

Nota de Investigación/Research Note

Morphodynamics of carbonate beaches in the Yucatán Peninsula

Morfoodinámica del perfil de playa con sedimentos carbonatados en la Península de Yucatán

A Cuevas-Jiménez^{1,2}, J Euán-Ávila¹¹ Centro de Investigación y Estudios Avanzados, Unidad Mérida, Carretera Mérida-Progreso Km 6, 97300 Mérida, Yucatán, México.² Universidad Marista de Mérida, Periférico Norte, Tablaje Catastral 13941, Carretera a Progreso, 97300 Mérida, Yucatán, México. E-mail: acuevas@marista.edu.mx**Abstract**

The concept of beach morphodynamics was used to classify the swash zone of carbonate sandy beaches in the central part of the state of Yucatán (Mexico). Several topobathymetric profiles were analyzed to determine the slope of the swash zone, shape parameter A of Dean's model, and shoreline advance and recession. Grain size and wave data were also analyzed to determine the dimensionless fall velocity (Ω). The slope of the swash zone was in general greater during the tropical storm season than during the northerly wind (*Nortes*) season. Mean profile values according to shape parameter A ranged from -0.186 to -0.074 . The Ω values indicated intermediate beaches with a reflective tendency. Shoreline change relative to beach width helped to identify and rank security levels of beach segments.

Key words: beach management, beach morphodynamics, beach profiles, carbonate sands, omega.

Resumen

Se utilizó el concepto de morfoodinámica de playas para tipificar el comportamiento de la zona de *swash* en playas con sedimentos carbonatados de la porción central del Estado de Yucatán, estableciendo su variabilidad espaciotemporal. Los resultados provienen del análisis de múltiples perfiles topo-batimétricos, de los sedimentos y del oleaje, para la determinación de la pendiente en la zona de *swash*, el parámetro de forma A del modelo de Dean, de los avances y retrocesos de la línea de costa y del parámetro adimensional de velocidad de asentamiento (Ω). La pendiente en la zona de *swash* en general resultó mayor durante la temporada de ondas tropicales y menor durante la devientos del norte o *Nortes*. Los perfiles medios de acuerdo al parámetro de forma A para el modelo de Dean arrojaron valores entre -0.186 y -0.074 . Los valores de Ω tipificaron playas intermedias con tendencia a reflectivas. El movimiento de la línea de costa en relación con el ancho de la playa ayudó a identificar y establecer diferentes niveles de seguridad para segmentos de playa.

Palabras clave: manejo de playas, morfoodinámica de playas, perfiles de playa, arenas carbonatadas, omega.

Introduction

Non-consolidated beach sediments originate from igneous, metamorphic, and sedimentary rock erosion, and from the precipitation of salts (autigenic material), or from fragments of rigid structures secreted by marine organisms (biogenic material). These sediments and the processes determining their transport play an important role in the formation and dynamics of beaches, creating accumulation and erosion areas that mould the coastline. The processes conditioning beach dynamics are closely related to a wide variety of environmental factors such as waves, tides, winds, and currents, as well as to the bathymetry, and sediment size and availability (Bird 2003, Short 1999). Another factor that plays a role in the sediment transport process is dune and intertidal vegetation, which acts as a sediment stabilizing agent (Bird 2003). Nevertheless, owing to the non-consolidated nature of the sediment, the beach morphology

Introducción

El material sedimentario no consolidado que constituye las playas proviene de la erosión de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, y de la precipitación de sales (material autigénico) o bien, son fragmentos de estructuras rígidas secretadas por organismos marinos (material biogénico). Estos sedimentos y los procesos que determinan su transporte, juegan un papel preponderante en la conformación y dinámica de la playa creando zonas de acumulación y de erosión que moldean la línea de costa. Los procesos que condicionan la dinámica de las playas mantienen una estrecha relación con una amplia variedad de factores ambientales como el oleaje, la marea, los vientos y las corrientes, así como con la batimetría, el tamaño del sedimento y la disponibilidad del mismo (Bird 2003, Short 1999). Un factor ecológico adicional en el proceso de transporte sedimentario es la comunidad vegetal que se presenta

quickly responds to changes in hydrodynamic and eolic patterns. Constant wave, tide, and wind action can pose a grave threat to coastal development (USACE 1984). Climate change may increase the erosive effects of these processes due to a rise in sea level and extreme meteorological phenomena like hurricanes (Hooke *et al.* 1995, Curtis and Hodell 1996, Forbes *et al.* 2004). The risk of erosion also increases when sediment transport patterns are modified by human activities such as the improper construction of maritime infrastructure and coastal defenses, and the deforestation of dune areas. When sedimentary material is lost, beaches deteriorate, recede, and lose habitat quality as well as their buffer effect, leaving properties and structures unprotected. In addition to economic and ecological losses, beach deterioration also affects nearby coastal ecosystems. A beach, therefore, considered one of the planet's most fragile and dynamic natural spaces (Short 1999, Bird 2003), highly attractive for coastal development, requires long data series to contribute to the knowledge for its sustainable development.

Classifying or regionalizing beaches in terms of their morphodynamics facilitates their management, since it is possible to establish criteria to reduce risks and increase security in the development of multiple coastal projects (Benedet *et al.* 2004). Most beach management studies thus concentrate their attention on the changes in the morphology of beach profiles. Dean (1977) proposed using an equilibrium profile to understand and synthesize beach profile behaviour. Other studies have incorporated dissipative and reflective conditions to evaluate the equilibrium constants (Bernabeu *et al.* 2003), the results showing a large correlation with the slope and grain size, particularly for the surf profile. Wright and Short (1984) proposed the use of the dimensionless fall velocity, Ω , to classify beaches, relating wave climate and specific gravity of sand grains. In this classification scheme, $\Omega < 1$ corresponds to reflective beaches, $1 < \Omega < 6$ to intermediate beaches, and $\Omega > 6$ to dissipative beaches.

This study aimed to determine the types of carbonate beaches based on the spatio-temporal variation of the morphodynamic characteristics in the central coastal area of the state of Yucatán (Mexico). The elements of characterization included changes in the slope of the swash zone, analysis of the mean beach profile by estimating the shape parameter of the Dean equilibrium profile, shoreline advance and retreat, as well as grain size and wave characterization to determine the variation of Ω along the coast and during the different seasons.

Study area

The Yucatán shelf corresponds to the submerged part of a limestone plate that includes the Yucatán Peninsula. The plate slopes gently northwards and is bounded on the west, north, and east by a continental slope that drops from the edge of the submerged shelf to abyssal depths of the Caribbean Sea and Gulf of Mexico. The tide regime is mixed: diurnal tides predominate and semidiurnal tides occur during neap tides. Tide range varies between 0.1 and 0.8 m during neap and spring

tanto en la duna como en el intermareal actuando como agente estabilizador de sedimento (Bird 2003). Sin embargo, debido a su constitución, caracterizada por sedimento no consolidado, la morfología de la playa responde rápidamente a los cambios en los patrones hidrodinámicos y eólicos. La acción constante del oleaje, la marea y el viento, puede representar una grave amenaza al desarrollo costero (USACE 1984). Con el cambio climático se espera que los efectos erosivos de estos procesos se vean acentuados por la elevación del nivel del mar y fenómenos meteorológicos extremos como los huracanes (Forbes *et al.* 2004, Curtis y Hodell 1996, Hooke *et al.* 1995). A su vez, el riesgo de erosión se incrementa cuando los patrones de transporte sedimentario son modificados por acciones del hombre como la construcción inadecuada de infraestructura marítima y de estructuras de protección, y por deforestación del área de duna. Al perder material sedimentario la playa se deteriora, retrocede, pierde calidad de hábitat, y pierde su efecto amortiguador, poniendo en riesgo propiedades y bienes. Aunado a la pérdida económica y de servicios ecológicos, el deterioro de la playa afecta también a los ecosistemas costeros contiguos. Este sistema físico, considerado como uno de los espacios naturales más dinámicos en el planeta (Short 1999, Bird 2003), de alta fragilidad y sumamente atractivo para el desarrollo costero, requiere de series largas de datos que deriven en mayores conocimientos en la planeación para su desarrollo sustentable.

Clasificar o regionalizar las playas en función de su morfodinámica facilita su manejo, ya que es posible establecer criterios para reducir los riesgos y aumentar la seguridad en el desarrollo de múltiples actividades costeras (Benedet *et al.* 2004). Por ello la mayoría de los estudios de playas con este propósito concentran su atención en los cambios de la morfología de los perfiles de playa. Dean (1977) propuso el uso del perfil de equilibrio como una forma de entender y sintetizar el comportamiento del perfil de playa. Otros estudios han incorporado condiciones disipativas y reflectivas para la evaluación de las constantes del perfil de equilibrio (Bernabeu *et al.* 2003), con resultados que muestran una gran correlación con la pendiente y el tamaño de grano, particularmente en el perfil de *surf*. Wright y Short (1984) propusieron la utilización del parámetro adimensional de velocidad de asentamiento, Ω , para la clasificación de las playas, relacionando el clima de oleaje y la gravedad específica de los granos de arena. Este esquema establece un comportamiento reflectivo de las playas para valores de $\Omega < 1$, playas intermedias para valores de $1 < \Omega < 6$ y playas disipativas para $\Omega > 6$.

El propósito de este estudio fue obtener una tipificación de playas con sedimento carbonatado considerando la variación espaciotemporal de las características morfodinámicas en la zona central de la costa del Estado de Yucatán. Los elementos de caracterización involucraron cambios en la pendiente en la zona de *swash*, el análisis del perfil medio de playa a través de la estimación del parámetro de forma del perfil de equilibrio de Dean, el avance y retroceso de la línea de costa, así como la caracterización granulométrica del sedimento y la del oleaje para determinar al parámetro Ω en su variación a largo de la costa y durante las temporadas climáticas.

tides, respectively; the main harmonics are shown in table 1 (M Reyes, pers. comm.). The sedimentary conditions of the Yucatán shelf have been similar from the Tertiary (66 Ma) and Early Pleistocene (1.6 Ma), to the Late Quaternary (10,000 yr); i.e., carbonate sediment deposit on ancient limestone rock. The emergent adjacent land is characterized by a karst topography that lacks a surface drainage system, so the dominant sedimentary material consists of carbonate sediments from the same shelf and lacks terrigenous material (Logan *et al.* 1969). In this study the surveys were conducted in a part of the beach where the sedimentary material that composes it for the most part consists of biogenic calcareous material such as shell and coral fragments, seaweed, sea urchin spicules, etc. (Nolasco-Montero and Carranza-Edwards 1988). The coastal area consists of a system of barrier islands and spits, forming a wetland system along the entire Yucatán coastline.

The study area corresponds to the central part of the sandy littoral in northern Yucatán (fig. 1), and includes the fishing villages or port towns of Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub, and Uaymitún, which combine vacation properties and permanent residents. Local activities are associated with the main cargo and cruise port of Progreso, artisanal and coastal fishing, tourism, and scientific research.

Beach erosion along the Yucatán coastline is a growing cause for concern. Its impact on coastal property is relevant considering that the area is a tourism and recreation destination, and some parts present a high degree of urbanization. In view of its geographical location, Yucatán is constantly exposed to tropical storms, hurricanes, and northerlies called *Nortes*. These natural phenomena intensify the effects of sediment transport processes and produce significant changes in the morphology of the beaches. Preventive measures have been taken in the region, including the construction of breakwaters and jetties, and recently, beach nourishment (Meyer-Arendt 1991, 1993).

Material and methods

Beach profiles

According to that proposed by Bernabeu *et al.* (2003), beach profiles were characterized using physiographic

Table 1. Main harmonics obtained from the pressure sensor installed at 5 m depth.

Tabla 1. Principales armónicos obtenidos del sensor de presión colocado a 5 m de profundidad.

Harmonic	Frequency (h ⁻¹)	Amplitude (m)	Phase (degrees)
O1	0.0387	0.1673	310.51
P1	0.0416	0.0535	308.17
K1	0.0418	0.1824	311.93
M2	0.0805	0.0406	128.36
N2	0.0790	0.0165	107.86

Área de estudio

La plataforma de Yucatán corresponde a la parte sumergida de una placa caliza que incluye la Península de Yucatán. La placa tiene una suave pendiente hacia el norte y es bordeada en el oeste, norte y este por el talud continental que se desploma desde la margen de la plataforma sumergida a profundidades abisales del Mar Caribe y Golfo de México. El régimen mareal es mixto, predominando la marea diurna, y con marea semi-diurna durante mareas muertas. El rango mareal varía de 0.1 y 0.8 metros en mareas muertas y vivas, respectivamente; los principales armónicos se indican en la tabla 1 (Reyes, com. pers.). Las condiciones sedimentarias de la plataforma de Yucatán han sido similares desde el Terciario (66Ma) y el Pleistoceno temprano (1.6Ma), hasta el Cuaternario tardío (10,000a); esto es, una depositación de sedimentos carbonatados sobre roca caliza antigua. La tierra emergente adyacente se caracteriza por presentar una topografía cárstica que carece de un sistema de drenaje superficial, por lo que el material sedimentario dominante está constituido de sedimentos carbonatados propios de la misma plataforma y carente de materiales terrígenos (Logan *et al.* 1969). En este trabajo los estudios se realizaron en una porción de playa donde el material sedimentario que la forma consiste, en su mayoría, de material calcáreo biogénico como fragmentos de concha, coral, algas, espículas de erizo, etc. (Nolasco-Montero y Carranza-Edwards 1988). La forma de la zona costera corresponde a un sistema de restingas (*spits*) e islas de barrera, que forman un sistema de humedales a lo largo de todo el Estado de Yucatán.

El área de estudio se extiende desde el puerto de Chuburná hasta Uaymitún, Yucatán, que corresponde a la porción central del litoral arenoso del norte del estado (fig. 1). En ella se encuentran diversos asentamientos humanos (las poblaciones de Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub y Uaymitún) en los que se combinan propiedades veraniegas y de residentes permanentes. Las propiedades veraniegas son particularmente empleadas durante los periodos vacacionales. Otras actividades en la zona están asociadas al puerto de altura y al manejo de carga y pasajeros, la pesca ribereña y de mediana altura, el turismo y la investigación.

El problema de erosión de playa en las costas de Yucatán es preocupante, y dado que afecta las propiedades próximas a la línea de costa, cobra gran importancia por la vocación turística y recreativa de la zona, así como por el alto grado de urbanización que presentan algunas porciones costeras. Por su ubicación geográfica, la costa de Yucatán se encuentra expuesta continuamente al efecto de tormentas tropicales, huracanes y *Nortes*, fenómenos naturales que intensifican los efectos de los procesos de transporte de sedimento y causan cambios importantes en la morfología de las playas. Entre las acciones de protección más utilizadas en la región se encuentran la construcción de escolleras y espigones, y recientemente la alimentación de playas (Meyer-Arendt 1991, 1993).

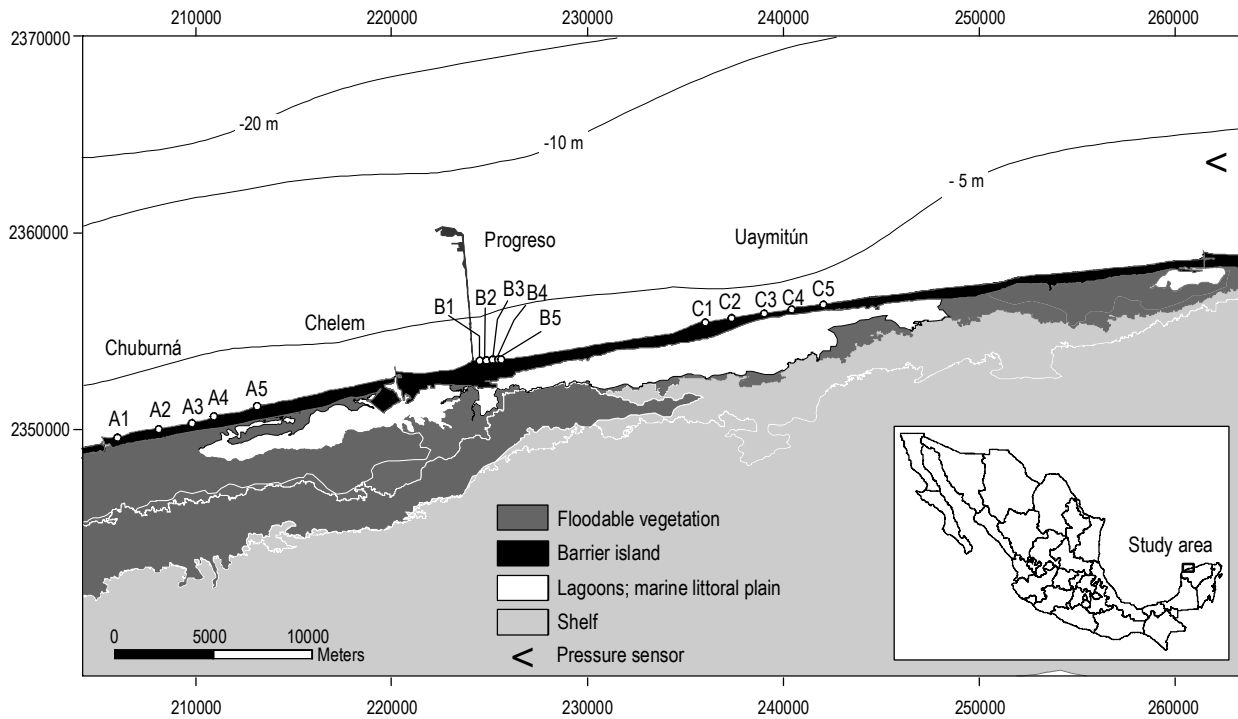


Figure 1. Location of the study area in Yucatán, Mexico. Topobathymetric profiles were taken in zone A (Chuburná and Chelem), zone B (Puerto Progreso), and zone C (Uaymitún). The location of the wave measuring instrument is also shown.

Figura 1. Ubicación del área de estudio en Yucatán, México. Sitios de perfiles topo-batimétricos en las zonas A (Chuburná y Chelem), B (Puerto Progreso) y C (Uaymitún). Se muestra también la ubicación del instrumento de medición de oleaje.

descriptors and based on the seasonal means. A bimonthly topographic survey (Compton 1985, Bannister *et al.* 2002) was conducted from February 2002 to July 2006 using an optical level. Measurements initiated in the dune zone, or in front of some property or construction, and extended to the submerged zone where the stadia could still be held by a person standing up. This limit in the submerged zone generally includes the breaker zone, and the surf zone can thus be recorded. Sampling distance along each profile was approximately 3 m between each measurement. Notable physiographic features were also recorded, such as dune scarps and other abrupt changes observed. For the temporal analysis of the profiles, each profile started from a reference point whose geographic position and orthometric height were determined with a differential global positioning system. Figure 1 shows the distribution of the 15 profiles measured in this study. The five sites on the beaches of Chuburná (zone A) were separated by approximately 1500 m, those on the beaches of Progreso (zone B) by 350 m, and those on the beaches of Uaymitún (zone C) by 1500 m. The characteristics of the data series analyzed herein are shown in table 2. A total of 365 profiles were analyzed along approximately 35 km of beaches, showing transport cells and subcells whose limits are defined by port infrastructure and the shoreline's own configuration. To estimate the mean profile, standard deviation, and slope of the swash zone, the height data were linearly interpolated at a constant interval. Shape parameter A of the equilibrium profile equation proposed by Bruun (1954)

Material y métodos

Perfiles de playa

Con base en los estudios de perfiles propuestos por Bernabeu *et al.* (2003), se caracterizaron perfiles de playas en función de algunos descriptores fisiográficos a partir de los promedios en las diferentes épocas del año. Se empleó un levantamiento topográfico (Bannister *et al.* 2002, Compton 1985) bimestral de febrero de 2002 a julio de 2006 utilizando un nivel óptico, iniciando las mediciones del perfil en la zona de duna, o bien, al frente de alguna propiedad o construcción, y extendiéndolas a la zona sumergida hasta donde el estadal puede ser sostenido por una persona de pie. Generalmente este límite en la zona sumergida comprende la rompiente de ola, lo que permite registrar la zona de *surf*. La distancia de muestreo a lo largo de cada perfil fue sistemáticamente de aproximadamente 3 m entre cada dato. Adicionalmente se registraron los rasgos fisiográficos sobresalientes como escarpes de dunas y otros cambios abruptos que se encontraban. Para comparar los perfiles en el tiempo, cada perfil se inició desde una referencia cuya posición geográfica y altura ortométrica fueron determinadas con un sistema de posicionamiento global diferencial. Los 15 perfiles utilizados en el trabajo se distribuyen de acuerdo con la figura 1. Los cinco sitios en las playas de Chuburná (Zona A) tienen una separación aproximada de 1500 m entre ellos, los de las playas de Puerto Progreso (Zona B)

Table 2. Number of topobathymetric profiles analyzed.
Tabla 2. Número de perfiles topobatimétricos analizados.

Zone	Number of profiles	Start date–end date	Number of times sampled	Total number of profiles sampled
A	5	02/2002–07/2006	28	140
B	5	10/2002–07/2006	24	120
C	5	04/2003–07/2006	21	105
Total	15			365

and Dean (1977) was determined: $h = Ax^{2/3}$. This shape parameter was estimated by a regression for each mean profile and for each season. Analysis of the erosive and accumulative trends along the beaches consists of observing the shoreline position over time. The shoreline reference was defined as zero orthometric height.

Wave characterization

Waves were characterized using a pressure sensor installed in an acoustic Doppler current profiler (ADCP) of 0.1% accuracy. The equipment was attached to a 50-cm-high pyramid-shaped metallic structure and installed at a depth of 5 m. The location of the instrument depended on logistic reasons and on the homogeneity of the bottom of the Yucatán shelf, as well as on the dominant wave direction under the assumption that the characteristics recorded by the instrument apply to all the study area in general. Sampling was carried out over 22 months, from March 2004 to October 2006. Due to maintenance reasons, sampling was suspended during three months of 2004 and six months of 2005. The instrument was programmed to measure continuously during the first 5 min of each hour at a frequency of 1 Hz (300 measurements per hour), storing in an internal memory the mean values of H_s (cm) and T_p (s), which describe the mean of the heights of one-third of the highest waves and the peak period of wave trains, respectively.

Sediment granulometry

Sediment samples were taken along the beach profiles to determine grain size in the surf zone and beach face. The samples were dried and sieved (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, and 4.0 phi sieves), and the size-separated fractions were weighed using an analytical balance of 0.001 g accuracy. Data were plotted on a logarithmic scale to obtain the percentiles needed to estimate the mean, median, standard deviation (dispersion or sorting), asymmetry, and kurtosis (Folk 1966).

Calculation of Ω

The morphodynamic boundary condition equation, adapted by Benedet *et al.* (2004), was used. This equation identifies parametric limits that allow the classification of beach types

350 m, y los localizados en las playas de Uaymitún (Zona C) de 1500 m. Las características de las series de datos analizadas y presentadas en este estudio se muestran en la tabla 2. Se analizó un total de 365 perfiles a lo largo de aproximadamente 35 km de playas, en los que se presentan celdas y sub-celdas de transportes cuyos límites se encuentran definidos por infraestructuras portuarias y la propia configuración costera. Para estimar el perfil medio, la desviación estándar y la pendiente en la zona de *swash*, los datos de altura fueron interpolados linealmente a un intervalo constante. Se determinó el parámetro de forma A de la expresión del perfil de equilibrio propuesta por Bruun (1954) y Dean (1977) tipo $h = Ax^{2/3}$. Dicho parámetro de forma fue estimado con una regresión para cada perfil medio y para cada temporada climática. El estudio de tendencia erosiva/acumulativa en los perfiles está basado en el seguimiento en el tiempo de la posición de la línea de costa. La referencia a la línea de costa fue definida como la altura cero ortométrica.

Caracterización del oleaje

Los descriptores de oleaje se obtuvieron con un sensor de presión instalado en un perfilador de corrientes acústico doppler (ADCP, Acoustic Doppler Current Profilers), con una precisión de 0.1%. El equipo fue fijado a una estructura metálica piramidal de 50 cm de alto e instalado a una profundidad de 5 m. La localización del instrumento respondió a facilidades logísticas y a la homogeneidad del fondo de la plataforma de Yucatán, así como a la dirección dominante del oleaje que permite suponer que las características registradas por el instrumento se aplican en general para toda el área de estudio. El muestreo comprendió un total de 22 meses entre marzo de 2004 y octubre de 2006. Por motivos de mantenimiento del equipo se suspendió el registro en 3 meses en 2004 y 6 meses en 2005. El instrumento fue programado para realizar mediciones continuas durante los primeros 5 minutos de cada hora a una frecuencia de 1 Hz (300 mediciones por hora) y almacenar en una memoria interna los valores medios de H_s (cm) y T_p (s) que describen la altura media de ola del tercio de alturas mayor y el período máximo de los trenes de olas, respectivamente.

Granulometría del sedimento

Se tomaron muestras de sedimento a lo largo de los perfiles de playa para realizar un análisis granulométrico en las

(morphodynamic states). Based on Ω , it is possible to identify dissipative beaches ($\Omega > 6$), intermediate beaches ($1 < \Omega < 6$), and reflective beaches ($\Omega < 1$).

$$\Omega = Hb/W_sT$$

where Hb is the breaking wave height (m), W_s is the particle settling velocity ($m\ s^{-1}$), and T is the wave period (s).

The values required to determine Ω were estimated using the wave data obtained by the ADCP pressure sensor and the grain size results. Wave height in the breaker zone (Hb) was estimated with the formula proposed by Komar and Gaughan (1972), using the wave sensor records:

$$Hb = 0.56H_o(H_o/L_o)^{-1/5}$$

where H_o is wave height in deep waters (m) and L_o is wave length in deep waters (m). The H_o and L_o values were estimated using the ADCP data and the equations provided by USACE (1984).

Particle settling velocity (W_s) was determined using the formula given by Toledano and Silva (2005), who studied biogenic carbonate fine sands from the study area, and based on Bruun (1954) and Dean (1977) for carbonate particles whose median (D_{50}) ranges from 0.1 to 1 mm:

$$W_s = 273 \times D_{50}^{1.1}$$

Results

Mean beach profiles

The mean profiles and their standard deviations are shown in figure 2. The standard deviation curves clearly show the profile dynamics, and the greatest changes consistently occur in the swash zone. For all these beaches, the standard deviation for height barely exceeds 0.6 m except in the case of profile A4 (0.9 m). At this site, a jetty created a wide beach, but it was removed in 2002 because of management reasons resulting in significant beach loss despite artificial sand nourishment operations. The lowest standard deviation value was recorded for profile C2 (0.3 m), corresponding to the easternmost part of the study area, which has low population density and has been subject to fewer management operations.

Shape parameter A

The shape parameter A values for the mean profiles varied between -0.1863 and -0.904 (table 3), the highest values corresponding to the shallow or accumulative profiles close to the Chuburná jetty (A1, A2, and A3). Regarding the variation of A in relation to the time of year, the lower values consistently occurred during the *Nortes* season. Figure 3 shows the mean profiles obtained with the estimates of the equilibrium profile

zonas de cara de playa y *surf*. Las muestras fueron secadas y tamizadas empleando tamices de 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 y 4.0 phi, y las fracciones separadas por tamaño fueron pesadas con una balanza analítica de 0.001 g de precisión. Los datos fueron graficados a escala logarítmica para obtener los percentiles que permitirían estimar la media, mediana, desviación estándar (dispersión o sorteo), asimetría y kurtosis (Folk 1966).

Determinación de Ω

Se empleó la ecuación de condición de frontera morfodinámica (MBC, morphodynamic boundary condition) adaptada por Benedet *et al.* (2004) que identifica límites paramétricos y permite clasificar una playa en sus diferentes morfotipos. Empleando el parámetro Ω es posible identificar playas disipativas ($\Omega > 6$), intermedias (Ω entre 1 y 6) o reflectivas ($\Omega < 1$).

$$\Omega = Hb/W_sT$$

donde Hb es la altura de ola en rompiente (m), W_s es la velocidad de asentamiento de la partícula ($m\ s^{-1}$) y T es el período de ola (s).

Los valores requeridos para la determinación de Ω fueron estimados a partir de los datos de oleaje estimados con el sensor de presión del ADCP y de los resultados del análisis de granulometría. La estimación de la altura de ola en la zona de rompiente (Hb) se realizó a partir de la fórmula propuesta por Komar y Gaughan (1972), utilizando los registros de oleaje del sensor de oleaje.

$$Hb = 0.56H_o(H_o/L_o)^{-1/5}$$

donde H_o es la altura de ola en aguas profundas (m) y L_o es la longitud de la ola en aguas profundas (m).

Los valores de altura y longitud de la ola en aguas profundas (H_o y L_o respectivamente) fueron estimados a partir de los datos del ADCP y empleando las fórmulas propuestas en USACE (1984).

Para determinar la velocidad de asentamiento de la partícula (W_s) se empleó la fórmula de Toledano y Silva (2005), quienes trabajaron con arenas de playa de la región de estudio con arenas finas biogénicas carbonatadas, y basados en Bruun (1954) y Dean (1977) para partículas carbonatadas cuya mediana (D_{50}) está entre 0.1 y 1 mm:

$$W_s = 273 \times D_{50}^{1.1}$$

Resultados

Perfiles medios de playa

Los perfiles medios y su desviación estándar se muestran en la figura 2. Las curvas de desviación estándar claramente muestran la dinámica del perfil y, de forma consistente, los mayores cambios se presentan en la zona de *swash*. En todas

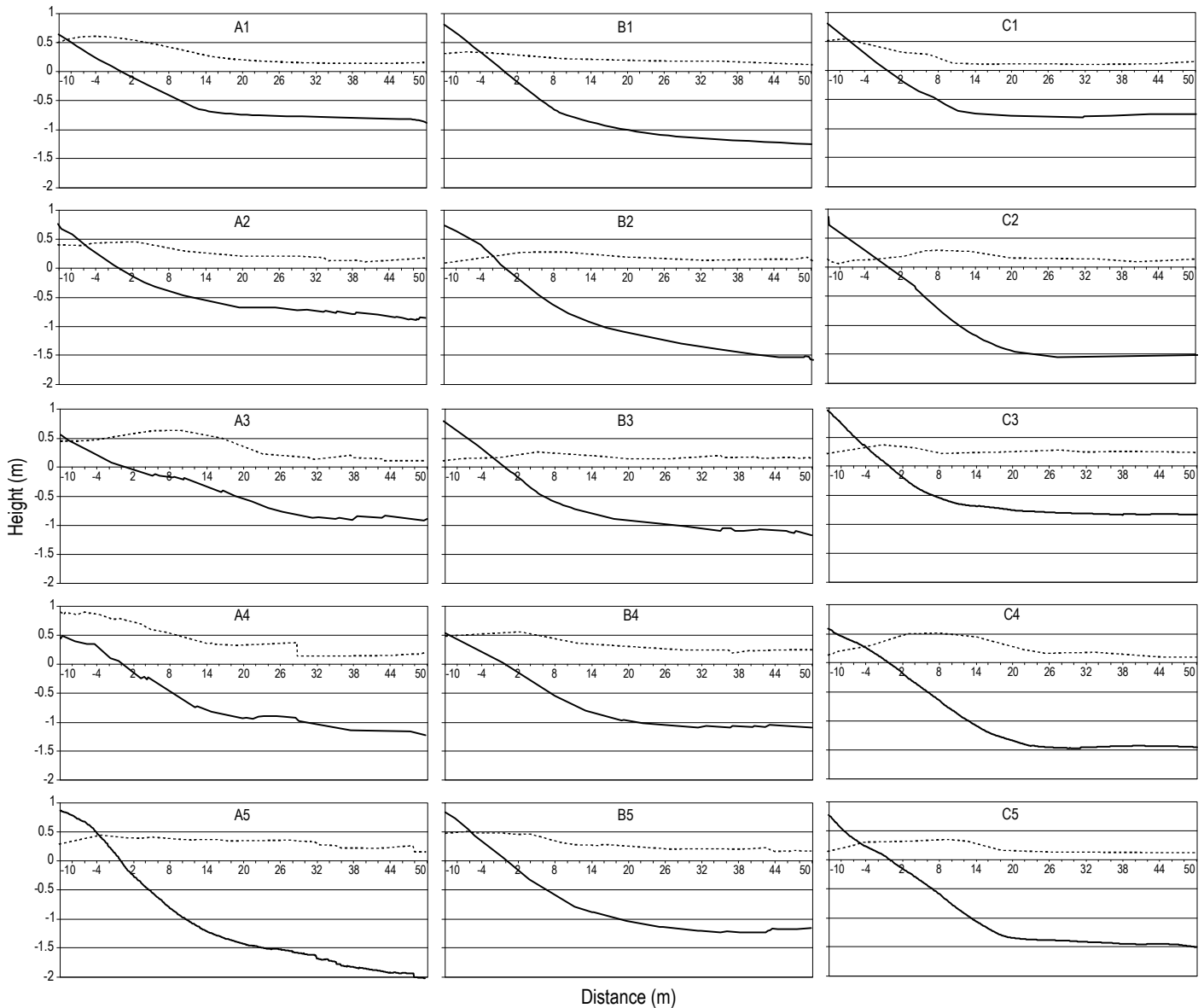


Figure 2. Mean profile and standard deviation of the profiles (1, 2, 3, 4, and 5) for the three zones surveyed (A, B, and C).
Figura 2. Perfiles medios y desviación estándar de los perfiles (1, 2, 3, 4 y 5) en las tres zonas estudiadas (A, B y C).

($h = Ax^{2/3}$). The zone A profiles show greater heterogeneity, with those close to the Chuburná jetty, in the western end of this zone, presenting softer slopes relative to profile A5, in the eastern end. The zone B profiles were more homogeneous, with intermediate slopes, whereas the zone C profiles presented the steepest slopes.

Swash zone slope

The standard deviations of the mean beach profiles indicate that the swash zone is the most dynamic zone. Figure 4 shows that mean slope values are highest during the tropical storm season and lowest during the *Nortes* season. Though this is generally true, note that the slopes in zones A and B tend to be lower during the *Nortes* season in contrast to

estas playas la desviación estándar de la altura escasamente supera los 0.6 m a excepción del perfil A4 (0.9 m), sitio donde se encontraba un espigón que generó una amplia playa y que, por acciones de manejo, fue retirado en 2002 provocando una importante pérdida de playa a pesar de la alimentación artificial de arena realizada en ese sitio. El menor valor de desviación estándar fue registrado en el perfil C2, con 0.3 m, en una zona correspondiente al extremo oriental del área de estudio, una zona de baja densidad poblacional y que ha estado sujeta a menos acciones de manejo.

Parámetro de forma A

Los valores del parámetro A de los perfiles medios se muestran en la tabla 3. Se observa que los valores de este

Table 3. Values of shape parameter A of the equilibrium profile ($h = Ax^{2/3}$).**Tabla 3.** Valores del parámetro de forma A del perfil de equilibrio ($h = Ax^{2/3}$).

Site	Mean	Nortes season (October–February)	Dry season (March–May)	Tropical storm season (June–November)
A1	-0.0998	-0.0977	-0.0958	-0.1032
A2	-0.0904	-0.0743	-0.0827	-0.0993
A3	-0.1003	-0.1007	-0.1072	-0.1007
A4	-0.1284	-0.1258	-0.1281	-0.1318
A5	-0.1805	-0.1787	-0.1737	-0.2023
B1	-0.1334	-0.1256	-0.1341	-0.1431
B2	-0.1512	-0.1384	-0.1492	-0.1642
B3	-0.1230	-0.1175	-0.1195	-0.1324
B4	-0.1266	-0.1125	-0.1185	-0.1462
B5	-0.1405	-0.1301	-0.1445	-0.1462
C1	-0.1862	-0.1860	-0.1819	-0.1876
C2	-0.1858	-0.1841	-0.1807	-0.1940
C3	-0.1831	-0.1816	-0.1804	-0.1861
C4	-0.1863	-0.1865	-0.1817	-0.1920
C5	-0.1680	-0.1722	-0.1624	-0.1713
Mean	-0.1456	-0.1408	-0.1427	-0.1534

the tropical storm season; however, this behaviour inverts in zone C.

Shoreline position trend

Analysis of the temporal shoreline position (fig. 5) revealed that in zone A, it tended to retreat significantly at sites A3 and A4, but particularly at A4, at a rate of 7.76 m yr⁻¹; however, profiles A1 and A2 showed a trend towards increasing beach width. In zone B (port of Progreso), the position of the shoreline at sites B1 and B2 tended to recede, but at B3 it remained stable, whereas at B4 and B5 it showed a progradational trend. Except for B3, the rest of the zone B profiles showed a significant trend. In zone C (eastern part of the study area), shoreline position at sites C2 and C4 revealed a tendency to retreat, in particular at C4 where this trend was more pronounced relative to the other zone C sites (2 m yr⁻¹). Sites C1, C3, and C5 showed a progradational trend.

The trend in shoreline position, expressed as the rate of advance or recession, can be very useful for beach management decisions. If this trend is considered together with the beach width, criteria can be established to classify beaches by different levels of security. Figure 6 shows that beaches of more than 60 m in width and with a tendency to prograde are very secure, such as site A1. Contrarily, those of less than 20 m in width and with a tendency to recede, like sites A4 and C4, are less secure. Beaches of intermediate security are those that are more than 20 m but less than 60 m wide.

parámetro estuvieron entre -0.1863 y -0.904, y que sus mayores valores se presentan en perfiles someros o de acumulación, que corresponden a perfiles cercanos a la escollera de Chuburná (A1, A2 y A3). Respecto a la variación de A en relación a las épocas climáticas, se observó consistentemente que los menores valores se presentan en época de Nortes. En la figura 3 se observan los perfiles medios obtenidos con las estimaciones del perfil de equilibrio tipo $h = Ax^{2/3}$. En la zona A se observa mayor heterogeneidad entre perfiles, en la que los cercanos a la escollera de Chuburná, en el extremo oeste, presentan pendientes más suaves en relación al perfil A5 localizado en el extremo oriental de esta zona. Los perfiles de la zona B son más homogéneos entre sí, con pendientes intermedias. Los perfiles de la zona C muestran pendientes más pronunciadas.

Pendiente en zona de swash

Como lo muestran las desviaciones estándares de los perfiles medios de playa, esta zona es la más dinámica. En la figura 4 se observa cómo en ondas tropicales se presentan los promedios más altos de la pendiente, mientras que en temporadas de Nortes los valores son menores. Si bien esto generalmente es cierto, se puede apreciar que las pendientes en las zonas A y B tienden a ser menores durante la época de Nortes en contraste con la época de ondas tropicales; sin embargo, en la zona C este comportamiento se invierte.

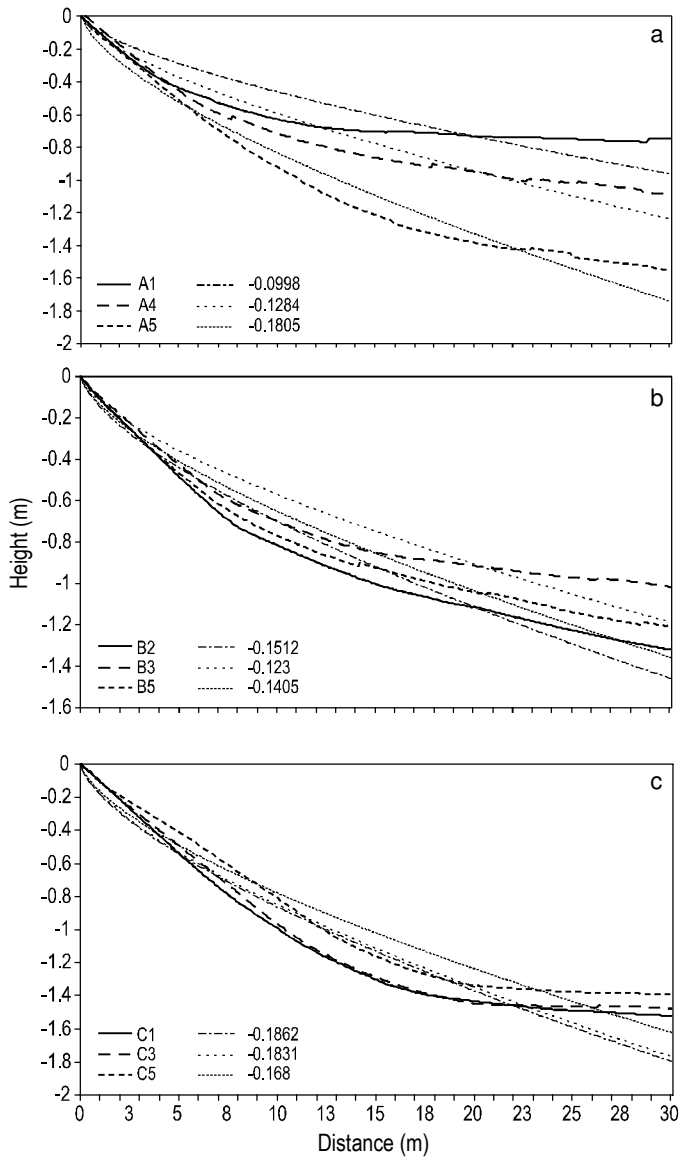


Figure 3. Mean profile of the swash and surf zones of the three zones surveyed (A, B, and C) using the equilibrium profile equation: $h = Ax^{2/3}$. The value of parameter A is shown for the profiles plotted.

Figura 3. Perfil medio de la zona de *swash* y *surf* de las tres zonas estudiadas (A, B y C) con la estimación obtenida por medio del perfil de equilibrio tipo $h = Ax^{2/3}$. En la leyenda se muestra el valor del parámetro A para los perfiles graficados.

Sediment

The grain-size percentiles obtained were used to calculate the mean, median, standard deviation (dispersion or sorting), asymmetry, and kurtosis (table 4). In general, the swash zone sand was classified as thick, poorly sorted, nearly asymmetric, and mesokurtic. The variation between thick and medium sand was relatively homogenous at all the sites surveyed and with no apparent gradient. Sand size was consistently larger in the swash zone than in the surf zone (fig. 7). The material that

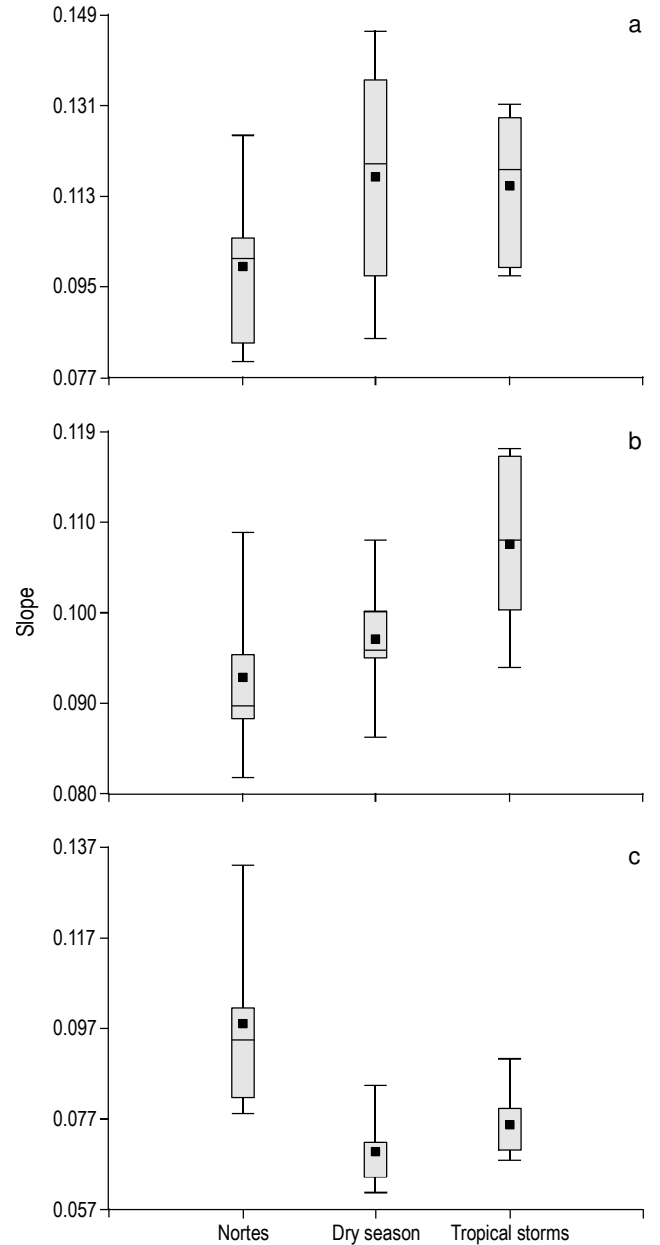


Figure 4. Swash zone slope at each of the study sites (A, B, C) and per season. The *Nortes* season lasts from October to February, the dry season from March to May, and the tropical storm season from June to November.

Figura 4. Pendiente en la zona de *swash* en cada una de las zonas de estudio (A, B, C) y por época climática. Los *Nortes* ocurren de octubre a febrero, la época de secas de marzo a mayo y las ondas tropicales de junio a noviembre.

Tendencia de la posición de la línea de costa

El análisis de la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo muestra que en la zona A (fig. 5), en los perfiles A3 y A4 ésta tiende a retroceder significativamente, en particular en el sitio A4 con una tasa de 7.76 m año^{-1} ; mientras que en los perfiles A1 y A2 se observa una tendencia a incrementar el ancho de playa. En la zona B, de Puerto Progreso, se observa

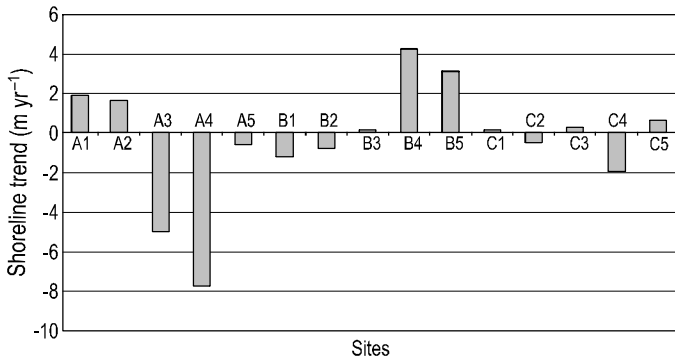


Figure 5. Shoreline advance and retreat trends in the study area. Trends were significant at sites A2, A3, A4, B1, B2, B4, B5, C2, and C4.

Figura 5. Tendencias de avance y retroceso de la línea de costa en el área de estudio. Los sitios A2, A3, A4, B1, B2, B4, B5, C2 y C4 mostraron tendencias significativas.

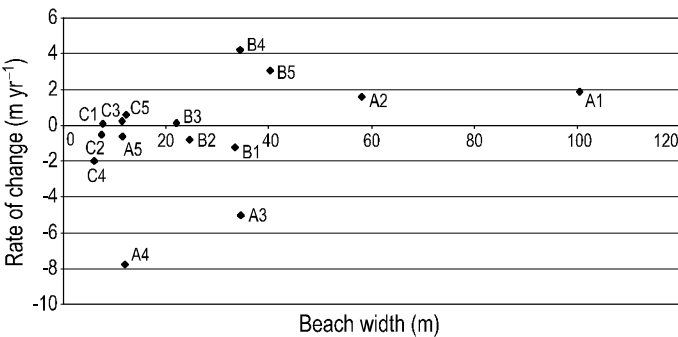


Figure 6. Beach width on the last date recorded (July 2006) and rate of change in shoreline position.

Figura 6. Ancho de playa en la última fecha registrada (julio de 2006) y tasa de cambio de la posición de la línea de costa.

remains in the swash zone consists of primarily dish-shaped mollusc shell fragments.

Wave action

A total of 15,824 data were obtained while the wave sensor was in operation. Mean significant wave height (H_s) was 24.19 cm, with a standard deviation of ± 16.15 cm, a mode of 11.40 cm, and a range of 0.5 to 143 cm. Mean significant wave period (T_s) was 3.55 s, with a standard deviation of ± 2.04 s, a mode of 2.40 s, and a range of 0.60 to 15.0 s. Significant wave length was 16.65 m at the site of the sensor and 17.62 m in deep waters (L_0). Wave celerity was 4.96 m s^{-1} at the sampling site and 5.25 m s^{-1} in deep waters. The highest and most prolonged waves occurred during the *Nortes* season (fig. 8).

Parameter Ω

In general, the sites surveyed were classified as intermediate beaches; however, the swash zone Ω values were lower than those of the surf zone, nearing the limits of reflective

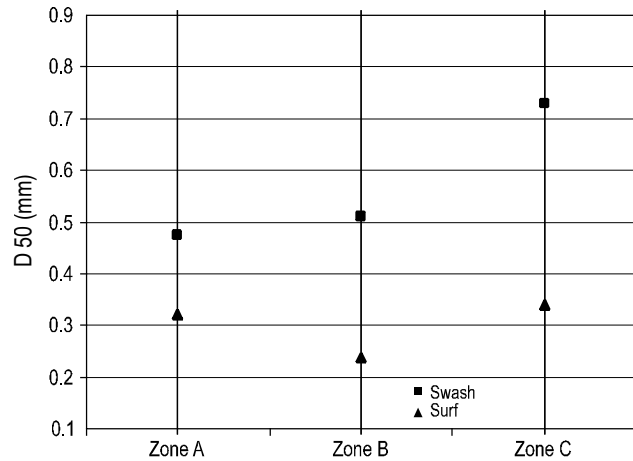


Figure 7. Comparison of grain particle size in the swash and surf zones. The standard error of the mean value is included.

Figura 7. Comparación de los diámetros de partículas en las zonas de *swash* y *surf*. Se incluye el error estándar del promedio.

que la posición de la línea de costa en los sitios B1 y B2 tiende a retroceder pero en B3 se mantiene estable, mientras que B4 y B5 presentan una tendencia a progradar. A excepción del perfil B3, en el resto de los perfiles de esta zona se observa una tendencia significativa. Para el caso de la zona C, al este del área de estudio, la posición en C2 y C4 presenta una tendencia a retroceder, en particular en C4 donde esta tendencia es mayor respecto a los otros sitios de la misma zona, a razón de 2 m año⁻¹. Los sitios C1, C3 y C5 muestran una tendencia a progradar.

La tendencia de la posición de la línea de costa, expresada como la tasa de avance o retroceso, puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones en el manejo de playas. Si se considera esta tendencia en combinación con el ancho de playa, entonces se puede generar un criterio que permita tipificar las playas en diferentes niveles de seguridad. En la figura 6 se observa que las playas con extensión mayor a 60 m y con una tendencia a progradar se consideran de alta seguridad, tal como el sitio A1. El caso opuesto son aquellas playas de baja seguridad cuya extensión es menor a 20 m y con una tendencia a retroceder, como sucede en los sitios A4 y C4. Asimismo, es posible proponer playas de seguridad intermedia cuya extensión es mayor a los 20 m pero menor a los 60 m.

Sedimento

A partir de las fracciones tamizadas de material sedimentario se obtuvieron los percentiles que permitieron estimar la media, mediana, desviación estándar (dispersión o sorteo), asimetría y kurtosis (tabla 4). En general, y de manera homogénea, la arena en la zona de *swash* se clasificó como arena gruesa, mal clasificada, casi asimétrica y mesocúrtica. La variación entre arena gruesa a media es relativamente homogénea a lo largo de los sitios muestreados y sin ningún gradiente aparente. Consistentemente el tamaño de arena en la

Table 4. Statistical descriptors of the granulometric analysis of the sediment samples from the swash zone.

Tabla 4. Descriptores estadísticos del análisis granulométrico de las muestras de sedimento de la zona de *swash*.

Site	D50 (mm)	Mean (Mz, phi)	Sorting (DS, phi)	Asymmetry (Sg, phi)	Kurtosis (Kg, phi)
A1	0.5330	0.8388	1.1675	-0.0500	1.0150
A2	0.5017	0.8850	1.2213	-0.0275	1.0463
A3	0.3341	1.4771	0.9400	-0.0614	1.1486
A4	0.4714	1.1300	1.0925	-0.0325	0.9938
A5	0.5159	1.1629	1.0443	-0.0471	1.0643
B1	0.5460	0.8250	1.1530	-0.0320	1.0650
B2	0.5122	0.9056	1.1867	-0.0444	0.9833
B3	0.4889	1.1350	1.0988	-0.0625	1.2038
B4	0.5405	0.9900	1.1463	-0.0375	0.9725
B5	0.4042	1.1638	1.1463	-0.0488	1.0975
C1	0.7360	0.5363	1.4738	-0.0213	0.9125
C2	1.2270	0.3014	1.2986	0.0314	1.0214
C3	0.5498	0.8725	1.2863	-0.0425	0.9400
C4	0.5779	0.7522	1.3089	-0.0211	0.9500
C5	0.6638	0.5278	1.4644	-0.0233	1.1567

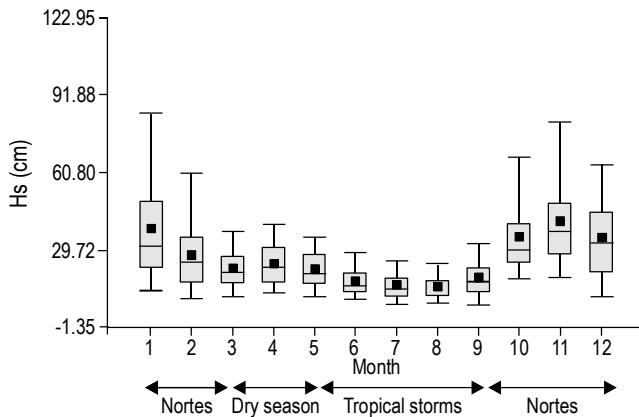


Figure 8. Monthly mean significant wave heights.

Figura 8. Promedio mensual de la altura significativa del oleaje.

beaches, due to the effect of grain size under similar wave conditions. Though the same wave climate conditions applied to all the study area, Ω varied along the coastline (fig. 9) as well as over time, as shown in figure 10, which shows the temporal variability of this parameter at site A1.

Discussion

The results show that the swash zone is composed of thick sands, and has steeper slopes during the tropical storm season and softer slopes during the *Nortes* season. Greater erosive and accumulative variations consistently occurred in the swash zone, confirming that this part of the beach is highly dynamic. The shoreline position analysis did not reveal a clear

zona de *swash* es mayor que el de la zona de *surf* (fig. 7). El material que permanece en la zona de *swash* está constituido por fragmentos de conchas de moluscos entre los que dominan las formas de plato.

Oleaje

Durante el período de operación del sensor de oleaje se obtuvieron 15,824 datos, determinándose una altura media de ola significativa (H_s) de 24.19 cm, con una desviación estándar de ± 16.15 cm, una moda de 11.40 cm y un rango de 0.5 a 143 cm. La media del período de ola significativa (T_s) fue de 3.55 s, con una desviación estándar de ± 2.04 s, una moda de 2.40 s y con un rango de 0.60 a 15.0 s. La longitud de ola significativa fue de 16.65 m en el sitio del instrumento y en aguas profundas (L_o) se estimó en 17.62 m. La celeridad de la ola se estimó en 4.96 m s^{-1} en el sitio de muestreo y de 5.25 m s^{-1} en aguas profundas. Se observó que las olas más altas y de mayor período se presentan en la temporada de *Nortes* (fig 8).

Parámetro Ω

En general los sitios estudiados se clasificaron como playas intermedias; sin embargo, la zona de *swash* presentó valores de Ω menores a los de la zona de *surf*, acercándose a los límites de playas reflectivas, esto, como resultado del efecto del tamaño de partícula ante condiciones iguales de oleaje. Si bien para toda la costa se emplearon las mismas condiciones de clima de oleaje, Ω muestra una variación a lo largo de la costa (fig 9), así como también a lo largo del

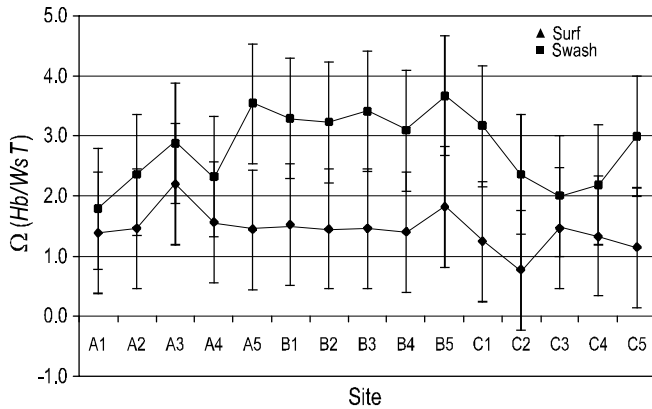


Figure 9. Spatial variability of the Ω parameter along the coast for the swash and surf zones. Mean values and standard errors are shown.

Figura 9. Variabilidad espacial del parámetro Ω a lo largo de la costa para las zonas de *swash* y *surf*. Se muestran promedios y errores estándar.

generalized trend in beach advance (four profiles with significant positive slope) or retreat (six profiles with significant negative slope). It is important to note that some parts of the study area are highly influenced by beach nourishment operations and by the presence of shoreline defense and stabilization structures, which interfere with natural processes and impose limitations on the use of our findings.

The shape parameter A of the Dean model obtained from average profile regression consistently indicates the spatial heterogeneity observed in the mean profiles as well as the changes recorded in the different seasons. The mean value of A was -0.1408 during the *Nortes* season, indicating a soft slope, and 0.1534 during the tropical storm seasons, indicating a steeper slope. This model, however, deviates from the actual mean profile shapes, showing important differences as it does not reproduce the relatively abrupt drop at the beginning and the subsequent smoothing of the profile. Work is ongoing to identify the model that best represents the region's behaviour.

The beaches surveyed were classified as intermediate to reflective according to Ω (Benedet *et al.* 2004), due to grain

tiempo, como se ejemplifica en la figura 10 donde se muestra la variabilidad temporal del parámetro en el sitio A1.

Discusión

Los análisis revelaron que la zona de *swash* está conformada por arena gruesa, con pendientes pronunciadas en la temporada de tormentas tropicales y suavizadas en la temporada de Nortes. En esta porción de la playa se presentó consistentemente la mayor variabilidad de la erosión y acumulación en cada perfil confirmando su carácter sumamente dinámico. En planta, el análisis de la posición de la línea de costa no sugiere que exista una clara tendencia generalizada de avance (4 perfiles con pendiente positiva significativa) o retroceso (6 perfiles con pendiente negativa significativa) en el área de estudio. Es necesario agregar que algunos tramos del área de estudio se encuentran fuertemente influenciados por acciones de manejo como alimentación artificial y con estructuras de protección y estabilización de la línea de costa que se superponen a los procesos naturales e imponen limitaciones y precauciones al uso de los resultados encontrados.

El parámetro de forma A en el modelo de Dean obtenido de la regresión de perfiles medios recoge consistentemente la heterogeneidad espacial observada en estos perfiles y de forma similar los cambios observados en las temporadas climáticas. Durante la temporada de Nortes, el promedio de A fue de -0.1408 modelando un perfil suave que durante la temporada de ondas tropicales mostró un promedio de 0.1534 para un perfil de mayor pendiente. Sin embargo, este modelo se aparta de las formas reales de los perfiles medios, mostrando diferencias importantes al no reproducir la caída relativamente abrupta al inicio y el posterior suavizamiento del perfil. En este sentido es necesario identificar el modelo que mejor represente el comportamiento de la zona.

Las características de las playas estudiadas las tipificaron como playas intermedias a reflectivas de acuerdo al parámetro Ω (Benedet *et al.* 2004), por el tamaño de sedimento, la forma y dimensiones del perfil medio, así como por su pendiente. En

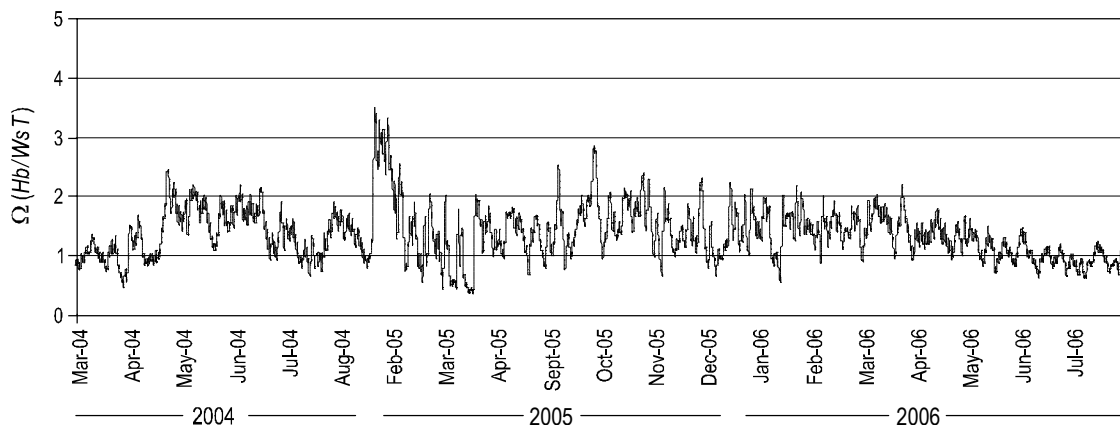


Figure 10. Temporal variation of the adimensional Ω parameter in the swash zone of site A1.

Figura 10. Variación temporal del parámetro adimensional Ω en la zona de *swash* del perfil A1.

size, the shape and dimensions of the mean profile, and beach slope. In agreement with that described by Benedet *et al.* (2004) concerning the variability of Ω , the values for the same beach ranged in time from the intermediate domain to close to the reflective domain. This indicates that changes in wave climate modify beach behaviour and care should be taken when using this parameter as a static-type morphodynamic descriptor.

Among the morphodynamic descriptors employed, shoreline position trend in combination with beach width allowed the identification of different levels of beach security. Yucatán's Decree 801 establishes a buffer zone of 60 m, increasing the beach width of 20 m that corresponds to the federal zone. Considering shoreline erosive/accumulative trends based on these descriptors can contribute to identify and establish long-term monitoring needs for different beach segments, facilitating management decisions for the protection of environmental services and property.

This integration of equilibrium profiles and morphodynamic indicators by determining granulometric characteristics, topographical shapes, and wave conditions can contribute to beach nourishment decision-making, as well as to establish shoreline development regulations for the long-term protection of beach environments as well as coastal property and infrastructure.

Acknowledgements

This study was supported by the Center for Research and Advanced Studies (CINVESTAV-IPN) at Mérida. We thank I Mariño, C Enríquez, M Liceaga, E Batllori, and R Silva for valuable comments, as well as the CINVESTAV technical staff and students who assisted during the field work and sediment analysis.

References

- Bannister A, Raymond S, Baker R. 2002. *Técnicas Modernas en Topografía*. Alfaomega Grupo Editor, México, DF, 550 pp.
- Benedet L, Finkl CW, Campbell T, Klein A. 2004. Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment. *Coast. Eng.* 51: 839–861.
- Bernabeu AM, Medina R, Vidal C. 2003. Wave reflection on natural beaches: An equilibrium beach profile. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 57: 577–585.
- Bird E. 2003. *Coastal Geomorphology. An Introduction*. John Wiley & Sons, The Atrium Gate, Chichester, UK, 321pp.
- Bruun P. 1954. Coastal erosion and development of beach profiles. US Army Beach Erosion Board Tech. Memo. 44, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Compton RR. 1985. *Geology in the Field*. John Wiley & Sons, New York, 398 pp.
- Curtis JH, Hodell DA. 1996. Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya cultural evolution. *Quatern. Res.* 46: 37–47.
- Dean RG. 1977. *Equilibrium beach profile: US Atlantic and Gulf Coasts*, Department of Civil Engineering. Ocean Engineering Rep. No. 12. University of Delaware, Newark.
- concordancia con Benedet *et al.* (2004) en relación a la variabilidad del parámetro Ω , los valores en una misma playa variaron en el tiempo, del dominio intermedio hacia valores cercanos al dominio reflectivo. Esto nos muestra que cambios en el clima de oleaje modifican el comportamiento de la playa, y alerta sobre tomar precauciones al darle uso como un descriptor morfodinámico de naturaleza estática.
- Entre los descriptores morfodinámicos más empleados, la tendencia de la posición de la línea de costa junto con el ancho de playa permitió identificar diferentes niveles de seguridad. El decreto 801 del Estado de Yucatán establece una franja de amortiguamiento de 60 m que amplía la banda de playa de 20 m que corresponde a la zona federal. Al considerar la tendencia erosiva/acumulativa sobre estos descriptores de la línea de costa se puede contribuir a identificar y establecer necesidades de monitoreo de largo plazo para diferentes segmentos de la playa, facilitando las decisiones de manejo para la protección de servicios ambientales y bienes o propiedades.
- Esta integración de conceptos sobre modelos de perfiles de equilibrio e indicadores morfodinámicos a través de la determinación de características granulométricas, formas topográficas y de las condiciones de oleaje pueden contribuir en la toma de decisiones en procesos de alimentación de playa, así como para establecer políticas para la regulación del desarrollo de la costa que permita tanto conservar los sistemas de playa como proteger la propiedad e infraestructura costeras en el largo plazo.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV-Mérida), a los proyectos Erosión Costera y Calidad del Agua, y Geomorfología en Islas de Barrera. Se agradecen también las importantes sugerencias de I Mariño, C Enríquez, M Liceaga, E Batllori y R Silva, así como al personal técnico y los estudiantes que colaboraron en el trabajo de campo y análisis de sedimento de los laboratorios de Percepción Remota, Sistemas de Información Geográfica y Procesos Costeros del CINVESTAV-Mérida.

- Folk RL. 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6: 73–93.
- Forbes DL, Parkes GS, Manson GK, Ketch LA. 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Mar. Geol.* 210: 169–204.
- Hooke J, Bray M, Carter D. 1995. Sediment transport, sea level rise and shoreline management: Advising decision makers on the south coast of England. *Proc. Int. Conf. on Coastal Change 95, Bordomer-IOC, Bordeaux*, p. 978.
- Komar PH, Gaughan MK. 1972. Airy wave theory and breaker height prediction. *Proc. 13th Conf. on Coastal Engineering, ASCE*, pp. 405–418.
- Logan BW, Harding JL, Aur WM, Williams JD, Sneat Rg. 1969. Carbonate sediments on reefs, Yucatan shelf, Mexico. Part I. Late Quaternary sediments. *Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 11: 1–128.
- Meyer-Arendt KJ. 1991. Tourism on the north Yucatan coast: Human response to shoreline erosion and hurricanes. *Geojournal* 23(4): 327–336.

- Meyer-Arendt KJ. 1993. Shoreline changes along the north Yucatan coast. In: Laska S, Puffer A (eds.), *Coastlines of the Gulf of Mexico*. American Society of Civil Engineers, New York. Proc. 8th Symp. on Coastal and Ocean Management (Coastal Zone 93), 19–23 July, New Orleans, pp. 103–117.
- Nolasco-Montero E, Carranza-Edwards A. 1988. Estudio sedimentológico regional de playas de Yucatán y Quintana Roo, México. *An. Inst. Mar Limnol. Univ. Nac. Autón. Méx.* 15(2): 49–66.
- Short AD. 1999. Beaches. In: Short AD (Ed.), *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley & Sons, West Sussex, UK, pp. 3–20.
- Toledano N, Silva R. 2005. Modelación de perfiles de playa en presencia de diques arrecife. Mem. V Congreso de Desarrollo Sustentable, 24–25 November 2005, Veracruz, México.
- USACE. 1984. *Shore Protection Manual*. US Army Corps of Engineers.
- Wright LD, Short AD. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis: *Mar. Geol.* 56: 93–118.

*Recibido en agosto de 2008;
aceptado en agosto de 2009.*