurement. One of the ADPs was located in front of the estuary mouth, another to the south of the mouth, off the sandbar, and the third to the north of the mouth (fig. 1). The three

importantes es su barra arenosa, de aproximadamente 8 km de longitud y 1 km de ancho, que lo separa de la bahía. Constituida de arenas de cuarzo bien clasificadas cuyo diámetro medio es de 2ϕ (Blanco-Betancourt 1987), la barra cuenta con numerosas dunas y presenta hacia el mar una playa moderadamente ancha (~ 250 m), de pendiente suave (0.02), lo que la hace sumamente atractiva para el desarrollo de actividades recreativas y la construcción de infraestructura turística.

Entre 1972 y 2003 la barra del EPB mostró un crecimiento longitudinal neto de 420 m, lo que redujo el ancho de su boca de 600 a 180 m (Delgado-González *et al.* 2005). El crecimiento longitudinal de la barra se ha atribuido a que, durante primavera, verano y otoño, el transporte litoral dominante de sedimento a lo largo de la barra es hacia el noreste; esto es, en dirección a la boca del estero, según se infiere de mediciones de oleaje realizadas durante tales estaciones (Torres-Navarrete 1991). Por otro lado, se ha sugerido que, a pesar del importante crecimiento de la barra, la boca del estero no se ha cerrado debido a que durante la época invernal, cuando el oleaje arriba a la bahía con sus máximas alturas y del noroeste, la dirección del transporte litoral de sedimento debiera ser de mayor magnitud que el resto del año y hacia el sur, lo que permite establecer un balance anual entre las cantidades de sedimento que se transportan en ambas direcciones a lo largo de la barra (Torres-Navarrete 1991).

En este trabajo se analizan mediciones de oleaje realizadas durante la época invernal, de noviembre de 2004 a marzo de 2005, frente a la barra del EPB. Se infieren por primera vez para esta época las características del oleaje que arriba a la barra del estero, y la magnitud y dirección del transporte litoral de sedimento inducido por este oleaje. Se investiga también, comparando con mediciones existentes, el posible balance anual entre las cantidades de sedimento que se transportan en ambas direcciones a lo largo de la barra del EPB.

Materiales y métodos

Para establecer durante la época invernal el clima de oleaje que arriba al EPB y la dirección del transporte litoral de sedimento a lo largo de su barra se realizaron mediciones costeras de oleaje en tres localidades. Las estaciones de medición se identificaron como Ciprés ($31^{\circ}45.5' \text{ N}$, $116^{\circ}37.9' \text{ W}$), Boca ($31^{\circ}47.0' \text{ N}$, $116^{\circ}38.6' \text{ W}$) y Barra ($31^{\circ}45.5' \text{ N}$, $116^{\circ}39.4' \text{ W}$) (fig. 1). Se utilizaron instrumentos de medición tipo ADP (Acoustic Doppler Profiler), con capacidad para resolver el campo direccional del oleaje, dos de 1000 kHz (SonTek) y uno de 600 kHz (RD Instruments). Estos instrumentos fueron programados para registrar cada hora 2048 muestras de presión (p) y de las componentes horizontales del campo de velocidad (u , v), con un intervalo de muestreo de 0.5 s. Las rutinas de cómputo de los propios instrumentos, que combinan p , u y v , proporcionan para cada registro de oleaje valores de altura significativa (H_s), periodo del pico espectral (T_p) y dirección media de propagación del oleaje (θ). Uno de los medidores quedó ubicado frente a la boca del estero, otro al sur de la boca

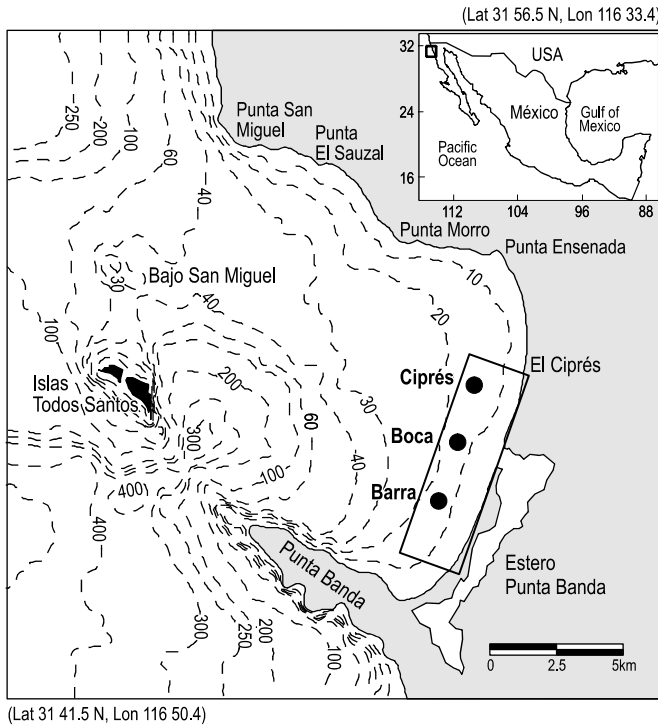


Figure 1. Geographic location of the wave sampling stations off the Punta Banda Estuary sandbar. The broken lines indicate the bathymetric configuration (depth in meters), and the square corresponds to the area considered to obtain the wave refraction pattern shown in figure 4.

Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones de medición de oleaje frente a la barra del Estero de Punta Banda. Las líneas segmentadas muestran la configuración batimétrica (profundidades en metros), y el recuadro frente al estero corresponde al área considerada para obtener el patrón de refracción del oleaje mostrado en la figura 4.

instruments were installed at an average depth of 15 m and operated from 9 November 2004 to 30 March 2005, a period corresponding to the winter season. The measurements were interrupted from 18 to 24 January 2005 for the instruments to undergo maintenance.

Results

The wave data recorded during the sampling period by the instrument deployed off the estuary mouth are shown in figure 2. The time series for the other two sites did not show relevant differences, except in the case of H_s , which was on average 20% higher at the station located to the north of the mouth. This result concurs with that reported by Martínez-Díaz-de-León (2004), who found that the height of the waves reaching the area known as El Ciprés (fig. 1) can be up to 2.5 times higher than at other sites within Todos Santos Bay.

Figure 2a shows a typical variation in the wave height for this region during the winter season (Martínez-Díaz-de-León *et al.* 1989, Martínez-Díaz-de-León 2004). The mean H_s value was 0.7 m and the minimum value was 0.3 m. The arrival of several storms, four of them significant, is noticeable, with H_s values greater than 1.5 m, but greater than 2 m in the case of

frente a la barra, y el tercer instrumento al norte de la boca (fig. 1). Los tres se instalaron a una profundidad media de 15 m y operaron del 9 de noviembre de 2004 al 30 de marzo de 2005, periodo correspondiente a la época invernal. Las mediciones se interrumpieron del 18 al 24 de enero de 2005 para realizar maniobras de mantenimiento a los equipos de medición.

Resultados

Las características generales del oleaje registrado por el instrumento instalado frente a la boca del estero durante el periodo de medición se muestran en la figura 2. Las series de tiempo para las otras dos localidades no mostraron diferencias relevantes, excepto para el caso de H_s , que resultó ser en promedio 20% mayor en el punto de medición ubicado al norte de la boca del estero. Esto concuerda con lo reportado por Martínez-Díaz-de-León (2004), quien encontró que las alturas del oleaje que arriban a la zona conocida como El Ciprés (fig. 1) pueden ser hasta 2.5 veces mayores que en otros sitios dentro de la bahía.

Durante el periodo de mediciones se observó (fig. 2a) variabilidad en la altura del oleaje típica para esta región durante de la época invernal (Martínez-Díaz-de-León *et al.* 1989, Martínez-Díaz-de-León 2004). El promedio de la altura fue de 0.7 m, con mínimos de 0.3 m. Destaca el arribo de varias tormentas, cuatro de ellas importantes, con altura significativa

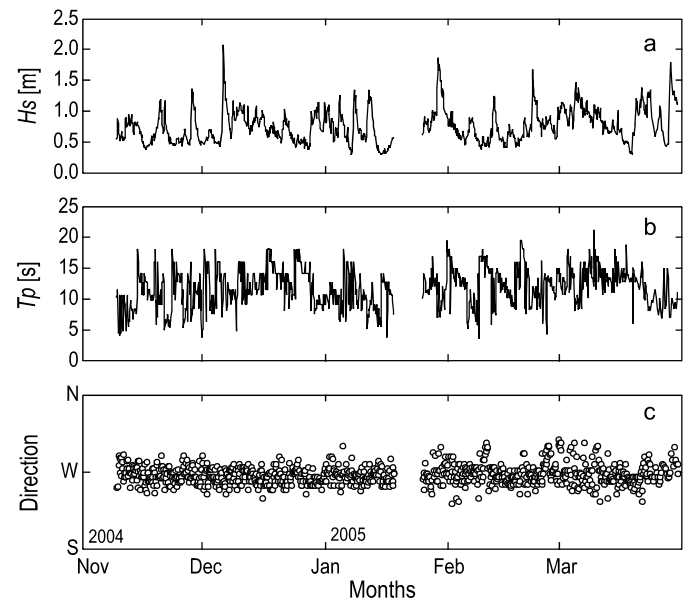


Figure 2. Time series of wave height, period and direction measured at the Boca station (fig. 1) in front of the mouth of Punta Banda Estuary from November 2004 to March 2005. The time series were interrupted in late January because the instruments were removed for maintenance purposes.

Figura 2. Series de tiempo de altura, periodo y dirección del oleaje medido en la estación Boca (fig. 1) frente a la boca del Estero de Punta Banda de noviembre de 2004 a marzo de 2005. La interrupción de las series de tiempo a finales de enero se debe a que los instrumentos fueron recuperados para realizar maniobras de mantenimiento.

the storm in early December 2004. The number and severity of the storms recorded is not unusual, since numerous cold fronts occur in winter over the Pacific Ocean of the Northern Hemisphere. Most of these fronts affect the coasts of California and Baja California (Allan and Komar 2000, 2002).

The wave period (fig. 2b) also showed high variability, with minimum and maximum values of 3.6 and 21 s, respectively. The period can be observed to increase drastically on several occasions and then decrease slowly until reaching, in most cases, its initial value. It is interesting to note the clear association between the peaks in wave period and the peaks in wave height; this behaviour indicates that most of the peaks in height are related to the arrival of waves generated by distant storms.

The predominant wave direction (fig. 2c) at the three sampling stations was from the west, with a standard deviation of only 17°. To identify the association between wave height and approach direction, joint histograms were calculated (H_s , θ) and are presented as wave roses in figure 3. In these charts the thickness of the bars corresponds to wave height according to the scale shown. The length of the bars (individual or cumulative) represents the percentage of occurrence of the pairs of values (H_s , θ), whose scale is indicated by the concentric circles. Note how regardless of height, more than 70% of the waves approach from the west, while only a small percentage (<15%) approach from other directions.

To be able to infer the magnitude and direction of sediment transport, wave height and direction at the breaker line have to be known. As the wave measurements were made in 15-m-deep waters, it was necessary to conduct a numerical propagation of the waves measured up to the breaker zone. The REF2DIF-1 numerical refraction/diffraction model (Kirby and Dalrymple 1984) was used for the propagation. This weakly nonlinear model uses Stokes' series expansion to resolve the analytical problem of waves and includes a third-order

mayor a 1.5 m. La tormenta de principios de diciembre de 2004 rebasó inclusive los 2 m de altura. El número y severidad de las tormentas registradas no es algo sorprendente, ya que durante la época invernal se tiene la ocurrencia de numerosos frentes fríos sobre el Océano Pacífico del hemisferio norte. Estos frentes en su mayoría afectan las costas de California y Baja California (Allan y Komar 2000, 2002).

El periodo del oleaje (fig. 2b) mostró igualmente una gran variabilidad, con valores mínimos de 3.6 s y máximo de 21 s. Se observa como en repetidas ocasiones el periodo se incrementa drásticamente para luego decrecer de manera paulatina hasta alcanzar, en la mayoría de los casos, su valor inicial. Es interesante notar la marcada asociación entre los picos de periodo y los picos de altura del oleaje, comportamiento que indica que la mayoría de los picos de altura están asociados al arribo de olas generadas por tormentas lejanas.

La dirección dominante del oleaje en los tres puntos de medición (fig. 2c) resultó ser del oeste franco, con una desviación estándar de tan sólo 17 grados. Para identificar la asociación entre la altura del oleaje y su dirección de arribo se calcularon histogramas conjuntos (H_s , θ) que se presentan como rosas de oleaje en la figura 3. En estas figuras el grosor de las barras corresponde a la altura del oleaje según la escala mostrada en la parte inferior derecha. La longitud de las barras (individual o acumulativa) representa el porcentaje de ocurrencia de las parejas de valores (H_s , θ), cuya escala es indicada por los círculos concéntricos. Se aprecia como, sin importar su altura, más del 70% de las olas provienen del oeste, mientras que sólo un pequeño porcentaje (<15%) arriba de otras direcciones.

Para inferir la magnitud y dirección del transporte de sedimento se requiere conocer la altura y dirección del oleaje en la línea de rompiente. Debido a que las mediciones de oleaje se realizaron en aguas de 15 m de profundidad, fue necesario propagar numéricamente el oleaje medido hasta la zona de

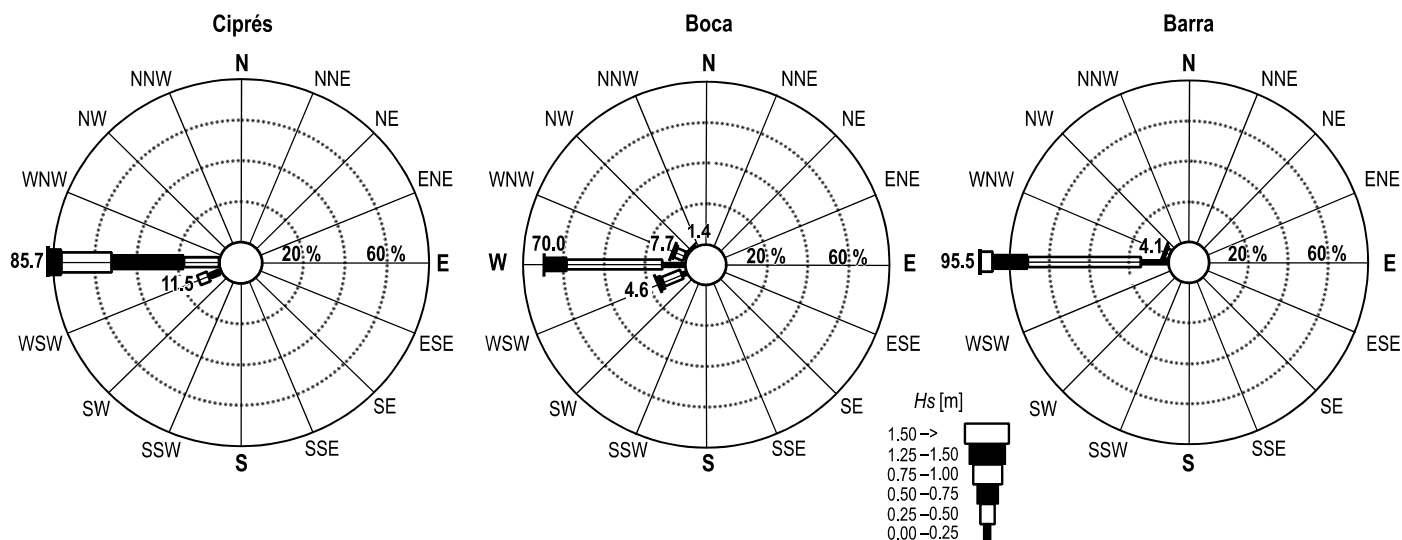


Figure 3. Wave, height and direction roses for the three sampling stations (fig. 1) off the Punta Banda Estuary sandbar.

Figura 3. Rosas de oleaje, altura y dirección, en los tres puntos de medición (fig. 1) frente a la barra del Estero de Punta Banda.

correction to the wave phase velocity. The model's mathematical deduction assumes that the changes in depth occur in distances greater than the wave wavelengths.

Different triads of wave height, period and direction were used as model input parameters; nevertheless, as already mentioned, the predominant wave direction was from the west (fig. 3). The refraction pattern of one of these triads ($H_s = 0.75$ m, $T_p = 15$ s, $\theta = 270^\circ$) is shown as sea surface height contours in figure 4. This example is representative of the different trials carried out, since the refraction pattern proved to be more sensitive to the wave incidence angle than to the variations in wave height or period. In general, the refraction trials revealed that in the breaker zone the dominant wave direction was from the southwest, generating a longshore transport along the sandbar towards the northeast, in the direction of the estuary mouth.

To calculate the magnitude of longshore transport, expressed as volume per unit of time ($\text{m}^3 \text{day}^{-1}$), the following equation developed by the US Corps of Engineers (CERC 1984) was used:

$$Q_1 = \frac{I_l}{(\rho_s - \rho) g (1 - p)}$$

where ρ_s is the relevant sediment density (2650 kg m^{-3}), ρ is the density of seawater (1025 kg m^{-3}), g is the constant of gravity (9.81 m s^{-2}), p is the porosity of the substrate ($= 0.4$), and I_l is the immersed weight sediment transport rate (N s^{-1}) given by:

$$I_l = K P_l$$

where K is an adimensional constant ($= 0.77$), and P_l is the longshore component of wave power (N s^{-1}) given by:

$$P_l = (ECn \cos \theta \sin \theta)_r$$

where E is the wave energy (N m^{-1}), C is the celerity of the waves (m s^{-1}), n represents the quotient between the group velocity and the celerity of the waves, and θ is the wave propagation direction. The subindex r indicates that all these parameters are evaluated at the depth where the waves begin to break.

Based on the pair of height ($H_s = 0.75$ m) and direction ($\theta = 270^\circ$) values that occurred with most frequency ($>70\%$, fig. 3) during the sampling period, the volume of sediment transported along the PBE sandbar was $817 \text{ m}^3 \text{day}^{-1}$. This amount is much higher than the sum of the volumes reported by Torres-Navarrete (1991) for spring ($384 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$), summer ($10.5 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$), and autumn ($-110.4 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$). The wave approach direction and orientation of the sandbar generate a sediment transport towards the estuary mouth (i.e. towards the northeast).

This result contradicts the hypothesis presented by Torres-Navarrete (1991) that during winter the sediment along the

rompiente. Para su propagación se utilizó el modelo numérico de refracción y difracción REFDIF-1 (Kirby y Dalrymple 1984). Este modelo, ligeramente no lineal, utiliza una expansión en series de Stokes para resolver el problema analítico del oleaje e incluye una corrección de tercer orden a la velocidad de fase de las olas. La derivación matemática del modelo supone que los cambios de profundidad se suceden en distancias más grandes que la longitud de onda de las olas.

Como parámetros de entrada al modelo se utilizaron diferentes triadas de altura, periodo y dirección del oleaje. Sin embargo, como ya se comentó, la dirección dominante de las olas resultó ser del oeste franco (fig. 3). El patrón de refracción para una de estas triadas ($H_s = 0.75$ m, $T_p = 15$ s, $\theta = 270^\circ$) se ilustra como contornos de la elevación de la superficie del mar en la figura 4. Cabe mencionar que este ejemplo es representativo de los diferentes ejercicios realizados, ya que el patrón de refracción resultó ser más sensible al ángulo de incidencia de las olas que a las variaciones en su altura o periodo. En general, los ejercicios de refracción mostraron que en la zona de rompiente la dirección dominante del oleaje es suroeste, lo que induce que el transporte litoral a lo largo de la barra sea hacia el noreste, esto es, hacia la boca del estero.

Para calcular la magnitud del transporte litoral, expresado como volumen por unidad de tiempo ($\text{m}^3 \text{día}^{-1}$), se utilizó la fórmula desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (CERC 1984):

$$Q_1 = \frac{I_l}{(\rho_s - \rho) g (1 - p)}$$

donde ρ_s es la densidad relativa del sedimento (2650 kg m^{-3}), ρ es la densidad del agua de mar (1025 kg m^{-3}), g es la constante de gravedad (9.81 m s^{-2}) y p es la porosidad del sustrato ($= 0.4$), e I_l es la tasa del transporte de sedimento como peso inmerso en N s^{-1} , dada por:

$$I_l = K P_l$$

donde K es una constante adimensional ($= 0.77$), y P_l es la componente a lo largo de la costa de la potencia del oleaje en N s^{-1} , dada por:

$$P_l = (ECn \cos \theta \sin \theta)_r$$

donde E es la energía del oleaje en N m^{-1} , C es la celeridad de las olas (m s^{-1}), n representa el cociente entre la velocidad de grupo y la celeridad de las olas, y θ es la dirección de propagación de las olas. El subíndice r indica que todos estos parámetros se evalúan en la profundidad donde inicia la rompiente de las olas.

Considerando la pareja más frecuente ($>70\%$, fig. 3) de valores de altura ($H_s = 0.75$ m) y dirección ($\theta = 270^\circ$) durante el periodo de mediciones se obtiene que el volumen de

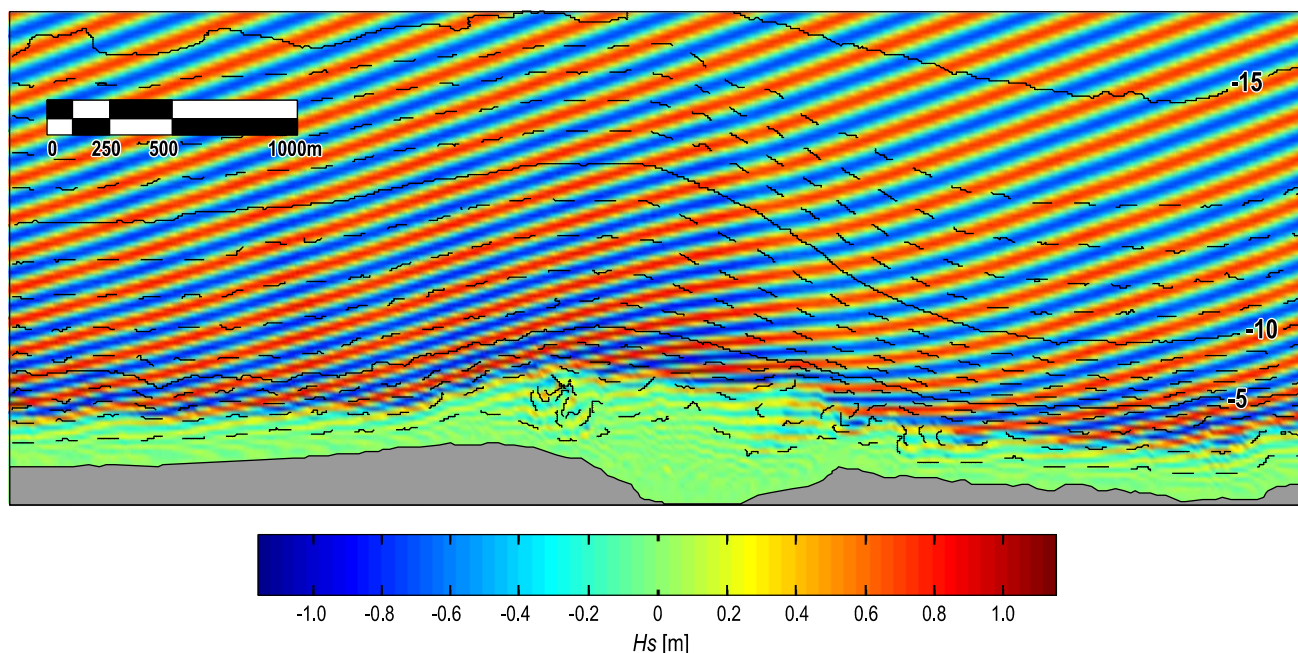


Figure 4. Wave refraction pattern off the Punta Banda Estuary sandbar, expressed as sea surface height contours. The refraction corresponds to the area indicated by the square in figure 1 and was obtained with the REFDIR-1 model, using $H_s = 0.75$ m, $T_p = 14$ s, and $\theta = 270^\circ$ as model input data.

Figura 4. Patrón de refracción del oleaje frente a la barra del Estero de Punta Banda, expresado como contornos de elevación de la superficie del mar. La refracción corresponde al área enmarcada en el recuadro de la figura 1 y se obtuvo utilizando el modelo REFDIR-1. Como información de entrada al modelo se utilizó: $H_s = 0.75$ m, $T_p = 14$ s y $\theta = 270^\circ$.

sandbar is transported southward. On the other hand, for the first time it allows us to suggest that during a typical annual cycle the dominant transport along the sandbar is in the direction of the estuary mouth. This result could partially explain the significant longitudinal growth of the sandbar and the relevant decrease of more than 400 m in the width of the PBE mouth observed over the last decades (Delgado-González *et al.* 2005).

Discussion

Coastal waves are the main physical agent responsible for changes in the morphology of the coastline, so monitoring and analyzing their characteristics is of the utmost importance, especially when sandy beaches are involved.

The wave characteristics analyzed in this study reflect a typical winter condition for Todos Santos Bay (Martínez-Díaz-de-León *et al.* 1987, Martínez-Díaz-de-León 2004, Lizárraga-Arciniega *et al.* 2007). The occurrence of some short-duration storms shows a clear association between the increase in both wave height and period. It can be assumed from this result that the dominant waves were generated by distant storms.

On the other hand, a small standard deviation ($\sim 17^\circ$) was observed in the direction that waves approach the PBE sandbar. This suggests that the sediment transport direction determined in this study is a typical condition of winter waves, especially if we consider that the refraction pattern showed greater sensitivity to the wave approach angle than to wave

sedimento transportado a lo largo de la barra del estero es de $817 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$, el cual resultó ser mucho mayor que la suma de los volúmenes reportados por Torres-Navarrete (1991) para primavera ($384 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$), verano ($10.5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) y otoño ($-110.4 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$). La dirección de aproximación del oleaje y la orientación de la barra inducen un transporte de sedimento hacia la boca del estero, esto es, hacia el noreste.

Este resultado contradice la hipótesis planteada por Torres-Navarrete (1991) en la que durante la época invernal el sedimento en la barra es transportado hacia el sur. Sin embargo, al mismo tiempo permite sugerir por primera vez que a lo largo de un ciclo anual típico el transporte dominante a lo largo de la barra es en dirección a la boca del EPB. Este resultado pudiera explicar en parte el importante crecimiento longitudinal de la barra y la relevante disminución en más de 400 m del ancho de la boca del estero, observados en las últimas décadas (Delgado-González *et al.* 2005).

Discusión

Es de suma importancia medir y analizar las características del oleaje que arriba a las costas, ya que éste es el principal agente físico responsable de inducir cambios en la morfología costera particularmente cuando se trata de playas arenosas.

Las características del oleaje analizado en este trabajo reflejan una condición invernal típica para la Bahía de Todos Santos (Martínez-Díaz-de-León *et al.* 1987, Martínez-Díaz-de-León 2004, Lizárraga-Arciniega *et al.* 2007). La ocurrencia de

height and period, increasing the relevance of the results presented here.

The length of the sandbar has been increasing over the past two decades and though the width of the estuary mouth has been considerably reduced it has not closed up. This has been explained by inferring a balance between the sediment transported southwestward during spring, summer and autumn, and that transported northeastward during winter. The wave data analyzed here indicates that this hypothesis is not necessarily true. Even though the amount of sediment transported along the sandbar is much greater in winter ($817 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$) than at other times of the year, the winter wave characteristics, particularly direction, indicate that sediment is transported in the direction of the estuary mouth. This result suggests that during a typical year the dominant sediment transport direction along the sandbar is to the northeast, and this has undoubtedly contributed to increase the length of the sandbar.

The fact that the PBE mouth still remains open must be attributed to other physical processes and not to an annual balance in the magnitudes and directions of sediment transport along the sandbar. For example, recent studies (Ortiz *et al.* 2003, Delgado-González *et al.* 2005) suggest that the extraordinary input of sediment during the extreme rainfall events of 1978 and 1983 caused significant silting in the PBE basin, which considerably reduced the self-dredging ability of the mouth and facilitated the longitudinal growth of the sandbar, but kept the mouth open.

It is important to mention that the longitudinal growth of the PBE sandbar has not been continuous. During the winter of 1978/1979, the width of the estuary mouth increased from 444 to 756 m as a result of severe erosion at the tip of the sandbar. This erosion was attributed to the effects caused by the extreme wave storms during the El Niño winter of 1977/1978 (Dormurat 1978, González-Calvillo and Cupul-Magaña 1986, Lizárraga-Arciniega *et al.* 2003).

Another aspect that may be playing an important role in maintaining the estuary mouth open is a possible inequality between the magnitudes of the ebb and flood tidal currents. Ortiz *et al.* (2003) used a hydrodynamic model to simulate the maximum speeds attained during ebb and flood tides in PBE, and their results show that the velocities during ebb tide are much greater than during flood tide, thus preventing the accumulation of sediment at the mouth and increasing the estuary's self-dredging ability.

It can therefore be concluded that during winter, the dominant waves that reach Todos Santos Bay come from the west-northwest and approach the sandbar from the west. The characteristics of these waves together with the orientation of the sandbar can generate a net longshore sediment transport of up to $817 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ towards the northeast, in the direction of the estuary mouth. This result contradicts the hypothesis that the winter longshore transport direction is southeastward and allows us to establish, considering the results of Torres-

algunos eventos de tormenta de corta duración muestra una marcada asociación entre la creciente altura del oleaje y el incremento en el periodo, lo que permite suponer que las olas dominantes registradas fueron generadas por tormentas lejanas.

Por otro lado, se observa una pequeña desviación estándar ($\sim 17^\circ$) en la dirección de aproximación del oleaje a la barra del estero. Esto sugiere que la dirección del transporte de sedimento determinada en este trabajo es una condición típica del oleaje durante la época invernal, sobretudo si se considera que el patrón de refracción resultó ser más sensible al ángulo de aproximación de las olas que a su altura y periodo. Esto incrementa la relevancia de los resultados aquí presentados.

La longitud de la barra del EPB se ha estado incrementando durante las últimas dos décadas, y aunque esto conlleva a una reducción considerable del ancho de la boca del estero, ésta no se ha cerrado. Esto se ha explicado infiriendo un balance entre el sedimento que se transporta hacia el oeste durante primavera, verano y otoño, y el que se transporta hacia el noreste durante la época invernal. La información de oleaje analizada aquí sugiere que dicha hipótesis no es necesariamente cierta. Si bien durante el invierno la cantidad de sedimento que se transporta a lo largo de la barra es mucho mayor ($817 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$) que las cantidades que se reportan para las otras épocas del año, las características del oleaje en invierno, particularmente su dirección, inducen un transporte de sedimento en dirección a la boca del estero. Esto parece sugerir que durante un año típico la dirección dominante del transporte de sedimento a lo largo de la barra es hacia el noreste, lo que sin duda ha contribuido a incrementar más rápidamente la longitud de la barra del estero.

El hecho de que la boca del estero no se haya cerrado aún puede ser atribuible a otros procesos físicos y no a un balance en un ciclo anual en las magnitudes y direcciones del transporte de sedimento a lo largo de la barra. Por ejemplo, trabajos recientes (Ortiz *et al.* 2003, Delgado-González *et al.* 2005) sugieren que los aportes extraordinarios de sedimento durante las lluvias extremas de 1978 a 1983 asolvieron considerablemente la cuenca del estero, lo que redujo considerablemente la capacidad de autodragado de la boca del estero y facilitó el crecimiento longitudinal de la barra pero manteniendo la boca del estero abierta.

Es importante mencionar que el crecimiento longitudinal de la barra no ha sido continuo. Durante el invierno 1978/1979 el ancho de la boca del estero pasó de 444 a 756 m, como consecuencia de la erosión extrema en la punta de la barra del estero. Tal erosión fue atribuida a los efectos ocasionados por las tormentas con oleaje extremo registradas durante el invierno 1977/1978, reportado como invierno Niño (Dormurat 1978, González-Calvillo y Cupul-Magaña 1986, Lizárraga-Arciniega *et al.* 2003).

Otro aspecto que pudiera contribuir de manera importante a mantener la boca del estero abierta es la existencia de una desigualdad entre las magnitudes del flujo y reflujo de la marea. Ortiz *et al.* (2003), mediante el uso de un modelo hidrodinámico, simulaban las velocidades máximas alcanzadas durante flujo y reflujo de la marea en el EPB. Sus resultados muestran

Navarrete (1991), that during a typical year the dominant long-shore sediment transport along the PBE sandbar is to the northeast.

Acknowledgements

We thank CONACYT for financial support through project SEP-2004-C01-47656.

English translation by Christine Harris.

References

- Allan JC, Komar PD. 2000. Are ocean wave heights increasing in the eastern North Pacific? *EOS* 81: 561, 566–567.
- Allan JC, Komar PD. 2002. Nearshore-process climates related to changing deep-water wave conditions. *Shore & Beach* 70: 31–40.
- Blanco-Betancourt R. 1987. Comparación de dos modelos de predicción de la corriente a lo largo de la playa, con datos reales obtenidos en la barra del estero de Punta Banda, B.C. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 36 pp.
- CERC. 1984. Shore Protection Manual. Vicksburg, Mississippi: US Army Coastal Engineering Research Center, Corps of Engineers.
- 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.
- Dormurat JW. 1978. Selected coastal shoredamage in California. Winter of 1977–1978. *Shore & Beach* 46: 15–20.
- González-Calvillo A, Cupul-Magaña L. 1986. Causas de erosión de Playas de Tijuana, BC, durante el periodo 1975–1985. *Cienc. Mar.* 12: 82–94.
- Kirby JT, Dalrymple RA. 1984. Combined refraction/diffraction model, REF2DIF-1, version 2.5. Technical Report CACR-94-22. Centre for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, Newark, 172 pp.
- Lizárraga-Arciniega R, Chee-Barragán A, Gil-Silva E, Mendoza-Ponce T, Martínez-Díaz-de-León A. 2003. Effect of El Niño on the subaerial beach Playas de Rosarito, B.C., México. *Geofís. Int.* 42: 419–428.
- que las velocidades durante el reflujo son mucho mayores que durante el flujo, previniendo así la acumulación de sedimento en la boca e incrementando por otro lado la capacidad de auto-dragado del estero.
- Por lo anterior se puede concluir que durante la época invernal el oleaje dominante que arriba a la bahía proviene del oeste-noroeste, aproximándose a la barra del estero con dirección oeste franco. Las características de este oleaje en combinación con la orientación de la barra pueden inducir un transporte litoral neto de sedimento de hasta $817 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ en dirección noreste, hacia la boca del estero. Este resultado contradice la hipótesis de que durante el invierno la dirección del transporte litoral es hacia el suroeste, y permite establecer, aunado a los resultados de Torres-Navarrete (1991), que a lo largo de un año típico de oleaje la dirección dominante del transporte litoral de sedimento en la barra del estero es hacia el noreste.

Agradecimientos

Agradecemos al CONACYT por el apoyo financiero a través del proyecto SEP-2004-C01-47656.

- Lizárraga-Arciniega JR, Martínez-Díaz-de-León A, Delgado-González O, Torres C, Galindo-Bect LA. 2007. Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de la playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México. *Cienc. Mar.* 33: 259–269.
- Martínez-Díaz-de-León A. 2004. Spatial variability of wave data from Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *J. Coast. Res.* 20: 1231–1236.
- Martínez-Díaz-de-León A, Nava-Button C, Ocampo-Torres FJ. 1989. Estadística del oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C., de septiembre de 1986 a agosto de 1987. *Cienc. Mar.* 15(3): 1–20.
- Ortiz M, Huerta-Tamayo L, Hinojosa A. 2003. Transporte de sedimento por tracción de marea en el Estero de Punta Banda, Baja California, México. *GEOS* 23: 283–294.
- Torres-Navarrete CR. 1991. Transporte litoral en una zona de la Bahía de Todos Santos, B.C., México, durante abril, agosto y octubre de 1985. *Cienc. Mar.* 17(3): 59–71.

*Recibido en mayo de 2007;
aceptado en febrero de 2008.*