

EVALUACION DE LAS CONDICIONES DEL PALEOOLEAJE A PARTIR DE ESTRUCTURAS DE TIPO OSCILATORIO PRESERVADAS EN SEDIMENTOS DEL CRETACICO DE BAJA CALIFORNIA

EVALUATION OF PALEO-WAVE CONDITIONS FROM OSCILLATORY STRUCTURES PRESERVED IN CRETACEOUS SEDIMENTS OF BAJA CALIFORNIA

Luis Antonio Cupul-Magaña
Jorge Ledesma-Vázquez

Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, Baja California, México

Recibido en febrero de 1993; aceptado en agosto de 1993

RESUMEN

Se midieron el espaciamiento (E), echado y altura de rizaduras de tipo oscilatorio (estratificación cruzada, hamacada o acunada) preservadas en las secciones de Punta Banda y Peñasco La Lobera, del Cretácico tardío, en la Formación Rosario, de Baja California. A partir de estos datos se estimaron las características del paleooleaje: diámetro orbital (d_o), velocidad orbital (U_m), periodo (T) y altura (H) de las olas que generaron dichas estructuras, determinando la dependencia entre el espaciamiento de la estructura y los parámetros del paleooleaje obtenidos a partir de cinco ecuaciones. Las localidades estudiadas representan el límite superior (Peñasco La Lobera) e inferior (Punta Banda) del frente costero (*shoreface*).

Palabras clave: depósitos de tormenta, rizaduras, Cretácico de Baja California, oleaje.

ABSTRACT

Measurements were obtained of spacing (E), dip and height of oscillatory ripples (hummocky/swaley cross-stratification) preserved within the sections of Punta Banda and Peñasco La Lobera in the Late Cretaceous Rosario Formation, in Baja California. From these data we estimated the hydrodynamic characteristics of paleo-waves that produced the oscillation ripples: near-bottom orbital diameter of the wave motion (d_o), near-bottom orbital velocity (U_m), wave period (T) and wave height (H). A clear dependence is shown through the use of ripple spacing and five equations to obtain these paleo-wave parameters. The localities studied represent the higher limit (Peñasco La Lobera) and lower limit (Punta Banda) of the shoreface.

Key words: storm deposits, ripples, Cretaceous of Baja California, waves.

INTRODUCCION

Las rizaduras (*ripples*) formadas en los sedimentos debido a la acción del oleaje y las corrientes han recibido una considerable atención, en especial las de tipo oscilatorio, por lo que respecta a su significación ambiental, ya que han sido ampliamente usadas para re-

INTRODUCTION

Ripple marks, in particular oscillatory ripples, formed on sediments due to wave action and currents have received considerable attention, especially in regard to their environmental significance, since they have been widely used to reconstruct ancient deposi-

construir sistemas depositacionales antiguos (Bourgeois, 1980; Dott y Bourgeois, 1982; Walker, 1984; Duke, 1985; Southard *et al.*, 1990).

Desde la década pasada, los investigadores han incrementado su interés en la aplicación de los principios hidrodinámicos para interpretar estas estructuras. El concepto de régimen de flujo ha sido ampliamente aceptado como base para la interpretación de dichas estructuras (Komar y Miller, 1973; Komar, 1974; Clifton, 1976; Miller y Komar, 1980a; Allen, 1981; Southard *et al.*, 1990). Aunque hay muchas observaciones, existe poco conocimiento relacionado con el significado hidráulico de las rizaduras. Estas han sido generalmente subdivididas en dos tipos: las oscilatorias, producidas por el movimiento de olas, y las producidas por corrientes unidireccionales. Harms (1969) describe un tercer tipo, producido por combinación de olas y corrientes unidireccionales.

La generación de rizaduras por corrientes ha recibido mayor atención, mientras que los estudios de rizaduras formadas por olas han tomado un lugar secundario. Esto se debe, en parte, a la dificultad de observar las rizaduras en el campo y, en parte, al problema de lograr movimientos y diámetros orbitales grandes en condiciones de laboratorio (Komar, 1974).

A pesar de esto, se han desarrollado trabajos sobre rizaduras oscilatorias en campo y en laboratorio (Newton, 1968; Komar y Miller, 1973; Clifton, 1976; Harms *et al.*, 1982; Allen, 1979; Southard *et al.*, 1990), con el fin de conocer las condiciones bajo las cuales las configuraciones de fondo son producidas. Los flujos oscilatorios a altas velocidades y periodos largos de ola son elementos cruciales en la interpretación de dichas estructuras.

Las rizaduras oscilatorias son configuraciones de fondo, comunes en ambientes dominados por oleaje. Generalmente están presentes donde las olas superficiales transportan sedimentos no consolidados del fondo, lo cual puede extenderse desde la zona cercana a la costa hasta profundidades considerables en la parte externa de la plataforma continental (Komar *et al.*, 1972).

Estos procesos generan en los sedimentos una estratificación cruzada, hamacada (*hummocky*) o acunada (*swaley*), la cual es generada por flujos oscilatorios con periodos largos y velocidades orbitales mayores de

tional systems (Bourgeois, 1980; Dott and Bourgeois, 1982; Walker, 1984; Duke, 1985; Southard *et al.*, 1990).

Since the last decade, researchers have become increasingly interested in the application of hydrodynamic principles to interpret these structures. The concept of flow regime has been widely accepted as the basis for the interpretation of these structures (Komar and Miller, 1973; Komar, 1974; Clifton, 1976; Miller and Komar, 1980a; Allen, 1981; Southard *et al.*, 1990). Though there are many observations, little is known about the hydraulic significance of ripples. Ripple marks have generally been subdivided into oscillatory ripples, produced by wave motion, and those produced by unidirectional currents. Harms (1969) describes a third class, produced by a combination of waves and unidirectional currents.

Ripples generated by currents have received more attention than those formed by waves. This is due, in part, to the difficulty of observing ripples in the field and, in part, to the problem of achieving movements and large orbital diameters under laboratory conditions (Komar, 1974).

In spite of this, studies on oscillation ripples have been carried out in the field and laboratory (Newton, 1968; Komar and Miller, 1973; Clifton, 1976; Harms *et al.*, 1982; Allen, 1979; Southard *et al.*, 1990), in order to determine the conditions under which bottom configurations are produced. Oscillatory flows at high wave velocities and long wave periods are crucial elements in the interpretation of these structures.

Oscillatory ripples are bottom configurations, common in wave-dominated environments. They are generally present where surface waves transport unconsolidated bottom sediments, which may extend from the near-shore area to considerable depths on the outer continental platform (Komar *et al.*, 1972).

These processes generate hummocky or swaley cross-stratification in the sediments, produced by oscillatory flows with long periods and orbital velocities higher than half a metre per second, characteristic of storm conditions in shallow oceans and fine sedi-

medio metro por segundo, características de condiciones de tormenta en océanos someros y en sedimentos finos, de la parte interna de la plataforma hacia la costa (Southard *et al.*, 1990). Estas dos clases de estructuras sedimentarias primarias son consideradas como rizaduras tridimensionales, generadas principalmente por un mecanismo de oscilación (Harms *et al.*, 1975; Southard *et al.*, 1990).

Las características de la estratificación cruzada hamacada (ECH) han sido definidas por Harms *et al.* (1975) y comúnmente incluyen superficies convexas con ángulos menores de 10° y echados que pueden alcanzar los 15° . Las láminas sobre estas superficies erosionadas son paralelas o casi paralelas a la superficie, y pueden engrosarse sistemática y lateralmente dentro del paquete, hasta que sus trazos sobre una superficie vertical son parecidos a un abanico y el echado disminuye regularmente. La estratificación cruzada acunada (ECA) consiste en una serie de láminas cóncavas superimpuestas, de 0.5 a 2 m de amplitud y algunas decenas de centímetros de profundidad. La estratificación de tipo acunado raramente excede los 10° de echado en los extremos (Duke, 1985).

El desarrollo de las rizaduras oscilatorias sobre el fondo marino, bajo un amplio intervalo de movimientos orbitales producidos por el paso de las olas, se origina con un movimiento inicial de los sedimentos (condiciones de velocidad de umbral), a partir del cual se modifica la capa frontera al incrementarse la intensidad del flujo, y se producen arreglos geométricos definidos, con base en la granulometría y en las condiciones particulares del oleaje, es decir, del periodo y altura de ola que las genera (Harms *et al.*, 1975). El arreglo geométrico es comúnmente descrito como un juego de rizaduras tridimensionales, que presentan un espaciamiento particular.

Es importante entender los mecanismos de generación de las rizaduras oscilatorias, para comprender las condiciones bajo las cuales se desarrollaron, a fin de interpretar mejor las características de los agentes que las originaron.

La determinación de los parámetros del oleaje, longitud, periodo y altura de ola, obtenidos a partir de estas estructuras primarias, puede ser de gran utilidad para conocer la hidrodinámica de un área específica y constituye un registro de los eventos de alta energía.

ments, from the inner platform towards the coast (Southard *et al.*, 1990). These two types of primary sedimentary structures are considered three-dimensional ripples, mainly generated by an oscillation mechanism (Harms *et al.*, 1975; Southard *et al.*, 1990).

The characteristics of hummocky cross-stratification (HCS) have been defined by Harms *et al.* (1975). It generally presents convex surfaces with angles of less than 10° and dips of up to 15° . The laminae on these eroded surfaces are parallel or almost parallel to the surface and can thicken systematically and laterally in the package, until their traces on a vertical surface are fan-like, and the dip diminishes regularly. Swaley cross-stratification (SCS) consists of a series of overlying concave laminae, 0.5 to 2 m wide and some tens of centimetres deep. Swaley stratification rarely exceeds a dip of 10° at the ends (Duke, 1985).

The formation of oscillatory ripples on the marine bottom, under a wide range of orbital movements produced by wave motion, originates with an initial movement of the sediments (threshold velocity conditions), from which the boundary layer is modified as the intensity of flow increases, and defined geometric arrangements are produced based on the granularity and on the particular wave conditions, that is, the wave period and height that generate them (Harms *et al.*, 1975). The geometric arrangement is commonly described as a set of three-dimensional ripples, that present a particular spacing.

It is important to understand the mechanisms of generation of oscillatory ripples, in order to understand the conditions under which they developed and, thus, better interpret the characteristics of the agents that produced them.

The determination of wave parameters, such as length, period and height, obtained from these primary structures, is of great use to understand the hydrodynamics of a specific area and provides a record of high-energy events.

The purpose of this study is to determine the characteristics of the waves under which the hummocky and swaley structures of

El propósito de este trabajo es determinar las características del oleaje bajo las cuales se generaron las estructuras cruzadas, acunadas o hamacadas, de las localidades de Punta Banda y Peñasco La Lobera, Baja California, a partir de las características geométricas y texturales presentes en los estratos de unidades del Cretácico.

AREAS DE ESTUDIO

La primera de las áreas de estudio está representada por los afloramientos presentes en la península de Punta Banda (Fig. 1), localizada entre los 31°42' y 31°44' de latitud N y los 116°40' y 116°44' de longitud O.

Los depósitos sedimentarios de la península de Punta Banda, en Rincon de Ballenas, pertenecen a la Formación Rosario de la edad Cretácica (Maestrichtiano). Debido a la presencia de organismos como *Coralliochama orcutti* y fauna asociada de moluscos y bivalvos, Anderson y Hanna (1935), así como Saul (1970), proponen un ambiente somero de baja energía. Por otra parte, Marinovich (1975) concluye que las capas de *C. orcutti* muestran evidencia de transporte y están afectadas por oleaje y corrientes generados por tormentas. Aranda-Manteca y Briceño-Rosete (1987) mencionan que la unidad superior, de espesor aproximado de 25 m, está dominada por la presencia de areniscas con ECH. Ledesma-Vázquez (1991) considera que, dentro de la sección presente en esta localidad, predomina la ECA sobre la ECH y que los fragmentos de *C. orcutti* se presentan constituyendo clastos de un paraconglomerado con matriz arenosa, que indican además que se trata de una secuencia amalgamada (Dott y Bourgeois, 1982).

En esta localidad (Fig. 2), se midieron únicamente 15 m de sección continua, debido al alto fallamiento de la zona. El echado de la sección es de 31°N. La sección medida empuja con lodolita gris, que representa sedimentación sobre la plataforma interna, encima de la cual se inicia una secuencia de tempestitas que presenta los elementos del modelo clásico de Dott y Bourgeois (1982), y se interpreta como una secuencia amalgamada transgresiva. Las capas de arenisca presentes en esta columna exhiben ECA y ECH (Fig. 3).

Otra zona de estudio se ubica entre los paralelos 116°22' y 116°16' de latitud N y los paralelos 31°15' y 31°10' de longitud O

the localities of Punta Banda and Peñasco La Lobera, Baja California, were formed, from the geometric and textural characteristics present in the strata of Cretaceous units.

STUDY AREAS

The first study area is represented by the outcrops present in the peninsula of Punta Banda (Fig. 1), located 31°42'-31°44' N and 116°40'-116°44' W.

The sedimentary deposits of the peninsula of Punta Banda, in Rincón de Ballenas, belong to the Rosario Formation of Cretaceous (Maastrichtian) age. Due to the presence of organisms such as *Coralliochama orcutti* and associated fauna of molluscs and bivalves, Anderson and Hanna (1935) and Saul (1970) suggest a low-energy, shallow environment. On the other hand, Marinovich (1975) concludes that the layers of *C. orcutti* show evidence of transport and are affected by storm-generated waves and currents. Aranda-Manteca and Briceño-Rosete (1987) mention that the approximately 25-m thick upper unit is dominated by the presence of sands with HCS. Ledesma-Vázquez (1991) reports that, within the section present in this locality, SCS predominates over HCS and that the fragments of *C. orcutti* occur constituting clasts of a paraconglomerate with sandy matrix, indicating an amalgamated sequence (Dott and Bourgeois, 1982).

In this locality (Fig. 2), only 15 m of continuous section were measured due to the high faulting of the area. The dip of the section is 31°N. The section measured begins with gray lodolite, which represents sedimentation on the inner platform, on top of which a sequence of tempestites begins that presents the elements of the classical model of Dott and Bourgeois (1982), and it is interpreted as a transgressive amalgamated sequence. The layers of sand in this column exhibit SCS and HCS (Fig. 3).

The second area of study is located 116°22'-116°16' N and 31°15'-31°10' W (Fig. 4). According to Gastil *et al.* (1981), the area is characterized by prebatholithic rocks of the Alisitos Formation and postbatholithic rocks of

(Fig. 4). De acuerdo con Gastil *et al.* (1981), el área se caracteriza por rocas prebatolíticas de la Formación Alisitos y rocas postbatolíticas de la Formación Rosario (Maestrichtiano). Las capas pertenecientes al Cretácico superior se encuentran casi horizontales con echados máximos de 6° con rumbo N-S, ubicados en contacto discordante angular con capas de la Formación Alisitos del Cretácico inferior de origen volcanoclástico (Fig. 5).

Cinco secciones fueron medidas en el cantil costero y dos más en el cantil de la segunda terraza (Fig. 4). De éstas, se presentan únicamente una de la porción inferior y una de la superior (Figs. 6 y 7), debido al alto grado de similitud, ya que son del tipo amal-

the Rosario Formation (Maestrichtian). The Upper Cretaceous layers are almost horizontal with maximum dips of 6° W in N-S direction, lying in discordant angular contact with layers of the Lower Cretaceous Alisitos Formation of volcanoclastic origin (Fig. 5).

Five sections were measured on the coastal cliff and two more on the cliff of the second terrace (Fig. 4). Of these, only one of the inferior and one of the superior portions are presented (Figs. 6, 7) because of the high degree of similarity, since they are of the amalgamated type described by Dott and Bourgeois (1982). The total thickness of the section from the coast to the second terrace is

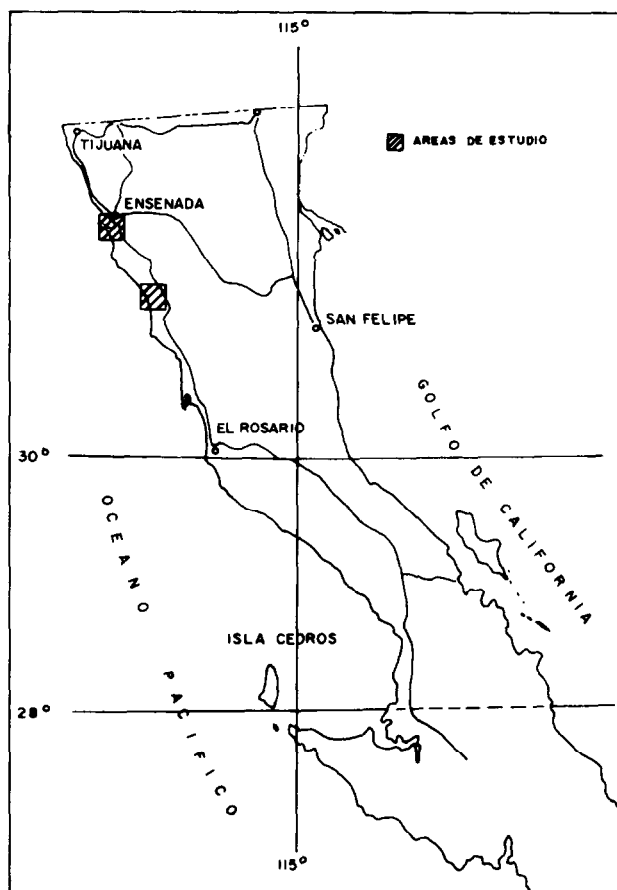


Figura 1. Localización de las áreas de estudio, en afloramientos de la Formación Rosario.
Figure 1. Location of the study areas, in outcrops of the Rosario Formation.

gamado descrito por Dott y Bourgeois (1982). El espesor total para la sección desde la costa hasta la segunda terraza es de más de 80 m. En esta zona, la capa descrita como *lag deposit* por Dott y Bougeois (1982) está representada por fragmentos derivados de los afloramientos de la Formación Alisitos, a diferencia del componente fosilífero encontrado en el área de Punta Banda.

En cada uno de los afloramientos presentes dentro de las áreas de trabajo, se determinó: la longitud de onda de las estructuras ECA y ECH, profundidad de estas depresiones, echado de las láminas que rellenan las depresiones y tamaño de grano.

Las edades de las secuencias descritas en este trabajo se han asignado con base en el estudio realizado por Bárcenas Pazos en 1988, en el cual se tomaron muestras en diferentes afloramientos, incluyendo los que corresponden a este estudio, y se identificaron los fósiles de seis pelecypodos, dos briozoarios, tres

more than 80 m. In this area, the layer described as lag deposit by Dott and Bourgeois (1982) is represented by fragments derived from the outcrops of the Alisitos Formation, as opposed to the fossiliferous component found in the area of Punta Banda.

In each of the outcrops present in the study areas, the wavelength of the HCS and SCS structures, depth of these depressions, dip of the laminae within the depressions and grain size were determined.

The ages of the sequences described in this study have been assigned based on the study of Bárcenas-Pazos (1988), in which samples were obtained in different outcrops, including those that correspond to this study, and the fossils of six pelecypods, two bryozoans, three echinoids and three bivalves were identified. In that study, the depositional environment is interpreted as shallow (less

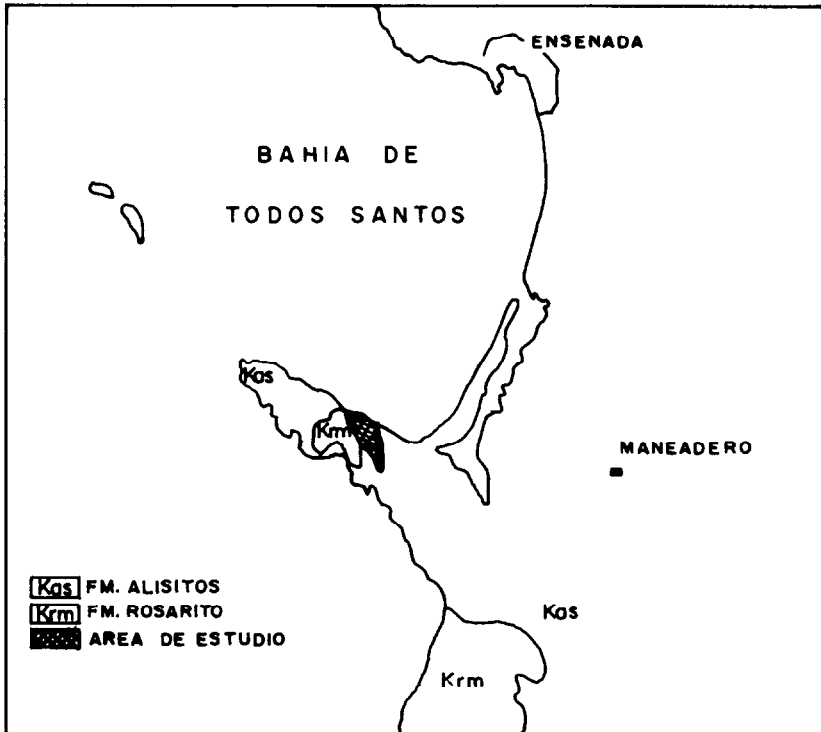


Figura 2. Localización del Rincón de Ballenas, en la Península de Punta Banda.
Figure 2. Location of Rincón de Ballenas, in the península of Punta Banda.

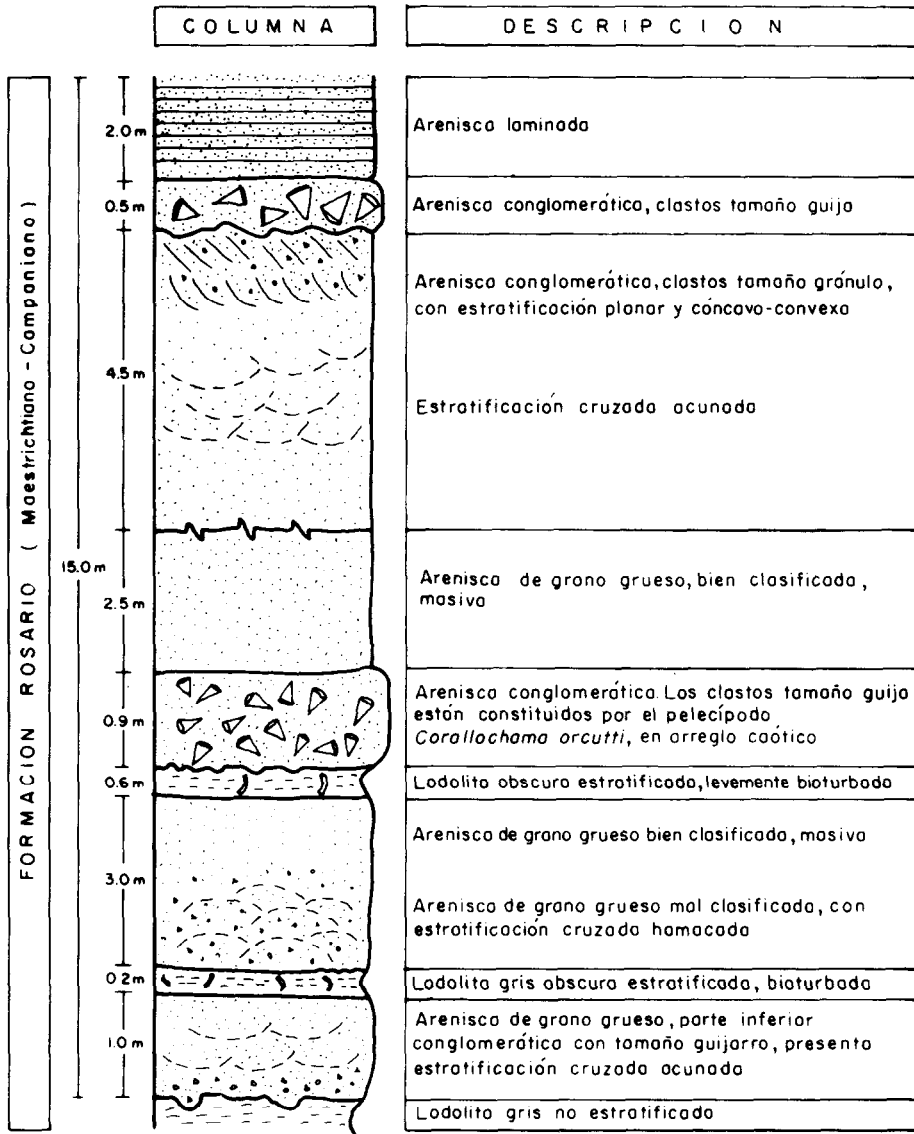


Figura 3. Sección de Rincón de Ballenas (tomado de Ledesma, 1991).
 Figure 3. Section of Rincón de Ballenas (taken from Ledesma, 1991).

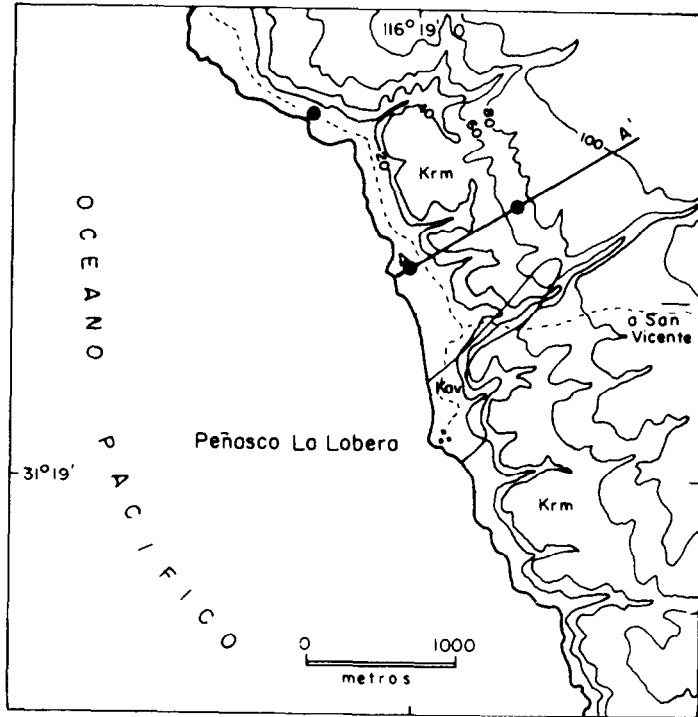


Figura 4. Area de estudio, en Peñasco La Lobera.
Figure 4. Study area, in Peñasco La Lobera.

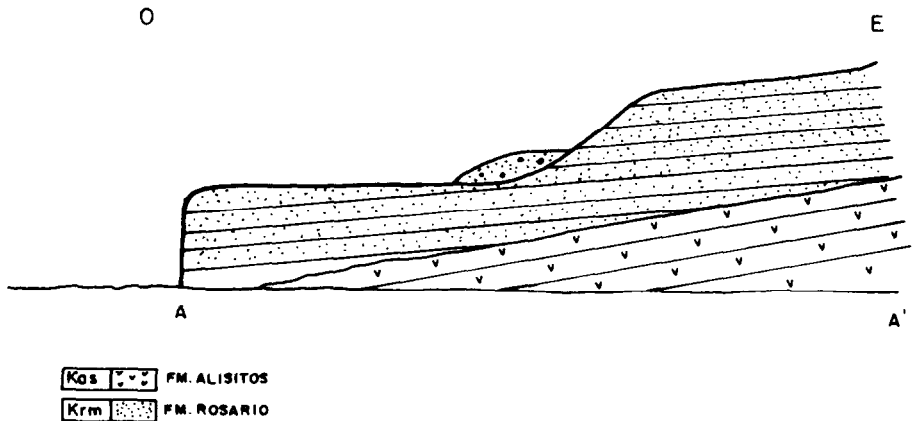


Figura 5. Sección A-A', en la localidad de Peñasco La Lobera (tomado de Ledesma, 1991).
Figure 5. Section A-A', in the locality of Peñasco La Lobera (taken from Ledesma, 1991).

equinoideos y tres bivalvos. En los resultados de dicha investigación, se interpreta el ambiente de depositación como somero (menos de 10 m), con base en el conjunto obtenido, y se observa el alto grado de fragmentación, que se atribuye a transporte sedimentario y redepositación.

than 10 m), based on the samples obtained, and a high degree of fragmentation is observed, which is attributed to sediment transport and redeposition.

METODOLOGIA

En este trabajo, se sigue metodología obtenida a partir de diferentes autores (Komar y Miller, 1973; Komar, 1974; Miller y Komar, 1980a), para estimar los parámetros del paleo-

METHODOLOGY

In this study, a methodology obtained from different authors (Komar and Miller, 1973; Komar, 1974; Miller and Komar, 1980a) was followed to estimate the different paleo-wave parameters which generated SCS and

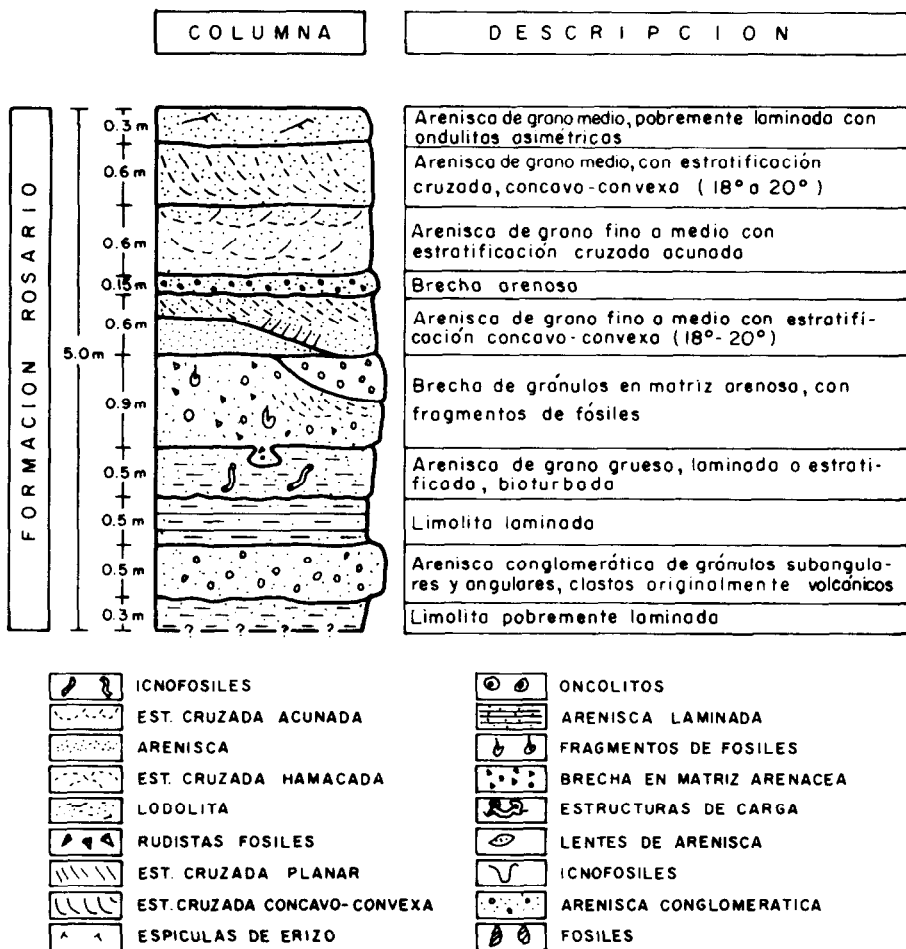


Figura 6. Sección estratigráfica inferior de Peñasco La Lobera (tomado de Ledesma, 1991).
 Figure 6. Lower stratigraphic section of Peñasco La Lobera (taken from Ledesma, 1991).

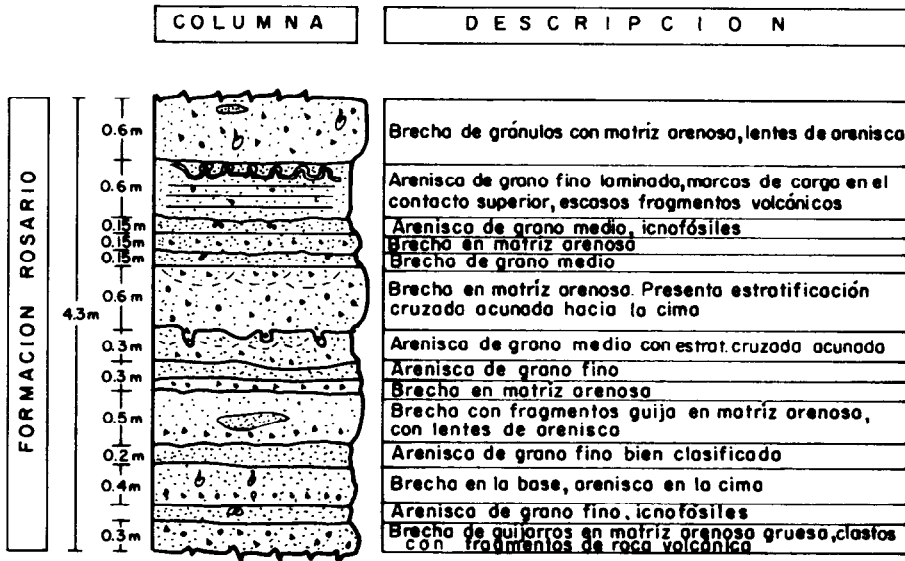


Figura 7. Sección estratigráfica superior de Peñasco La Lobera (tomado de Ledesma, 1991).
 Figure 7. Upper stratigraphic section of Peñasco La Lobera (taken from Ledesma, 1991).

Tabla 1. Características de las rizaduras en la localidad de Punta Banda, B.C.
 Table 1. Characteristics of the ripples in the locality of Punta Banda, B.C.

Espaciamiento, en cm	Altura, en cm	Echado, en grados	Tipo de estratificación
50	4	4	Acunada
42	7	4	Acunada
140	24	4	Acunada
50	8	4	Acunada
120	15	8	Acunada
84	11	9	Acunada
184	20	12	Acunada
200	25	13	Hamacada
135	19	15	Acunada
95	9	8	Acunada
120	18	12	Hamacada
150	18	12	Hamacada
180	12	8	Acunada
51	6	4	Acunada
90	5	4	Hamacada
300	39	12	Hamacada
400	32	12	Hamacada
45	5	4	Acunada
50	4	5	Acunada
48	4	4	Acunada

oleaje que generaron las ECA y ECH de las áreas de estudio, a partir de la medición del espaciamento en las estructuras y el tamaño de grano (.025 cm), como únicos datos significativos en dichas estructuras (tablas 1 y 2).

Los parámetros por estimar son: diámetro orbital (d_o), velocidad orbital máxima (U_m), periodo (T) y altura (H) de la ola, que es, dentro de las características del paleooleaje, el parámetro más importante para el diseño de estructuras sujetas a la acción del oleaje (rompeolas, paredes, etc.). Considerando que éste es un registro natural de las condiciones extremas impresas geológicamente que pueden ser descifradas a partir del espaciamento de las rizaduras (E), este valor se midió de manera directa sobre los afloramientos en sección transversal, cuidando de que las estructuras se encontraran preservadas completamente, sin ser afectadas por estructuras de reactivación.

Las olas superficiales producen un movimiento oscilatorio en el agua. Las partículas

HCS in the study areas, based on the measurement of spacing in the structures and grain size (.025 cm), as the only significant data for these structures (tables 1, 2).

The parameters to estimate are: orbital diameter (d_o), maximum orbital velocity (U_m), wave period (T) and wave height (H), which is, within the characteristics of the paleo-wave, the most important parameter for the design of structures subject to wave action (breakwaters, walls, etc.). Since it is a natural record of the extreme conditions which can be found in the geologic record and which may be deciphered from ripple spacing (E), this value was measured directly on the outcrops in transversal section, making sure that these structures were completely preserved, without being affected by reactivation structures.

Surface waves produce an oscillatory movement in the water. The particles of water

Tabla 2. Características de las rizaduras en la localidad de Peñasco La Lobera, B.C.
Table 2. Characteristics of the ripples in the locality of Peñasco La Lobera, B.C.

Espaciamento, en cm	Altura, en cm	Echado, en grados	Tipo de estratificación
122	7	3	Acunada
105	8	8	Acunada
110	11	8	Acunada
155	25	8	Acunada
59	5	9	Acunada
108	7	4	Acunada
130	15	12	Hamacada
140	20	16	Hamacada
100	13	11	Hamacada
65	7	18	Hamacada
65	7	15	Acunada
80	8	6	Acunada
80	8	4	Acunada
122	7	3	Acunada
155	5	8	Acunada
105	8	8	Acunada
110	11	8	Acunada
59	5	9	Acunada
108	7	4	Acunada
100	8	4	Acunada
150	15	4	Acunada

de agua se mueven en trayectorias circulares, si el agua es profunda, y en trayectorias elípticas si las olas viajan en aguas de intermedias a someras. Cerca del fondo, el movimiento elíptico se reduce a un movimiento horizontal y el diámetro orbital (d_o) se expresa:

$$d_o = \frac{H}{\operatorname{senh}(2\pi h/L)}$$

donde H es la altura de la ola; h , la profundidad, y L , la longitud de la ola (Komar, 1974).

Por otra parte, Miller y Komar (1980b) han desarrollado una relación entre el espaciamiento de la rizadura y el diámetro orbital, a partir de datos de laboratorio tomados de un gran número de investigaciones y usando una gran variedad de aparatos experimentales (canales, ductos, fondos móviles). La relación entre espaciamiento (E) y diámetro orbital (d_o) para sedimentos de cuarzo es una relación lineal dada por

$$E = 0.65 d_o$$

de donde se puede calcular el diámetro orbital

$$d_o = E / 0.65$$

Para determinar la velocidad orbital máxima (U_m), Komar y Miller (1973) desarrollaron la siguiente relación:

$$\frac{U_m^2}{(\delta_s - \delta) d D} = 0.30 (d_o / D)^{1/2}$$

donde

$$U_m = \sqrt{0.30} (d_o / D)^{1/2} (\delta_s - \delta) g D$$

y δ_s es densidad del fluido; δ , densidad del sedimento; d_o , diámetro orbital; D , tamaño medio de grano; g , gravedad.

El periodo de la ola puede obtenerse cuando se conoce la velocidad orbital máxima (U_m) (Miller y Komar, 1980b), de manera que

move in circular trajectories if the water is deep and in elliptical trajectories if the waves travel in intermediate to shallow waters. Near the bottom, the elliptical motion is reduced to a horizontal motion and the orbital diameter (d_o) is given by:

where H is the wave height, h the water depth and L the wave length (Komar, 1974).

On the other hand, Miller and Komar (1980b) developed a relationship between the ripple spacing and the orbital diameter, from laboratory data taken from many investigations using a variety of experimental apparatus (channels, ducts, mobile bottoms). The relationship between the spacing (E) and the orbital diameter (d_o) for quartz sediments is a linear relation given by

from which the orbital diameter can be calculated:

To determine the maximum orbital velocity (U_m), Komar and Miller (1973) developed the following relationship:

where

and δ_s is the density of the fluid; δ , density of the sediment; d_o , orbital diameter; D , mean grain size; g , gravity.

The wave period can be obtained once the maximum orbital velocity (U_m) is known (Miller and Komar, 1980b), so that

$$U_m = \Pi d_o / T \quad T = \Pi d_o / U_m$$

Una vez determinado el periodo de la ola, se puede calcular la longitud de la misma en agua profunda:

Once the wave period has been determined, the deep-water wave length can be calculated:

$$L_\infty = (g/2\Pi)T^2$$

La profundidad aproximada del tirante de agua (h) es obtenida de la razón h/L^* . Se sabe que para aguas someras $h/L^* < 1/20$, por tanto, la profundidad se puede obtener de

The approximate water depth (h) is obtained from the ratio h/L^* . It is known that for shallow waters $h/L^* < 1/20$; therefore, the depth can be obtained from

$$h < L_\infty / 20$$

Siguiendo los criterios de Komar (1974), la longitud de onda (L) en aguas someras se calcula con la relación

Following the criteria of Komar (1974), the shallow-water wave length (L) is calculated with

$$L = L_\infty (\tanh 2\Pi h / L_\infty)^{1/2}$$

Por último, conociendo todos estos parámetros, a partir del espaciamiento de la rizadura y el tamaño de grano del sedimento involucrado, se calcula la altura de la paleoola:

Finally, once all these data are known, from the ripple spacing and grain size of the sediment involved, the height of the paleo-wave is calculated:

$$H = d_o (\sinh 2\Pi / L)$$

Para calcular todos estos parámetros, se desarrolló un programa de computadora en lenguaje Basic.

A computer program in BASIC was developed to calculate these parameters.

RESULTADOS Y DISCUSION

RESULTS AND DISCUSSION

En las tablas 3 y 4, se presentan los resultados obtenidos a partir del espaciamiento de las rizaduras oscilatorias, en las áreas de Punta Banda y Peñasco La Lobera, respectivamente. Los datos indican que las rizaduras caen dentro del intervalo de rizaduras suborbitales para ambas localidades, como se ve claramente en la Fig. 8, donde los puntos se encuentran alineados y representan rizaduras formadas a periodos relativamente largos, con altas velocidades orbitales (Southard *et al.*, 1990).

The results obtained from oscillatory ripple spacing, in the areas of Punta Banda and Peñasco La Lobera, are given in tables 3 and 4, respectively. The data indicate that the ripples fall within the range of suborbital ripples for both localities, as can be clearly seen in Fig. 8, where the points are aligned and represent ripples formed at high orbital velocities and relatively long periods (Southard *et al.*, 1990).

Respecto a la velocidad orbital máxima (U_m), se puede observar que, en promedio, es

Regarding the maximum orbital velocity (U_m), it can be seen that, on average, it is similar in both localities: 30.39 cm/s in Punta Banda and 29.97 cm/s in Peñasco La Lobera.

similar en ambas localidades, ya que en Punta Banda fue de 30.39 cm/s y en Peñasco La Lobera de 29.97 cm/s. Sin embargo, encontramos que en Punta banda se obtienen velocidades hasta de 41.87 cm/s y en Peñasco La Lobera la máxima es 33.03 cm/s. En los experimentos de Southard *et al.* (1990), con U_m desde 23 cm/s, se formaron rizaduras oscilatorias con geometría tridimensional, la cual es asociada con la estratificación hamacada. En la Fig. 9, se observa que existe una relación de cierta linealidad entre el espaciamiento (E) y la velocidad orbital (U_m), en ambas localidades.

En las gráficas de E vs. U_m , se muestra el espaciamiento de la estructura (E) como una función de la velocidad orbital máxima (U_m). El espaciamiento se va incrementando claramente, conforme se incrementa U_m .

Ahora bien, si el espaciamiento, es una función de U_m , la relación de ésta con el

However, velocities of up to 41.87 cm/s are obtained in Punta Banda, and in Peñasco La Lobera the maximum is 33.03 cm/s. In the experiments of Southard *et al.* (1990) with U_m from 23 cm/s, oscillatory ripples were formed with three-dimensional geometry, which is associated with hummocky stratification. It can be seen in Fig. 9 that there is a certain linear relation between the spacing (E) and the orbital velocity (U_m), in both localities.

The E vs. U_m graphs show the spacing of the structure (E) as a function of the maximum orbital velocity (U_m). The spacing clearly increases as U_m increases.

Therefore, if the spacing is a function of U_m , its relation to the wave period is highly relevant, since it determines the type of structures that may develop, from two-dimensional oscillatory ripples, characteristic of low orbital velocities and short wave periods, to three-dimensional oscillatory rip-

Tabla 3. Características del paleooleaje, para la localidad de Punta Banda, B.C., con un tamaño de grano de 0.025 cm y $h/L^* = 0.05$.

Table 3. Characteristics of the paleo-wave, for the locality of Punta Banda, B.C., with a grain size of 0.025 cm and $h/L^* = 0.05$.

Espaciamiento de la rizadura, E (cm)	Diámetro orbital, d_o (cm)	Velocidad orbital, U_m (cm/s)	Periodo de ola, T (s)	Longitud de ola, L^* (cm)	Profundidad del agua, h (cm)	Longitud de ola, L (cm)	Altura de ola, H (cm)
50	77	25	9.70	14690	734.50	8102	46
42	65	24	8.51	11306	565.34	6236	39
140	215	32	21.01	68919	3445.90	38012	129
84	129	28	14.32	32027	1601.36	17664	78
120	185	31	18.71	54685	2734.00	30162	111
184	283	34	25.00	103830	5191.00	57268	170
200	308	35	27.45	117664	5883.00	64898	185
135	208	32	20.44	65253	3262.00	35990	125
95	146	30	15.70	38519	1925.90	21246	88
150	231	33	22.12	76425	3821.00	42153	138
180	277	34	25.36	100463	5023.00	55411	166
51	78	25	9.85	15151	757.57	8356	47
90	135	29	15.00	35519	1775.00	19590	83
300	462	39	37.00	216163	10808.00	119226	277
400	615	42	46.00	332805	16640.00	183561	370
45	69	24	8.96	12557	627.89	6926	42
50	77	25	9.70	14690	734.50	8102	46
48	74	25	9.40	13834	691.70	7630	44

periodo de la ola es de gran relevancia, ya que determina el tipo de estructuras que pueden desarrollarse, desde rizaduras oscilatorias bidimensionales, características de velocidades orbitales bajas y cortos periodos de ola, hasta rizaduras oscilatorias tridimensionales de altas velocidades orbitales y largos periodos de ola (Southard *et al.*, 1990). En la Fig. 10 se observa que T y U_m guardan cierta relación de linealidad. Si extrapoláramos estos resultados, se obtendría el desarrollo de configuraciones de fondo de tipo planar, las cuales se forman a grandes velocidades orbitales.

La relación entre la velocidad orbital máxima (U_m) y la altura de ola (H) también muestra un comportamiento casi lineal (Fig. 11). Analizando los resultados podemos observar que el comportamiento de la altura de

plenas, of high orbital velocities and long wave periods (Southard *et al.*, 1990). It can be seen in Fig. 10 that T and U_m have a certain linear relation. If we were to extrapolate these results, planar bottom configurations would be obtained, which are formed at high orbital velocities.

The relationship between the maximum orbital velocity (U_m) and the wave height (H) also shows a nearly linear behaviour (Fig. 11). The analysis of the results shows that the wave height and spacing increase as orbital velocity increases, in both localities.

The analysis of the field data on the spacing of hummocky and swaley structures presents a series of problems ranging from its generation, due to a wide range of oscillation frequencies produced by the wave spectrum,

Tabla 4. Características del paleooleaje obtenidas para la localidad de Peñasco La Lobera, B.C., con un tamaño de grano de 0.025 y $h/L^* = 0.05$.

Table 4. Characteristics of the paleo-wave obtained for the locality of Peñasco La Lobera, B.C., with a grain size of 0.025 and $h/L^* = 0.05$.

Espaciamiento de la rizadura, E (cm)	Diámetro orbital, d_o (cm)	Velocidad orbital, U_m (cm/s)	Periodo de ola, T (s)	Longitud de ola, L^* (cm)	Profundidad del agua, h (cm)	Longitud de ola, L (cm)	Altura de ola, H (cm)
122	188	31	19.00	56058	2802	30919	113
105	162	30	17.00	44759	2237	24687	97
110	169	30	17.50	47994	2399	26471	102
155	238	33	22.60	80278	4013	44278	143
59	91	26	11.00	18852	942	10398	55
108	166	30	17.00	46691	2334	25752	100
130	200	32	19.80	61661	3083	34010	120
140	215	32	21.00	68911	3445	38008	129
100	154	30	16.00	41600	2080	22945	92
65	100	27	11.80	21800	1090	12024	60
80	123	28	13.80	29766	1488	16418	74
80	123	28	13.80	29766	1488	16418	74
122	188	31	19.00	56058	2802	30919	113
155	238	33	22.60	80278	4013	44278	143
105	162	30	17.00	44759	2237	24687	97
110	169	30	17.50	47994	2399	26471	102
59	91	26	11.00	18852	942	10398	55
108	166	30	17.00	46691	2334	25752	100
100	154	30	16.00	41600	2080	22945	92
150	231	33	22.00	76425	3821	42153	138

ola y el espaciamento van incrementándose conforme se incrementa la velocidad orbital, en ambas localidades.

El análisis de los datos de campo del espaciamento de las ECA y ECH presenta una serie de problemas que va desde su generación,

to its measurement in rocky strata. However, it is important to understand the mechanisms that generate it in order to interpret the results. In both localities, there is a significant dependence between the paleo-wave parameters and the spacing of the structure. This is

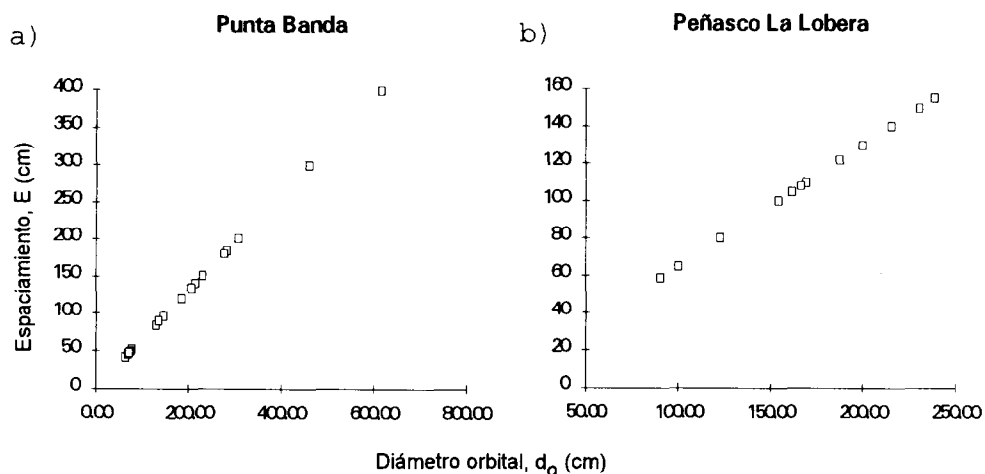


Figura 8. Gráfica de la relación entre espaciamento (E) y diámetro orbital (d_o), para sedimentos de 0.025 cm de diámetro: a) Punta Banda y b) Peñasco La Lobera.

Figure 8. Graph of the relationship between the spacing (E) and the orbital diameter (d_o), for sediments of 0.025 cm diameter: a) Punta Banda and b) Peñasco La Lobera.

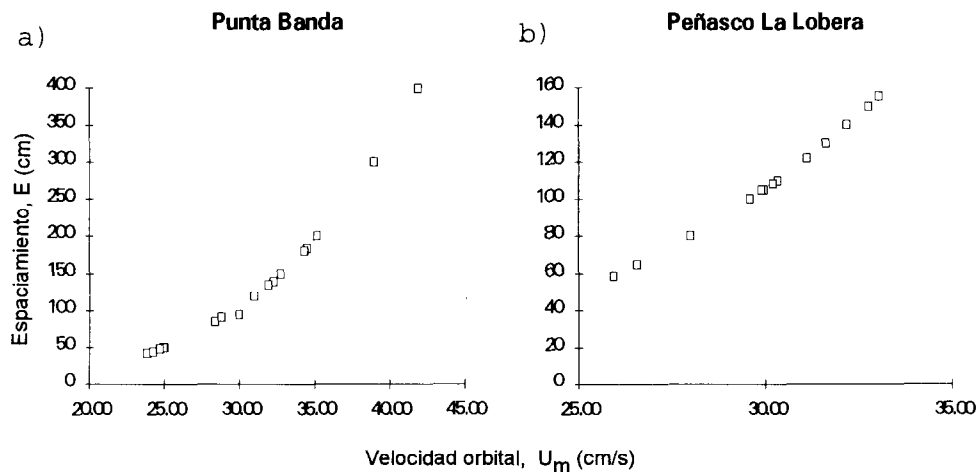


Figura 9. Gráfica de la relación entre espaciamento (E) y velocidad orbital (U_m), para diámetros de sedimento de 0.025 cm: a) Punta Banda y b) Peñasco La Lobera.

Figure 9. Graph of the relationship between the spacing (E) and the orbital velocity (U_m), for sediments of 0.025 cm diameter: a) Punta Banda and b) Peñasco La Lobera.

debida a una amplia gama de frecuencias de oscilación producidas por el espectro de oleaje, hasta su medición en los estratos rocosos. Sin embargo, comprender los mecanismos de generación es importante para interpretar los resultados. En ambas localidades, se puede observar que existe una dependencia significa-

due, in part, to the fact that most of the equations used to estimate these parameters are related to the orbital diameter, which is the product of a relation to the spacing of the structure.

Though the results for both localities show certain similarity, there are significant

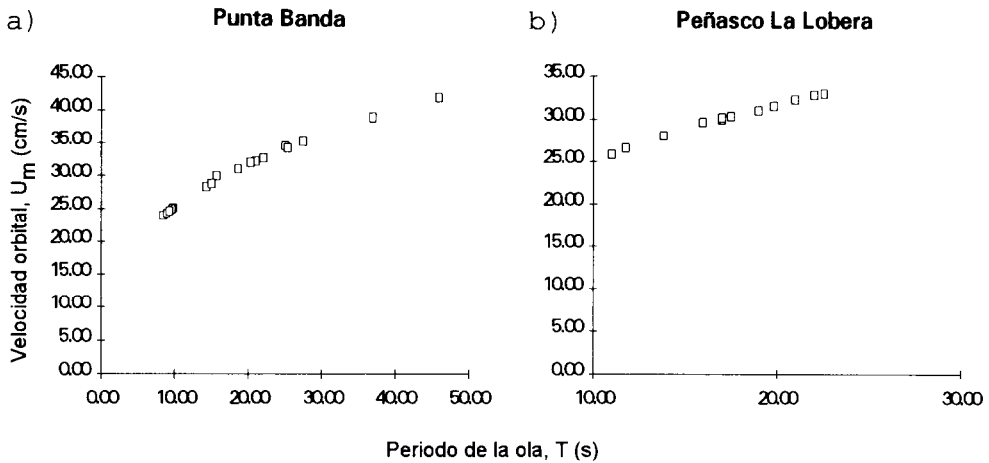


Figura 10. Relaciones de estabilidad entre la velocidad orbital máxima (U_m) y el periodo de ola (T), para diámetros de sedimento de 0.025 cm: a) Punta Banda y b) Peñasco la Lobera.

Figure 10. Stability relationships between the maximum orbital velocity (U_m) and the wave period (T), for sediments of 0.025 cm diameter: a) Punta Banda and b) Peñasco La Lobera.

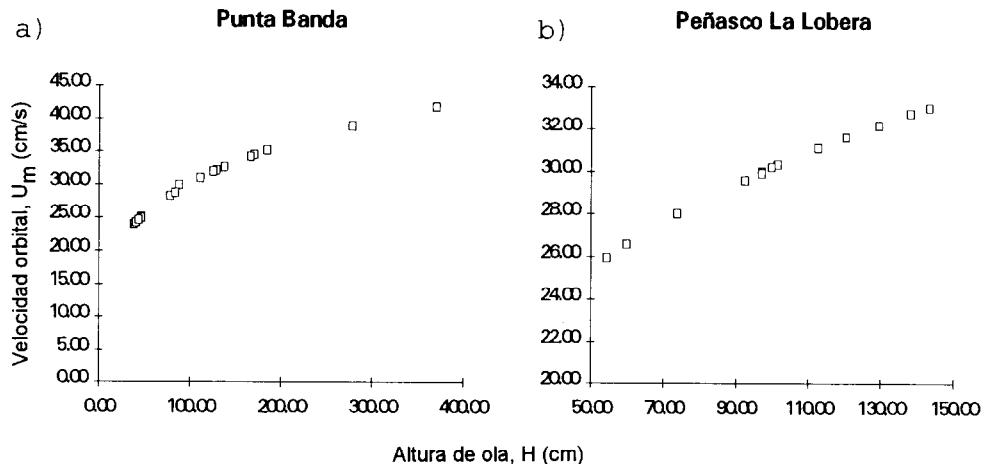


Figura 11. Relación entre la velocidad orbital máxima (U_m) y la altura de ola (H): a) Punta Banda y b) Peñasco La Lobera.

Figure 11. Relationship between the maximum orbital velocity (U_m) and the wave height (H): a) Punta Banda and b) Peñasco La Lobera.

tiva entre los parámetros del paleooleaje y el espaciamento de la estructura. A esto se debe, en parte, que la mayoría de las ecuaciones utilizadas en la estimación de dichos parámetros esté relacionada con el diámetro orbital, el cual es producto de una relación con el espaciamento de la estructura.

Aun cuando en ambas localidades los resultados presentan cierta similitud, hay diferencias notables en cuanto a las alturas de ola bajo las cuales se desarrollaron las estructuras sedimentarias. Esto es, en Punta Banda, predominan alturas de ola mayores (hasta 3.69 m) que en Peñasco La Lobera (1.43 m máxima). Además, las profundidades a las cuales se presentan estas características del oleaje también son muy diferentes en ambas localidades, ya que la profundidad promedio en Punta Banda es 55.5 m y en Peñasco la Lobera, 23.79 m. Esto se interpreta como dos subambientes, uno de los cuales correspondería al límite superior del frente costero (*shoreface*), representado por la localidad de Peñasco La Lobera, que además tiene estructuras predominantemente acunadas, mientras que Punta Banda estaría caracterizando un subambiente correspondiente al límite inferior del frente costero, que presenta estructuras con estratificación predominantemente hamacada, la cual ha sido atribuida a flujos generados por tormentas.

CONCLUSIONES

El comportamiento de los parámetros del oleaje: espaciamento, diámetro orbital (d_o), velocidad orbital máxima (U_m) y periodo de la ola (T), así como las relaciones entre ellos, son similares en ambas localidades estudiadas.

Las alturas de ola fueron mayores en Punta Banda que en Peñasco La Lobera, puesto que reflejan condiciones de energía diferentes.

El ambiente donde se generaron las estructuras sedimentarias de Punta Banda corresponde al límite inferior del frente costero (*shoreface*), mientras que Peñasco La Lobera corresponde al límite superior.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de campo realizado para los propósitos de este artículo fue desarrollado como parte del curso de sedimentología

diferencias with regard to the wave heights under which the sedimentary structures developed; that is, the wave heights in Punta Banda are greater (up to 3.69 m) than in Peñasco La Lobera (1.43 m maximum). Moreover, the depths at which these wave characteristics occur are also very different in both localities, since the average depth in Punta Banda is 55.5 m and in Peñasco La Lobera, 23.79 m. This is interpreted as two subenvironments: one corresponds to the upper limit of the shoreface, represented by the locality of Peñasco La Lobera, which presents predominantly swaley structures, and the other corresponds to the lower limit of the shoreface, represented by Punta Banda, which presents structures with predominantly hummocky stratification, attributed to storm-generated flows.

CONCLUSIONS

The behaviour of the paleo-wave parameters: orbital diameter (d_o), maximum orbital velocity (U_m) and wave period (T), and the relationships between them are similar in both localities.

Wave heights were greater in Punta Banda than in Peñasco La Lobera, since they reflect different energy conditions.

The environment in which the sedimentary structures of Punta Banda were generated corresponds to the lower limit of the shoreface, whereas Peñasco La Lobera corresponds to the upper limit.

ACKNOWLEDGEMENTS

The field work for this study was undertaken as part of the course on coastal sedimentology, of the postgraduate program of the *Facultad de Ciencias Marinas*. This study is part of the project "Líneas de costas rocosas en Baja California" (4026), supported by the UABC. The first author also acknowledges the support received from the UABC through project 0235, "Evolución geológica de la zona costera de Baja California". We thank Guillermo Avila Serrano, Francisco Aranda Manteca, José Luis Fermán Almada, Lorenzo Gómez-Morín F. and Jorge Torres for their valuable collaboration in the field work.

English translation by Christine Harris.

costera, del programa de posgrado de la Facultad de Ciencias Marinas. El proyecto al cual pertenece el presente estudio es financiado por la UABC, dentro del programa Líneas de Costas Rocosas en Baja California (4026). Luis Antonio Cupul Magaña agradece el apoyo recibido de la UABC, a través del proyecto 0235, Evolución Geológica de la Zona Costera de Baja California. Agradecemos, a Guillermo Avila Serrano, Francisco Aranda Manteca, José Luis Fermán Almada, Lorenzo Gómez-Morín F. y Jorge Torres, su valiosa colaboración en el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Allen, J.R.L. (1979). A model for the interpretation of wave ripple-marks using their wavelength, textural composition and shape. *J. Geol. Soc. London*, 136: 673-682.
- Allen, P.A. (1981). Some guidelines in reconstructing ancient sea conditions from wave ripplemarks. *Mar. Geol.*, 43: 59-67.
- Anderson, J. and Hanna, S. (1935). Cretaceous geology of Lower California. *California Academy of Science*, 23(1): 1-34.
- Aranda-Manteca, F. y Briceño-Rosete, R. (1987). Cretácico tardío de Punta Banda, B.C. En: *Resúmenes del VII Congreso Nacional de Oceanografía*. UAS, Mazatlán, Sinaloa, México.
- Bárceñas-Pazos, M.A. (1988). Paleontología y paleoecología de la Formación Rosario (Campaniano-Maestrichtiano) de Baja California, México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC.
- Bourgeois, J. (1980). A transgressive shelf sequence exhibiting hummocky stratification: the Cape Sebastian Sandstone (Upper Cretaceous), southwestern Oregon. *J. Sedim. Petrol.*, 50(3): 681-702.
- Clifton, H.E. (1976). Wave-formed sedimentary structures: a conceptual model. *Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, Spec. Publ.*, pp. 126-148.
- Dott, R.H. and Bourgeois, J. (1982). Hummocky stratification: significance of its variable bedding sequences. *Geol. Soc. America Bull.*, 93: 663-680.
- Duke, W.L. (1985). Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes and intense winter storms. *Sedimentology*, 32: 167-194.
- Gastil, R.G., Morgan, G. and Krummenacher, D. (1981). The tectonic history of peninsular California and adjacent Mexico. In: W.G. Ernest (ed.), *The Geotectonic Development of California*, pp. 284-306.
- Harms, J.C. (1969). Hydraulic significance of same sand ripples. *Geol. Soc. America Bull.*, 80: 363-369.
- Harms, J.C., Southard, J.B., Spearing, D.R. and Walker, R.G. (1975). Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences. *Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, Short Course No. 2*, 161 pp.
- Harms, J.C., Southard, J.B., Spearing, D.R. and Walker, R.G. (1982). Structures and sequences in clastic rocks. *Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, No. 9*.
- Komar, P.D. (1974). Oscillation ripple marks and the evaluation of ancient wave conditions and environments. *J. Sedim. Petrol.*, 44(1): 169-180.
- Komar, P.D. and Miller, M.C. (1973). The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. *J. Sedim. Petrol.*, 43(4): 1101-1110.
- Komar, P.D., Neudeck, R. and Kulm, L.D. (1972). Observations and significance of deep-water oscillatory ripple marks on the Oregon continental shelf. In: D. Swift, D. Duane and O. Pilkey (eds.), *Shelf Sediment Transport*. Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, pp. 601-619.
- Ledesma Vázquez, J. (1991). Upper Cretaceous-Paleocene storm deposits in Baja California, Mexico. M.Sc. thesis, San Diego State University.
- Marinovich, L. (1975). Morphology and mode of life of the Late Cretaceous rudist, *Corallochama orcutti* White. *J. Paleontol.*, 49(1): 212-223.
- Miller, M.C. and Komar, P.D. (1980a). Oscillation sand ripples generated by laboratory apparatus. *J. Sedim. Petrol.*, 50(1): 0173-0182.
- Miller, M.C. and Komar, P.D. (1980b). A field investigation of the relationship between oscillation ripple spacing and the near-bottom water orbital motions. *J. Sedim. Petrol.*, 50(1): 183-191.

- Newton, R.S. (1968). Internal structure of wave-formed ripple marks in the near-shore zone. *Sedimentology*, 11: 275-292.
- Saul, L.R. (1970). Upper Cretaceous faunas of Punta Banda. In: E.C. Allison *et al.* (eds.), Pacific Slope Geology of Northern Baja California and Adjacent Alta California: **Pacific Sections AAPG, SEPM, and SEG**, a Guidebook, pp. 79-81.
- Southard, J.B., Lambie, J.M., Federico, D.C., Pile, H.T. and Weidman, C.R. (1990). Experiments on bed configurations in fine sands under bidirectional purely oscillatory flow, and the origin of hummocky cross-stratification. *J. Sedim. Petrol.*, 60: 1-17.
- Walker, R.G. (1984). Facies models. *Geoscience*, Canada, reprint series 1, 317 pp.