

## **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DEL OLEAJE EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, BAJA CALIFORNIA, MEDIANTE IMÁGENES DE SUPERFICIES MARINAS**

### **SPATIAL WAVE BEHAVIOR ANALYSIS IN TODOS SANTOS BAY, BAJA CALIFORNIA, BY MEANS OF IMAGES OF THE SEA SURFACE**

Octavio Meillon-Menchaca  
Josué Álvarez-Borrego

Departamento de Óptica  
División de Física Aplicada  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada  
Km. 107 carretera Tijuana-Ensenada  
Ensenada, Baja California, México

*Recibido en marzo de 1996; aceptado en septiembre de 1996*

#### **RESUMEN**

La relación que existe entre el espectro direccional del oleaje y el patrón de difracción óptico o digital de una imagen de la superficie del mar es un hecho ya conocido. Barber (1954) mostró que la direccionalidad del oleaje puede ser estimada del patrón de difracción de una imagen fotográfica. Este trabajo presenta el análisis de imágenes aéreas de la superficie marina. En cada imagen se obtuvo el patrón de difracción o espectro de potencia para determinar su espectro direccional. La técnica aplicada a imágenes de la superficie marina, obtenidas el 12 de mayo de 1993, muestra que el oleaje presentó una dirección predominante hacia los 65°N, así como la procedencia de éste, en un intervalo de los 250°SO. Las longitudes de onda de 200 a 12 m fueron las más frecuentemente encontradas. Dentro de este artículo, se describe en detalle la implementación y el diseño del sistema fotográfico utilizado. Se concluye y discute sobre la aplicabilidad, las limitaciones, así como el potencial que el método tiene en la oceanografía.

*Palabras clave:* oleaje, fotografía, Fourier, espectros de potencia, patrones de difracción.

#### **ABSTRACT**

The relationship between the directional spectrum of sea surface waves and the optical or digital diffraction pattern is well established. Barber (1954) proved that the wave direction can be estimated from the diffraction pattern of a photographic image. This work presents the analysis of aerial sea surface images. The diffraction pattern or power spectrum of each image was obtained to determine the directional spectrum. The technique applied to the sea surface images obtained 12 May, 1993 showed that the waves presented a predominant direction to 65°N and an origin in the 250°SW range. The 200 to 12 m wavelengths were the most frequently found. The implementation and design of the photographic system is described in this paper. We discuss its applicability and limitations, as well as the potential this method has in oceanography.

*Key words:* waves, photography, Fourier, power spectrum, diffraction pattern.

## INTRODUCCIÓN

Un fenómeno natural que por su simple y armoniosa forma de manifestarse atrae la atención es el oleaje; sin embargo, recordemos que con su energía, el oleaje es uno de los principales responsables de la forma que tienen nuestras costas, que si bien, a veces, forma hermosas playas, también puede desatar su energía con resultados muy negativos.

Las olas ocurren en una gran variedad de tamaños y formas. Las más comunes dependen del esfuerzo del viento, de su duración y del área de mar sobre la cual esté actuando. Los principales parámetros que describen su naturaleza son la longitud, altura, periodo y dirección de propagación.

Para comprender y tratar de predecir los procesos costeros, como por ejemplo el transporte de sedimentos a lo largo de la costa, es necesario contar con información estadística de esos parámetros. La experiencia y estudios ya realizados nos muestran que el registro de datos de olas es de vital importancia en obras de ingeniería costera, y nos produce ahorros considerables, además de la seguridad y la integridad de las estructuras.

Lo anterior motiva el desarrollo de estudios de laboratorio y de campo a corto y largo plazo, cuyos resultados sean utilizados para diseñar la metodología y las bases para entender el singular comportamiento del oleaje.

Se han desarrollado varios métodos de medición, entre los que se encuentran: estereofotografía (Pierson *et al.*, 1960), boyas *pitch and roll* (Longuet-Higgins *et al.*, 1963) y arreglos de sensores de presión (Panicker y Borgman, 1970). De estos estudios se obtuvieron resultados relevantes, pero aun así, los costos y dificultades técnicas asociados con cada uno de estos métodos han tenido un uso limitado. A mediados de siglo, se comenzó a medir el oleaje en forma cualitativa con radar y procesado óptico. Barber (1949, 1954) mostró que la periodicidad y direccionalidad del oleaje puede ser estimado del patrón de difracción óptico de una imagen fotográfica de la superficie del mar. El patrón de difracción fue producido en ese entonces con un arreglo óptico sencillo, que mostraba el patrón del oleaje

## INTRODUCTION

Waves are natural phenomena that attract attention because of the simple and harmonious manner in which they manifest themselves. Waves, because of their energy, are mainly responsible for the shape of our coasts; sometimes they form beautiful beaches, but other times they can unleash their energy with very negative results.

Waves occur in many shapes and sizes. The most common depend on the force of the wind, its duration and on the area of the sea over which it is blowing. The principal parameters that describe their nature are length, height, period and direction of propagation.

In order to understand and attempt to predict coastal processes, for example sediment transport along the coast, the statistical information of these parameters is required. Experience and studies already made indicate that wave data are of vital importance for coastal engineering projects, and result in considerable savings as well as safety and integrity of the structures.

The development of short- and long-term laboratory and field studies are therefore encouraged, the results of which can be used to design methods and bases for understanding the particular behavior of waves.

Many measuring techniques have been developed, some of which include: stereophotography (Pierson *et al.*, 1960), pitch and roll buoys (Longuet-Higgins *et al.*, 1963) and pressure sensor arrays (Panicker and Borgman, 1970). Relevant results have been obtained from these studies, but the costs and technical difficulties associated with each one of these methods have limited their use. Around the 1950s, waves began to be measured qualitatively with radar and optical processes. Barber (1949, 1954) showed that periodicity and wave direction can be estimated from the optical diffraction pattern of a photographic image of the sea surface. The diffraction pattern was produced from a simple optical array that showed the predominant wave pattern as fine dots at an angle and appropriate wavelengths.

After this, many pioneer studies emerged that use photographic techniques as the basic

dominante como puntos finos a un ángulo y longitud de ondas apropiados.

Después de esto han existido muchos trabajos pioneros donde las técnicas fotográficas son la herramienta básica para estimar los parámetros estadísticos de la superficie marina. Ejemplos de estos trabajos los podemos encontrar en Stilwell y Pilon (1974) y Kasevich (1975), que hicieron posible la determinación fotoóptica de espectros de olas a un primer orden. En trabajos más aplicados (Hsu Yuang, 1975; Álvarez-Borrego, 1983, 1985, 1987; Álvarez-Borrego y Machado, 1985), se utiliza un sistema óptico coherente para analizar una superficie del mar simulada por computadora. El objetivo de estos trabajos fue entender la técnica óptica para obtener una información cualitativa del espectro del oleaje.

Dado que las propiedades direccionales del oleaje son de vital interés en varias áreas de la dinámica costera, incluyendo estudios de refracción, transporte de sedimentos y diseño de estructuras marinas, surge la motivación de caracterizar espacialmente el oleaje en la Bahía de Todos Santos, Baja California, mediante el análisis de imágenes aéreas de la superficie del mar. Tomando en cuenta las observaciones que hiciera Barber (1948), esta investigación se basa en el análisis del patrón de difracción que produce la transformada de Fourier de imágenes fotográficas.

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Todos Santos (fig. 1) se localiza en la costa occidental de la península de Baja California, entre las latitudes 31°41' y 31°56'N y las longitudes 116°34' y 116°51'O. Los límites naturales son: Punta San Miguel al norte, Punta Banda al sur y las islas de Todos Santos en la porción central, que definen dos entradas y salidas a la bahía que permiten una circulación continua de agua oceánica (Ulloa-Torres, 1989).

La línea de costa de la bahía está compuesta de una ribera rocosa que comprende Punta San Miguel, Punta El Sauzal, Punta Morro y Punta Ensenada, con playas de bolsillo entre ellas. Las puntas de El Sauzal y Ensenada se prolongaron en forma de rompeolas para proteger el puerto

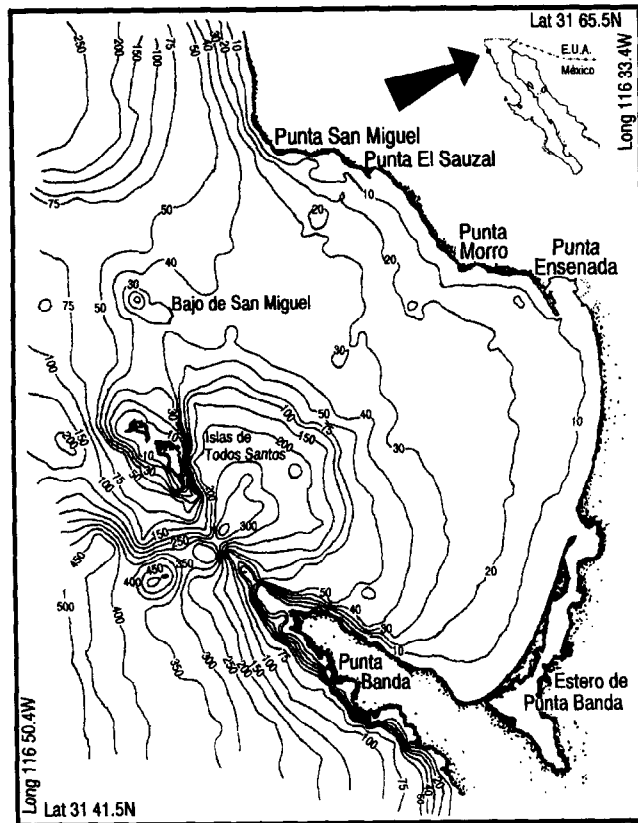
tool for estimating the statistical parameters of the sea surface. Some examples of these works are those of Stilwell and Pilon (1974) and Kasevich (1975), who made possible the photo-optical determination of first-order wave spectra. In more applied works (Hsu Yuang, 1975; Álvarez-Borrego, 1983, 1985, 1987; Álvarez-Borrego and Machado, 1985), a coherent optical system is used to analyze a computer-simulated sea surface. The objective of these studies was to understand the optical technique in order to obtain qualitative information of the wave spectrum.

Since the directional properties of the waves are of great interest in many areas of coastal dynamics, including refraction studies, sediment transport and design of marine structures, the objective of this study was to spatially characterize the waves in Todos Santos Bay, Baja California, using the analysis of aerial images of the sea surface. Taking into account the observations of Barber (1948), this study is based on the analysis of the diffraction pattern produced by the Fourier transform of photographic images.

## DESCRIPTION OF THE STUDY AREA

Todos Santos Bay (fig. 1) is located on the west coast of the peninsula of Baja California, between 31°41' and 31°56'N and 116°34' and 116°51'W. The natural boundaries are: Punta San Miguel to the north, Punta Banda to the south and the Todos Santos Islands in the center, which define two entrances to the bay and permit a constant circulation of ocean water (Ulloa-Torres, 1989).

The coastline of the bay consists of a rocky shore that encompasses Punta San Miguel, Punta El Sauzal, Punta Morro and Punta Ensenada, with pocket beaches between them. Punta El Sauzal and Punta Ensenada were extended to form a breakwater that protects the ports of El Sauzal and Ensenada, respectively. A sandy beach, 14 km long, starts at the south of the port of Ensenada and ends at the base of Punta Banda. This beach is interrupted by a mouth that defines the entrance to a coastal lagoon known as the Punta Banda Estuary. The rocky shore of Punta Banda is very irregular, with



**Figura 1.** Configuración batimétrica de la Bahía de Todos Santos.  
**Figure 1.** Bathymetric configuration of Todos Santos Bay.

de El Sauzal y el puerto de Ensenada, respectivamente. Una playa arenosa de 14 km de longitud se inicia al sur del puerto de Ensenada y termina en la base de Punta Banda. Esta playa se interrumpe por una boca que determina la entrada a una laguna costera conocida como el Estero de Punta Banda. La ribera rocosa de Punta Banda se caracteriza por ser una costa muy irregular, con cantiles casi verticales y playas pequeñas con escasa arena entre ellos.

La configuración batimétrica de la bahía es irregular. Los rasgos sobresalientes son: (1) el bajo de San Miguel, con una profundidad mínima de 5.5 m, que se ubica entre Punta San Miguel y las islas de Todos Santos; (2) una

almost vertical cliffs and small beaches with little sand between them.

The bathymetric configuration of the bay is irregular. The most notable features are: (1) the shoal of San Miguel, with a minimum depth of 5.5 m, located between Punta San Miguel and the Todos Santos Islands; (2) a submarine depression between Punta Banda and the islands, with depths of 550 m (Ulloa-Torres, 1989).

#### MATERIALS AND METHODS

The first part of this section describes the photographic system and some aspects of the

depresión submarina entre Punta Banda y las islas, con profundidades de hasta 550 m (Ulloa-Torres, 1989).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La primera parte de este capítulo presenta la descripción del sistema fotográfico, así como algunos aspectos del diseño de la montura. Se sigue con las características de la película utilizada, el plan de vuelo y la formación del catálogo de imágenes. Para hacer más comprensible el capítulo, se incluye el diagrama de flujo (fig. 2) que enumera los pasos que se siguieron en la investigación.

### Selección e implementación del sistema fotográfico

La calidad de una fotografía aérea es determinada principalmente por la resolución del sistema fotográfico, la película, variables climáticas y el buen funcionamiento mecánico de la montura.

La variedad de cámaras que existen actualmente es muy diversa. Sin embargo, se pueden distinguir básicamente tres formatos en el mercado: el de 35 mm, que reproduce una imagen en un área de  $24 \times 36$  mm; el mediano, de  $6 \times 4.5$  cm hasta  $6 \times 17$  cm; y el grande, de  $4 \times 5$  pulgadas en adelante. En comparación con la cámara de 35 mm, la cámara de formato grande puede cubrir un área mayor y con más resolución a la misma altura. Haciendo un balance entre las ventajas y desventajas de un formato a otro, se decidió usar un sistema de formato intermedio que de una manera general abarque las ventajas de ambos. La versatilidad del sistema de 35 mm y la alta resolución de un formato más grande quedan reunidas en una cámara Hasselblad, modelo ELM, de formato  $6 \times 6$  cm (formato mediano), con motor integrado y un objetivo de 80 mm de longitud focal, modelo Zeiss Planar.

Se diseñó una montura para mantener la cámara en posición vertical y sin movimiento dentro de la avioneta; esta montura fue diseñada especialmente para el tipo de cámara y de acuerdo con las características de la avioneta. Su construcción consta de dos partes: una a

mounting design, followed by the type of film used, flight plan and organization of the image catalogue. In order to make the section easier to understand, a flow chart (fig. 2) is included that lists the steps followed in the study.

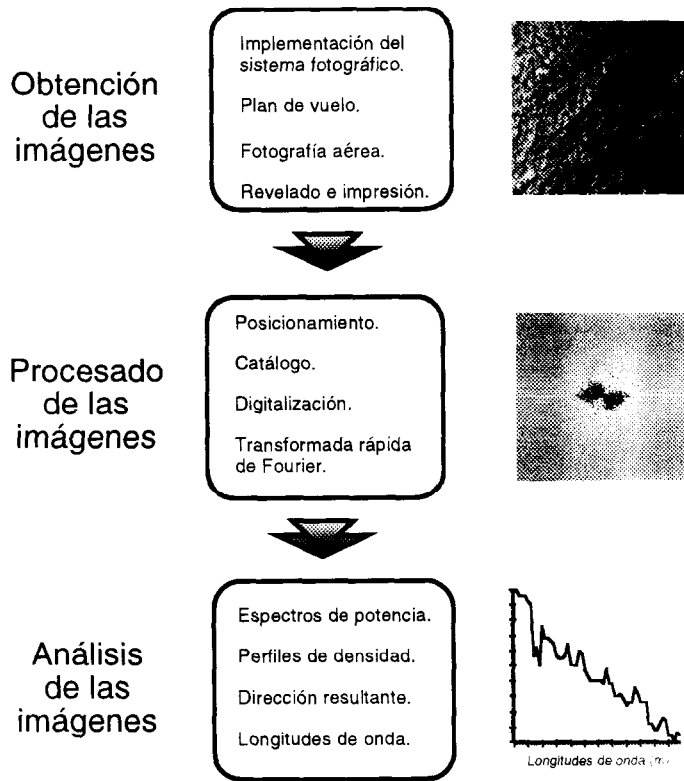
### Selection and implementation of the photographic system

The quality of an aerial photograph is determined principally by the resolution of the photographic system, film, climatic variables and the proper mechanical function of the mount.

There are many different types of cameras on the market. However, they can be divided into three basic groups: the 35 mm, which reproduces an image in an area of  $24 \times 36$  mm; the medium, from  $6 \times 4.5$  cm to  $6 \times 17$  cm; and the large,  $4 \times 5$  inches and up. Compared to the 35 mm, the large format camera can cover more area with greater resolution from the same height. After considering the advantages and disadvantages of one format over the other, an intermediate format was chosen that, in general, covers the advantages of both. The versatility of the 35 mm system and the high resolution of a larger format were obtained with the Hasselblad camera, model ELM,  $6 \times 6$  cm (medium format), with a built-in motor and a Zeiss Planar 80 mm lens.

A mount was designed to keep the camera in a vertical position and without movement inside the airplane; it was designed especially for the type of camera and characteristics of the airplane. It is made up of two parts: the first consists of aluminum plates that are screwed together. The camera is attached to this in the position required, since it has grooves that permit a fine displacement for better adjustment from inside the cabin. The second part is the base, which is an aluminum plate adhered to the fuselage inside the cabin with Allen screws. The two parts are joined together with anti-vibrators, so that the vibration produced by the plane's motor is for the most part absorbed by these devices and the exposure is unaffected.

On the ground, the necessary filters are put in place and the orientation, verticality and horizontality are calibrated with the airplane's



**Figura 2.** Diagrama de flujo que describe la metodología de este trabajo.  
**Figure 2.** Flow chart describing the methodology of this study.

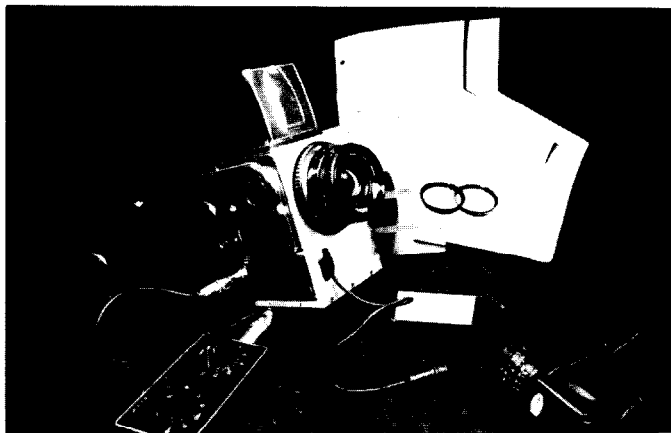
base de placas de aluminio atornilladas entre sí; a esta primera parte se sujeta la cámara en la posición requerida, ya que cuenta con ranuras que permiten un desplazamiento fino para un mejor ajuste desde el interior de la cabina. La segunda parte es la base, que es una placa de aluminio adherida al fuselaje en la parte interior de la cabina por medio de tornillos tipo Allen. Las dos partes van unidas entre sí por antivibradores, de tal manera que la vibración producida por el motor de la avioneta es absorbida en gran medida por estos dispositivos, haciendo que la exposición no se vea afectada.

En tierra se ponen los filtros necesarios y se calibra la orientación, verticalidad y horizontalidad con los aparatos de la avioneta; una vez en el aire, el sistema permite hacer todos los

instrumentos; once in the air, the system allows for manual adjustments of exposure and focusing. There is also an intervalometer for a more precise control between the exposure intervals, a cable shutter release, a point exposure meter, an orange filter to lessen the effect of fog, a mirror to facilitate the observations through the camera, and two twelve-exposure backups so that continuity between the pictures is not lost (fig. 3).

#### Film

The structure of the photographic film depends on the specific applications for which it will be used. Basically, it consists of one light-sensitive emulsion, composed of silver halides,



**Figura 3.** Sistema fotográfico utilizado.

**Figure 3.** Photographic system used.

ajustes de exposición y enfoque manualmente. Acompañan al sistema un intervalómetro para tener un control más preciso entre los intervalos de exposición, un disparador de cable, exposímetro puntual, filtro naranja para disminuir el efecto de la neblina, un espejo para facilitar la observación a través de la cámara y, para no perder la continuidad de las exposiciones, se cuenta con dos respaldos extras de 12 exposiciones cada una (fig. 3).

### La película

La estructura de una película fotográfica depende de las aplicaciones específicas en las que va a utilizarse. Básicamente, ésta consiste de una emulsión sensitiva a la luz compuesta de haluros de plata, una base que contiene esa emulsión y una capa de acetato que sostiene y protege a la vez.

Para obtener imágenes de las olas que componen la superficie del mar, se buscó una película que combinara alta resolución con índices de exposición e intervalos de contraste manipulables. Teniéndose avances en esto (Álvarez-Borrego, 1987) y haciendo pruebas de diferentes tipos de película en vuelos anteriores, se eligió Technical Pan 2415 de Kodak, que es una película negativa pancromática para blanco y negro con sensibilidad extendida al

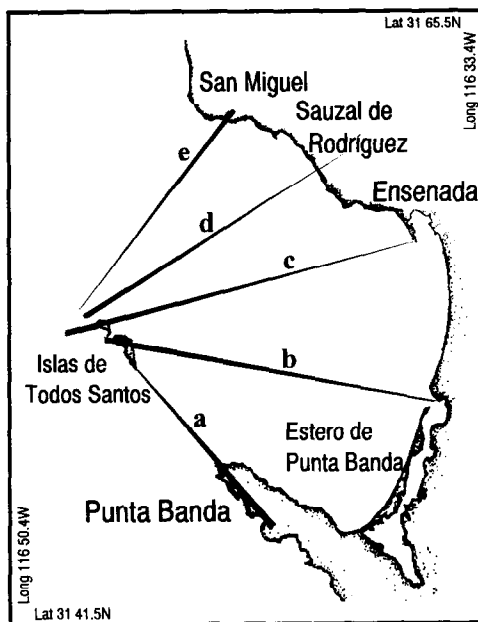
a base que contiene esta emulsión y una capa de acetato que proporciona soporte y protección.

En order to obtain images of the waves that make up the sea surface, we looked for a film that combines high resolution with adjustable exposure indexes and contrast ranges. Based on information from previous works (Álvarez-Borrego, 1987) and the results from tests conducted with different types of film in previous flights, we chose Kodak Technical Pan 2415, which is a panchromatic negative film for black and white, with extended sensitivity to red that allows it to penetrate fog when distant landscapes are photographed or when aerial shots are taken from a helicopter or airplane. It has a microscopically fine grain and an extremely high resolution (300-400 lines per millimeter), and it also offers a wide range of contrast for pictorial, scientific and technical applications.

The entire process was standardized, from the exposure of the film to the developing, thus obtaining a strict laboratory control, which is important in this type of work (Meillon-Menchaca, 1995).

### Flight plan and obtaining the images

Five flight paths were made that covered most of the bay; the transects were labeled according to the trajectory of the flight (fig. 4):



**Figura 4.** Plan de vuelo realizado el día 12 de mayo de 1993.  
**Figure 4.** Flight plan made on 12 May, 1993.

rojo, lo que hace que tenga un efecto penetrador de la neblina cuando se fotografían paisajes lejanos o cuando se hace fotografía aérea de un helicóptero o avioneta. Tiene un grano microscópicamente fino y poder de resolución extremadamente alto (300-400 líneas por milímetro), además de ofrecer una amplia gama de contraste para aplicaciones pictóricas, científicas y técnicas.

Se estandarizó todo el proceso, desde la exposición de la película hasta el revelado, llegándose a tener un estricto control de laboratorio, importantes en este trabajo (Meillon-Menchaca, 1995).

#### Plan de vuelo y obtención de las imágenes

Se realizaron cinco líneas de vuelo de manera que con ellas se cubriera la mayor parte de la bahía; los transectos se nombraron de acuerdo con la trayectoria del vuelo y son los siguientes (fig. 4): línea *a*, Punta Banda-islas Todos Santos; línea *b*, islas Todos Santos-boca del estero; línea *c*, islas Todos Santos-punta del

path *a*, Punta Banda-Todos Santos Islands; path *b*, Todos Santos Islands-mouth of the estuary; path *c*, Todos Santos Islands-end of the breakwater; path *d*, Todos Santos Islands-El Sauzal de Rodríguez; and path *e*, San Miguel-Todos Santos Islands.

The photographs were taken with a 80 mm lens, using an orange filter at an altitude of 1,067 m (3,500 feet). The positioning was made following carefully the time intervals between the exposures and cruising speed of the airplane. The format of the system described results in squared samples at a scale of 1:13,337, which gives a total coverage of 400 m per side (fig. 5).

#### Digital catalog

The photographs were printed on 11.5 × 11.5 cm high-contrast photographic paper; they were stored in Tif format in a matrix of 256 × 256 pixels, using an image processing package (IPLab Spectrum), installed in McIntosh computers, models licx and Quadra



rompeolas; línea *d*, islas Todos Santos-El Sauzal de Rodríguez; y línea *e*, San Miguel-islas Todos Santos.

Las fotografías se obtuvieron utilizando una lente de 80 mm de distancia focal, con un filtro naranja y a una altura de 1,067 m (3,500 pies). El posicionamiento se llevó a cabo siguiendo cuidadosamente los tiempos de intervalo entre las exposiciones y la velocidad crucero de la avioneta. El formato del sistema descrito da como resultado muestras cuadradas con una escala de 1:13,337, lo que nos da un área de cobertura de 400 m por lado (fig. 5).

#### Formación del catálogo digital

Las fotografías se imprimieron en papel fotográfico de alto contraste, con un tamaño de 11.5 × 11.5 cm; éstas fueron guardadas en formato Tif en una matriz de 256 × 256 pixeles, mediante un paquete de procesado de imágenes (IPLab Spectrum) instalado en computadoras McIntosh, modelos Iicx y Quadra 700. La captura digital se realizó a través de una cámara CCD, modelo COHU. A cada imagen se le asignó una nomenclatura para formar el catálogo.

#### RESULTADOS

De un total de 90 fotografías se eligieron sólo 36, eliminándose aquellas que presentaban ruido o que se encontraban muy cerca una de otra, resultando que de cada transecto se seleccionaran ocho muestras en promedio. Se le llamó ruido a aquellas imágenes que incluían otro elemento que no fuera sólo oleaje; de esta manera, las fotografías que presentaban porciones de tierra firme, espuma del oleaje al reventar o lanchas y/o buques pequeños no fueron consideradas. Las muestras contienen información de oleaje anterior y posterior al efecto producido por las islas y la batimetría de la bahía el día 12 de mayo de 1993, entre las 14:18 y 15:03 horas.

Los patrones de difracción se obtuvieron elevando al cuadrado la magnitud en la transformada de Fourier. Estos espectros tienen información de las componentes, número de onda

700. The digital processing was made with a CCD camera, model COHU. Each image was assigned a nomenclature to form the catalog.

#### RESULTS

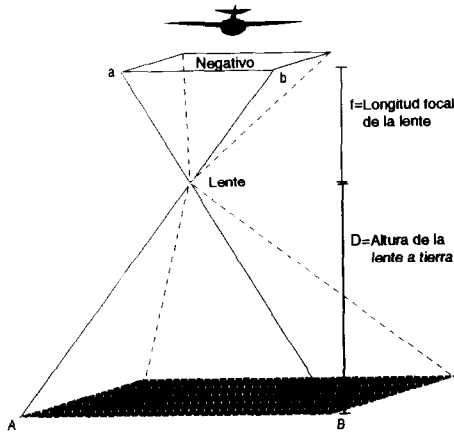
Only 36 photographs were chosen from a total of 90; those that presented noise or that were very close to another were eliminated. This resulted in an average of eight samples per transect. Noise was considered to be those images that contained other elements besides waves; thus, photographs that showed portions of land, foam from breaking waves or boats and/or small ships were not considered. The samples contain information on the waves before and after the effect produced by the islands and the bathymetry of the bay on 12 May 1993, between 14:18 and 15:03 hours.

The diffraction patterns were obtained by squaring the magnitude of the Fourier transform. The spectra contain information about the components, wave number ( $K_x$ ,  $K_y$ ), and the direction the waves have at a specific time.

Once the visual and statistical analyses were made of the power spectra of each of the images, the predominant wave direction was determined through the identification of the spectral peaks; using a first-order linear theory (Kinsman, 1965), the wavelengths were calculated that correspond to the "peaks" of the profiles made in the net direction (the images of figs. 6 through 9 have been included as examples to illustrate the above). The directions already georeferenced in azimuthal degrees are estimated from the image and flight path.

The results obtained are shown in table 1. The direction or directions (in some cases more than one) are shown at 10° intervals, as well as the wavelengths with greater energy and the depth that corresponds to each image, according to the bathymetry shown in the maps.

Table 2 shows the relationship between the position of the wave number in the numeric spectrum and the true wavelengths that appear in the photographs. Each pixel represents 1.563 m, since the 400 × 400 m indicated in the scale of the samples are represented in the matrix arrangement of 256 × 256 pixels.



**Figura 5.** Geometría básica de la relación entre la fotografía y el área de cobertura.  
**Figure 5.** Basic geometry of the relationship between the photograph and the area covered.

( $K_x$ ,  $K_y$ ) y de la orientación que las ondas tienen en un tiempo específico.

Una vez realizado el análisis visual y estadístico de los espectros de potencia de cada una de las imágenes, se determinó, a través de la identificación de los picos espectrales, la orientación del oleaje que predominaba en cada una; usando la teoría lineal de primer orden (Kinsman, 1965), se calcularon las longitudes de onda que corresponden a los "picos" de los perfiles realizados en esa dirección resultante (para ilustrar lo anterior se han incluido sólo como ejemplo las imágenes de las figs. 6 a 9). Las direcciones ya georreferidas en grados azimutales son estimadas a partir de la imagen y la línea de vuelo.

En la tabla 1 se anotan los resultados encontrados. En ella se muestra la dirección o direcciones (en algunos casos más de una), en intervalos de  $10^\circ$ , las longitudes de onda con más energía y la profundidad que corresponde a cada imagen, según la batimetría mostrada por los mapas.

En la tabla 2 se muestra la relación entre la posición del número de onda en el espectro numérico y las longitudes de onda reales que pueden estar presentes en las fotografías. Cada pixel representa 1.563 m, ya que los  $400 \times 400$  m que da la escala de las muestras están representados en el arreglo matricial de  $256 \times 256$  pixeles.

A graphic representation of the above can be observed in figs. 6 through 9. These figures (some examples) show the image of the sea surface, its position in the flight plan, its Fourier spectrum (diffraction pattern) with the net direction and corresponding profile that shows the highest energy peaks and associated wavelength, according to the relationship in table 2.

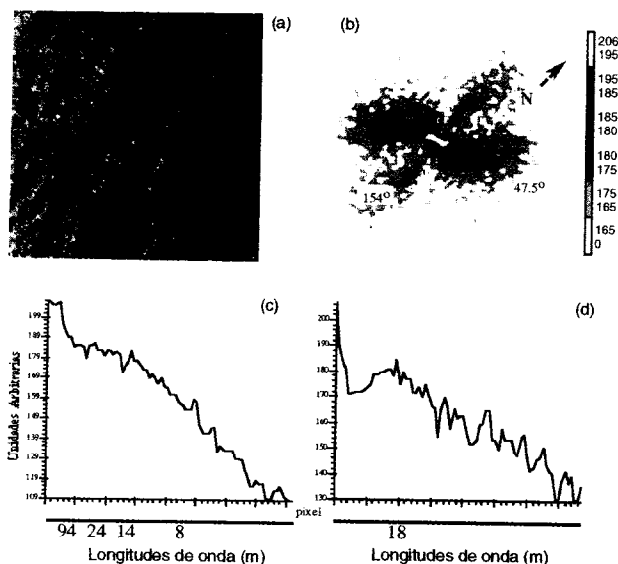
Figure 10 shows the map of directions resulting from the previous analysis, in which each arrow represents the position and net direction of each sample.

## DISCUSSION

Several test flights were needed to determine important aspects about exposure, contrast, developing times, speed of the instrument, best hour, etc. (Meillon-Menchaca, 1995).

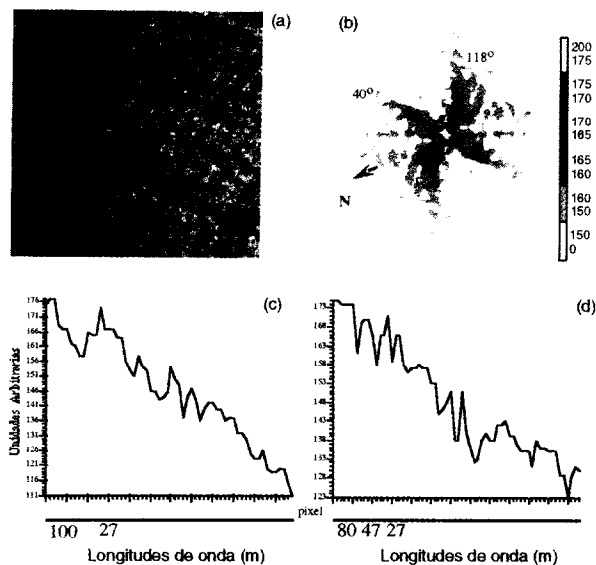
The sample size represents an area of  $400 \times 400$  m. This was selected so as to include all the waves with a wavelength of 150 m, reported to be the most common in the bay by the Instituto de Investigaciones Oceanológicas at Ensenada (UABC).

Due to the scale and matrix arrangement used, the system is incapable of detecting waves with wavelengths smaller than 3 m, since each pixel represents only 1.56 m; it was also not possible to detect waves with wavelengths greater than 400 m. Because of the versatility of



**Figura 6.** (a) Fotografía aérea 4a de la superficie del mar; (b) espectro de potencia mediante FFT; longitudes predominantes en dirección (c) 47.5° y (d) 154°.

**Figure 6.** (a) Aerial photograph 4a of the sea surface; (b) power spectrum by FFT; predominant lengths in direction (c) 47.5° and (d) 154°.



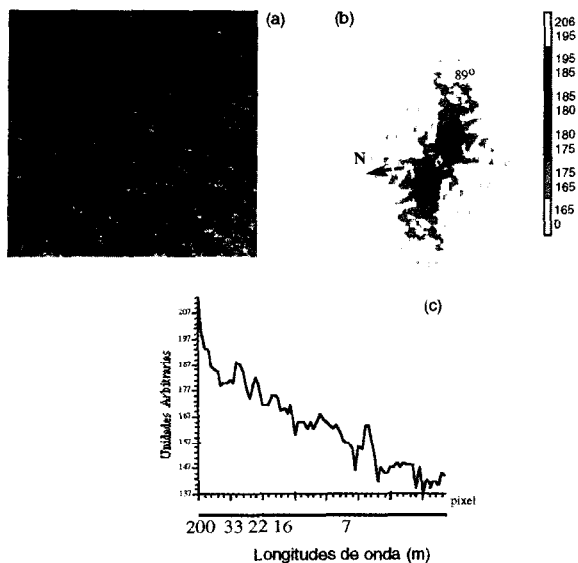
**Figura 7.** (a) Fotografía aérea 2b de la superficie del mar; (b) espectro de potencia mediante FFT; longitudes predominantes en dirección (c) 40° y (d) 118°.

**Figure 7.** (a) Aerial photograph 2b of the sea surface; (b) power spectrum by FFT; predominant lengths in direction (c) 40° and (d) 118°.

**Tabla 1.** Resultados de las fotografías correspondientes a las líneas *a*, *b*, *c*, *d* y *e*, con las direcciones resultantes en intervalos de 10°, profundidad y longitudes de onda presentes.

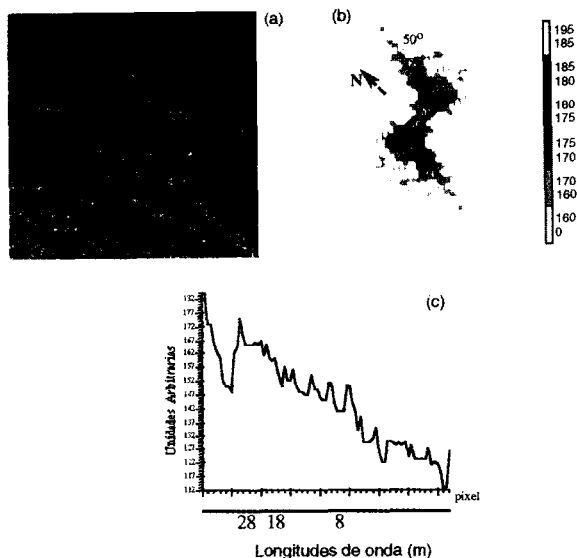
**Table 1.** Results of the photographs corresponding to paths *a*, *b*, *c*, *d* and *e*, with the net directions at 10° intervals, depth and wavelengths present.

Muestra	Dirección predominante		Profundidad (m)	$\lambda$ (m)
1a	60-70°		15	100, 36, 22
2a	25-35°	80-90°	50	100, 79, 25, 19
3a	60-70°		100	100, 38
4a	40-50°	150-160°	380	94, 24, 18
5a	60-70°	160-170°	170	80, 32
1b	0-10°		90	40, 20, 14
2b	35-45°	110-120°	240	100, 80, 47, 27
3b	95-105°	50-60°	240	100, 27
4b	45-55°	100-110°	200	100, 66, 25, 19, 8
5b	90-100°	70-80°	55	100, 40, 21, 18, 9
6b	70-80°		34	100, 27
7b	70-80°		16	100, 61, 40
8b	80-90°		4	100, 28, 10
1c	65-75°	90-100°	60	54, 33, 27
2c	140-150°	30-40°	48	25
3c	110-120°		165	45
4c	80-90°		120	200, 33, 22, 7
5c	70-80°		32	100, 45
6c	85-95°		24	100, 25
7c	80-90°		19	57, 26, 5
8c	70-80°		10	80, 22
1d	70-80°		20	300, 27, 22
2d	40-50°		26	300, 28, 8
3d	65-75°		41	133, 25
4d	70-80°		33	133, 27, 16
5d	60-70°		33	300, 27, 9
6d	70-80°		30	300, 42, 13
7d	75-85°		19	300, 42, 16, 8
1e	40-50°		8	200, 16
2e	45-55°		27	200, 90, 16
3e	40-50°		34	200, 20
4e	30-40°		37	200, 90, 31, 26
5e	30-40°		42	200, 44
6e	25-35°		35	200, 44, 12
7e	45-55°		35	200, 28
8e	25-35°		19	200, 44, 28, 12



**Figura 8.** (a) Fotografía aérea 4c de la superficie del mar; (b) espectro de potencia mediante FFT; (c) longitudes predominantes en dirección 89°.

**Figure 8.** (a) Aerial photograph 4c of the sea surface; (b) power spectrum by FFT; (c) predominant lengths in direction 89°.



**Figura 9.** (a) Fotografía aérea 2d de la superficie del mar; (b) espectro de potencia mediante FFT; (c) longitudes predominantes en dirección 50°.

**Figure 9.** (a) Aerial photograph 2d of the sea surface; (b) power spectrum by FFT; (c) predominant lengths in direction 50°.

**Tabla 2.** Relación existente entre la posición del número de onda en el espectro numérico y las longitudes de onda presentes en las fotografías.

**Table 2.** Relationship between the position of the wave number in the numeric spectrum and the wavelengths present in the photographs.

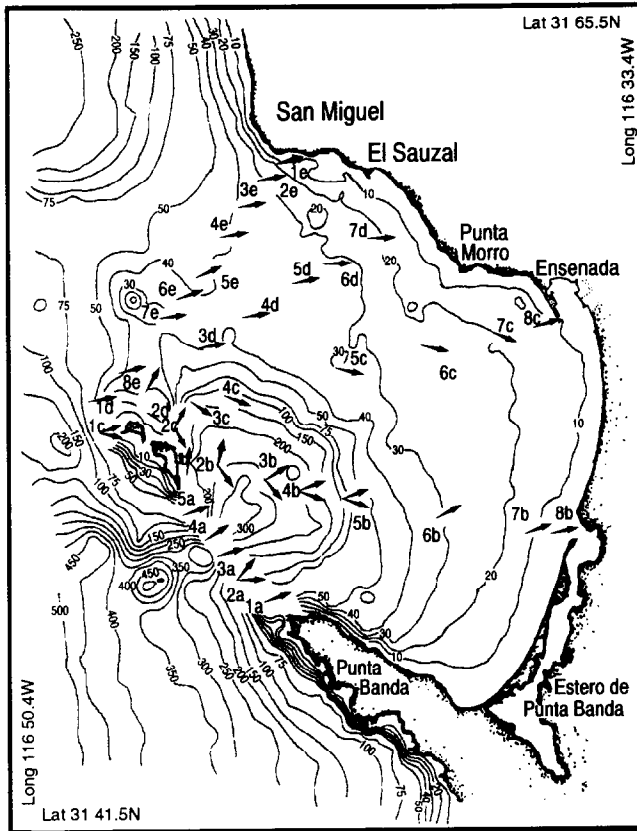
$\Delta k$	$k$	$L = 2\pi/k$ (m)
1	0.0150	399
2	0.0314	199
3	0.0472	133
4	0.0629	99.8
5	0.0786	79.8
6	0.0943	66.6
7	0.1101	57.0
8	0.1258	50.0
9	0.1415	44.0
10	0.1573	39.9
12	0.1880	33.3
14	0.2202	28.5
16	0.2517	25.0
18	0.2830	22.0
20	0.3146	20.0
25	0.3930	16.0
30	0.4720	13.3
35	0.5500	11.4
40	0.6300	10.0
50	0.7865	8.00
60	0.9438	6.60
80	1.250	5.00
100	1.573	4.00
120	1.880	3.30

Una apreciación mas gráfica de todo lo anterior se puede observar en las figs. 6 a 9. Estas figuras (algunos ejemplos) muestran la imagen de la superficie del mar, su posición en el plan de vuelo, su espectro de Fourier (patrón de difracción) con su dirección resultante y el perfil en esa dirección con los picos de más alta energía y la longitud de onda que les fue asociada, según la relación de la tabla 2.

La fig. 10 presenta el mapa de direcciones que resulta del análisis anterior, en el cual cada flecha representa la posición y la dirección resultante en cada muestra.

the technique and of the system, it was possible, however, to choose from a wide range the sample sizes needed to limit the study to one type of wave or wavelength.

With reference to the map of directions in fig. 10, it should be noted that this is not a refraction map of a specific wavelength, as is customary in classic refraction studies. It represents the direction associated with the higher energy peaks in each photograph and in which the different wavelengths are present. The examples in figs. 6 through 9 show the direction associated with high energy (green and yellow)



**Figura 10.** Mapa de las posiciones de las muestras seleccionadas y direcciones del oleaje el día 12 de mayo de 1993.

**Figure 10.** Map of the positions of the samples selected and directions of the waves on 12 May, 1993.

## DISCUSIÓN

Fueron necesarios varios vuelos de prueba para determinar aspectos importantes, como la exposición, contraste, tiempos de revelado, velocidad del aparato, mejor hora, etc. (Meillon-Menchaca, 1995).

El tamaño de muestra representa un área de  $400 \times 400$  m. Éste fue seleccionado de tal manera que las olas con longitud de onda de 150 m, reportadas como de las más comunes en la bahía por el Instituto de Investigaciones Oceanológicas en Ensenada (UABC), fueran incluidas.

and the direction in which the different wavelengths are found.

Table 1 shows the results from each flight path and includes the depth of the position of each image. This was used to differentiate between waves from deep and shallow waters. Only the deep-water waves were used to infer their origin. The average of these showed that the waves came from the  $250^\circ$  direction; this concurs with the wind data obtained from the different meteorological stations in the region, which reported speeds of up to 25 knots at the time the photographs were taken and a range of variation in direction from  $270$  to  $300^\circ$ .

Debido a la escala y el arreglo matricial utilizado, el sistema está imposibilitado a resolver la existencia de olas con una longitud de onda menor a 3 m, ya que cada pixel representa sólo 1.56 m; por otro lado, olas mayores de 400 m en longitud de onda tampoco podrían haber sido detectadas. Sin embargo, la versatilidad de la técnica y del sistema permite elegir entre un amplio intervalo los tamaños de muestra que se deseen, y con esto limitar el estudio hacia un tipo de olas o longitudes de onda específicas.

Referente al mapa de direcciones de la fig. 10, es necesario aclarar que éste no es un mapa de refracción de una longitud de onda específica, como es lo usual en los estudios clásicos de refracción, sino que representa la dirección asociada con los picos de más alta energía en cada fotografía y en la cual están presentes diferentes longitudes de onda. Véanse los ejemplos de las figs. 6 a 9, en las cuales se puede observar la dirección asociada con las altas energías (color verde y amarillo) y en las que se encuentran diferentes longitudes de onda.

En la tabla 1, que muestra los resultados en cada línea de vuelo, se incluye el valor de la profundidad que existe en la posición de cada imagen; esto con la finalidad de diferenciar entre olas de aguas profundas y someras, donde sólo las primeras se tomaron en cuenta para inferir su procedencia. Haciendo un promedio de éstas, se encontró que el oleaje provenía del rumbo de los 250°, lo que es coherente con los datos de viento obtenidos de las diferentes estaciones meteorológicas de la región, las cuales reportaron velocidades de hasta 25 nudos en el momento que se realizaban las fotos y un intervalo de variación de 270 a 300° en dirección.

Lo anterior también concuerda con la información estadística de organismos internacionales, que establece que frente a la Bahía de Todos Santos el oleaje con mayor frecuencia de ocurrencia (78%) proviene del rango direccional de 300 a 330° (Ulloa-Torres, 1989; Wiegel, 1993).

La refracción es el fenómeno físico en el cual la velocidad de fase y la altura de las olas cambian cuando éstas pasan de un medio a otro de profundidad diferente. La velocidad de fase

The above information also concurs with statistical information from international organizations, which state that off Todos Santos Bay, the waves with greatest frequency of occurrence (78%) originate from a directional range of 300-330° (Ulloa-Torres, 1989; Wiegel, 1993).

Refraction is the physical phenomenon in which the phase speed and height of the waves change when they pass from one depth to another. The phase speed decreases as depth decreases and increases as depth increases.

If the wave approaches with its crests oblique to the isobath, the variation of the celerity along its crest will differ depending on the depth where the crest of this wave is located. One part of the crest will move more rapidly than the other, which will modify the orientation of the crest as well as the direction of propagation. The trajectory of a wave deviates towards where the decrease in celerity is greater. The change in the direction of propagation produced upon passing from deep to shallow waters can vary up to 35° (Pierson *et al.*, 1960).

This can explain a certain behavior or, rather, some features of the spatial distribution described in the results. For example: in paths *b*, *d* and *e*, the wave propagation gradually changes direction as it nears the coast, since the irregularities in the bathymetric contour deviate the trajectory of the wave towards the coast. This gradual change does not occur with path *c*, which presents a considerable change in direction upon nearing the breakwater (*6c*, *7c*, *8c*). This is most probably due to the effect produced by the shoal that is located between the 10 and 20 m isobaths; the dimensions reported for this shoal off the breakwater are 500 m (Ulloa-Torres, 1989) and the important wavelengths found in this area were some of the largest.

The angle produced by the arrival direction of the wave fronts, 80 to 90° at the mouth of the Punta Banda Estuary (path *b*), 70 to 80° at the breakwater in the port of Ensenada (path *c*), 75 to 85° at the beaches of El Sauzal (path *d*) and 25 to 35° in path *e*, is one factor that influences the sediment transport along the coasts of the



decrece al disminuir la profundidad y se incrementa cuando la profundidad aumenta.

Si la ola incide con sus crestas oblicuas a las isóbatas, la variación de la celeridad a lo largo de su cresta es diferente según la profundidad donde se encuentre la cresta de tal ola. Por tanto, una parte de la cresta se moverá más rápido que la otra y esto va a modificar la orientación de la cresta al mismo tiempo que su dirección de propagación. La trayectoria de una ola se desvía hacia donde la disminución en celeridad es mayor. El cambio en la dirección de propagación que se produciría al pasar de aguas profundas a aguas someras puede variar hasta 35° (Pierson *et al.*, 1960).

Lo anterior puede explicar algunos comportamientos o más bien algo de la distribución espacial descrita por los resultados. Por ejemplo: en las líneas *b*, *d* y *e* la propagación del oleaje presenta un cambio gradual de dirección conforme éste se acerca a la costa, ya que las irregularidades del contorno batimétrico cambian la trayectoria del oleaje hacia la costa. Ese cambio gradual no sucede con la línea *c*, la cual describe un cambio considerable de dirección al acercarse al rompeolas (6*c*, 7*c* y 8*c*), que muy probablemente se debe al efecto producido por el bajo que se encuentra entre las isóbatas de 10 y 20 m; las dimensiones reportadas de este bajo frente al rompeolas son de 500 m (Ulloa-Torres, 1989) y las longitudes de onda importantes encontradas en esta área fueron de las más grandes.

El ángulo que produce la dirección de arribo de los frentes de olas de 80 a 90° en la boca del Estero de Punta Banda (línea *b*), 70 a 80° en el rompeolas del puerto de Ensenada (línea *c*), 75 a 85° en las playas de El Sauzal (línea *d*) y 25 a 35° en la línea *e*, es un factor que influye en el movimiento de sedimentos a lo largo de las playas de la bahía. La hipótesis del patrón de transporte litoral, en estas condiciones, podría establecer que existe un movimiento de sedimento al norte de la boca del Estero de Punta Banda y otro hacia el sur de la ciudad, generando una salida en la parte media.

Las islas funcionan como barreras naturales que protegen algunas estructuras del oleaje de aguas profundas en la costa, como el rompeolas.

bay. The hypothesis of the littoral transport pattern, under these conditions, could establish a sediment transport towards the north from the mouth of the Punta Banda Estuary and another towards the south of the city, creating an exit in the center.

The islands function as natural barriers that protect some structures along the coast from deep-water waves, such as the breakwater. However, the shoal at San Miguel and the submarine depression can concentrate the direction over it, depending on the origin of the waves.

From the two predominant directions identified in some photographs, it can be assumed that there is an intense diffraction zone in the region, located immediately behind the islands (2*c*, 2*b*, 3*b*, 4*b*) and a refraction zone around the borders of the islands and the submarine depression (4*a*, 5*a*). However, we know that two waves with similar direction inside the harbor can come from very different directions, and waves with different directions in shallow waters can converge in a same direction in deep waters. Another possible cause of the two predominant directions could be the presence of a local wave field and swells.

The principal geomorphologic features that modify the trajectories of the waves are: the borders of the submarine canyon and the islands, the shoals located off Punta El Sauzal and Punta Morro and the breakwater.

The intensity range of the predominant direction is explained by the fact that the locally-formed waves fluctuate in direction by approximately  $\pm 30^\circ$ , with respect to the predominant direction (Kinsman, 1965).

One defect of the power spectra is that, due to the properties of symmetry present, there is the directional ambiguity of 180°, which is considered a disadvantage. However, this problem was solved in most instances through the observation and logical evaluation of the photographs and the geomorphologic characteristics.

Another disadvantage of the technique that has been mentioned in previous works is that it does not function without sunlight (Álvarez-Borrego, 1985b).

Sin embargo, el bajo de San Miguel y la depresión submarina podrían concentrar la dirección sobre el mismo; esto dependería de la procedencia del oleaje.

La identificación de dos direcciones predominantes en algunas fotografías hacen suponer la presencia de una zona de difracción intensa en la región, que se encuentra inmediatamente después de las islas (2c, 2b, 3b, 4b), y otra zona de refracción en la región de los bordes de las islas y la depresión submarina (4a, 5a). Sin embargo, sabemos que dos olas con dirección similar en el puerto pueden provenir de direcciones muy diferentes y olas con direcciones en aguas someras distintas pueden asociarse a una misma dirección en aguas profundas. Otra posibilidad para la ocurrencia de dos direcciones predominantes sería la presencia de un campo de onda local y de un campo de mar de leva.

Así, los principales rasgos geomorfológicos que modifican las trayectorias del oleaje son: los bordes del cañón submarino y los bordes de las islas; los bajos ubicados frente a Punta El Sauzal, Punta Morro y el rompeolas.

El ancho de intensidad en la dirección predominante se explica por el hecho de que las olas formadas localmente tienen una dirección de fluctuación de aproximadamente  $\pm 30^\circ$  con respecto a la dirección predominante (Kinsman, 1965).

Un defecto en estos espectros de potencia es que, debido a las propiedades de simetría que se presentan, existe la ambigüedad direccional de  $180^\circ$ , lo que es considerado como una desventaja. Sin embargo, este problema pudo ser superado en la mayoría de los casos por medio de la observación y el razonamiento lógico de las mismas fotografías y las características geomorfológicas que le rodean.

También se ha mencionado en trabajos anteriores como una desventaja el hecho de que la técnica no funciona en ausencia de la luz solar (Álvarez-Borrego, 1985).

## CONCLUSIONES

Los resultados arrojados por este estudio concluyen que, el día 12 de mayo de 1993, la Bahía de Todos Santos presentaba oleaje con una dirección dominante hacia los  $65^\circ\text{N}$ ; las

## CONCLUSIONS

The results obtained in this study conclude that on 12 May 1993, Todos Santos Bay presented waves with a predominant direction towards  $65^\circ\text{N}$ ; the samples containing waves from deep waters indicate, in general terms, the origin of these waves to be in the  $250^\circ\text{SW}$  range.

The wavelengths traveling within the range of this general direction  $\pm 15^\circ$ , were in the 200 to 12 m range.

Regarding the capacity of the photographic system designed and the applicability of the technique to carry out this study, it can be concluded that the objectives were satisfactorily met; however, even though this study has contributed to the better understanding of the oceanography in Todos Santos Bay, the results were obtained from only one time period and should therefore be considered only a part of the total process. For statistical purposes, this method would require periodic samplings.

It is concluded that this technique has great potential for conducting wave and oceanographic studies in general.

English translation by Jennifer Davis.

---

muestras que contenían oleaje de aguas profundas suponen la procedencia de este oleaje en el rango de los  $250^\circ\text{SO}$ , esto en términos generales.

Las longitudes de onda viajando en el rango de esa dirección general  $\pm 15^\circ$ , estuvieron en el intervalo de 200 a 12 m.

Referente a la capacidad del sistema fotográfico diseñado y la aplicabilidad de la técnica en la realización de este trabajo, se puede concluir que los objetivos se cumplieron satisfactoriamente; sin embargo, aunque el estudio realizado haya contribuido al mayor conocimiento de la oceanografía clásica en la Bahía de Todos Santos, se sabe que los resultados que se obtienen en un estudio en un instante de tiempo deben ser vistos como un dato más del proceso total. Por lo tanto, en la aplicación del método con fines estadísticos se hace evidente la realización de muestreos periódicos.

Se realiza como conclusión final, el potencial que la técnica tiene en la realización de estudios de oleaje y oceanográficos en general.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Borrego, J. (1983). Análisis óptico de una imagen simulada de la superficie marina. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, BC, México, 86 pp.
- Álvarez-Borrego, J. (1985). Discusión de dos métodos para analizar superficies marinas utilizando fotografías aéreas e imágenes SLAR. *Ciencias Marinas*, 11(2): 7-21.
- Álvarez-Borrego, J. (1987). Optical analysis of two simulated images of the sea surface. *Proc. SPIE: Advances in Image Processing*, 804: 192-200.
- Álvarez-Borrego, J. and Machado, M.A. (1985). Optical analysis of a simulated image of sea surface. *Applied Optics*, 24(7): 1064-1072.
- Barber, N.F. (1949). A diffraction analysis of a photograph of the sea. *Nature*, 164: 485.
- Barber, N.F. (1954). Finding the direction of travel of sea waves. *Nature*, 174: 1048-1050.
- Bracewell, R.N. (1978). *The Fourier Transform and its Applications*. 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 314 pp.
- Hsu Yuang, L. (1975). The photo optical determination of shallow water wave spectra. Thesis, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, USA, 94 pp.
- Kasevich, R.S. (1975). Directional wave spectra from daylight scattering. *J. Geophys. Res.*, 80(33): 4535-4541.
- Kinsman, B. (1965). *Wind Waves. Their Generation and Propagation on the Ocean Surface*. Dover Publications, Inc., New York, 667 pp.
- Longuet-Higgins, M.S., Cartwright, D.E. and Smith, N.D. (1963). Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy in ocean wave spectrum. *Ocean Wave Spectra*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 111-136.
- Meillon-Menchaca, O. (1995). Estudio del comportamiento espacial del oleaje en la Bahía de Todos Santos, BC, mediante imágenes de superficies marinas. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México, 61 pp.
- Panicker, N.N. and Borgman, L.E. (1970). Directional spectra from wave-gauge arrays. *ASCE Proc. 12th Coastal Eng. Conf. 1*, pp. 117-136.
- Stilwell, D. Jr. and Pilon, R.O. (1974). Directional spectra of surface waves from photographs. *J. Geophys. Res.*, 79: 1277-1289.
- Ulloa-Torres, M.J. (1989). Refracción lineal del oleaje en el puerto de Ensenada. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México, 48 pp.
- Wiegand, R.L. (1993). Dana Point Harbor. *Shore and Beach*, 61(3): 37-55.