

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



**“ESTADÍSTICA DE OLEAJE EN DOS LOCALIDADES DENTRO DE LA  
BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C., Y SU USO PARA LA  
EXTRAPOLACIÓN DE DATOS DE OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS  
AL INTERIOR DE LA BAHÍA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL  
TÍTULO DE OCEANÓLOGO**

**PRESENTA:**

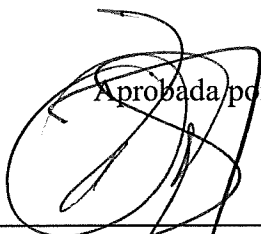
**SANTIAGO GAJÁ FERRER.**

**Ensenada, Baja California, Marzo del 2004.**

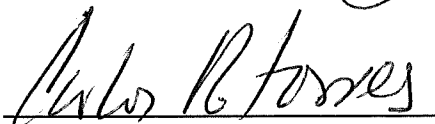
**“ESTADÍSTICA DE OLEAJE EN DOS LOCALIDADES DENTRO DE LA  
BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C., Y SU USO PARA LA EXTRAPOLACIÓN  
DE INFORMACIÓN DE OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS AL INTERIOR DE  
LA BAHÍA”**

**T E S I S:**  
**QUE PRESENTA:**  
**SANTIAGO GAJÁ FERRER**

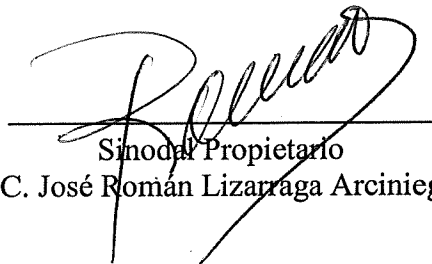
Aprobada por:



Presidente del Jurado  
Dr. Asdrubal Martínez Díaz de León



Sinodal Propietario  
Dr. Carlos Rodolfo Torres Navarrete



Sinodal Propietario  
M.C. José Román Lizarraga Arciniega

**“ESTADÍSTICA DE OLEAJE EN DOS LOCALIDADES DENTRO DE LA  
BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C., Y SU USO PARA LA  
EXTRAPOLACIÓN DE DATOS DE OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS  
AL INTERIOR DE LA BAHÍA”**

**RESUMEN**

En el presente trabajo, se describen las características estadísticas de las mediciones de oleaje realizadas del 1<sup>o</sup> de Diciembre del 2001 al 31 de Noviembre del 2002 en dos localidades de la Bahía de Todos Santos, identificadas como Punta Banda y Punta Morro. Se presentan histogramas de frecuencia de ocurrencia para la altura significativa periodo de todo el año y por estaciones del año. En las dos locaciones de medición, se encontró que el invierno y el verano presentaron características de altura significativa opuestas, ya que en el invierno se presentó la mayor cantidad de olas con mayor altura significativa a diferencia del verano, en donde se presentaron las menores. En Punta Banda se encontraron valores máximos de 2.1 m en invierno y 1.54 m en verano; en Punta Morro los valores máximos encontrados para invierno y verano fueron de 1.6 y 1m respectivamente. Primavera y otoño pueden ser consideradas como etapas de transición en donde los valores promedio de la altura significativa para Punta Banda y Punta Morro se mantienen entre los valores extremos de invierno y verano.

Para investigar la posibilidad de extrapolar la información de oleaje medida en una estación de aguas profundas al sur del estado de California identificada como *Harvest Buoy*, hacia el interior de la Bahía de Todos Santos se realizaron correlaciones lineales de la altura significativa de *Harvest Buoy* contra Punta Banda y *Harvest Buoy* contra Punta Morro, con el fin de obtener una recta de regresión lineal en la cual la pendiente

funcione como factor de transformación para obtener las alturas extrapoladas dentro de la Bahía. Con respecto a la metodología propuesta para la extrapolación de la altura significativa de aguas profundas al interior de la Bahía se puede decir que este trabajo ofrece ecuaciones lineales para extrapolar alturas correspondientes a medias anuales, medias estacionales y por ventanas direccionales. En base a la obtención del factor de correlación de los cálculos de regresión, se concluye que se puede obtener una extrapolación de la altura significativa anual a groso modo; una extrapolación confiable de algunas de las estaciones del año –invierno, primavera y otoño para Punta Banda; verano y otoño para Punta Morro- y una extrapolación aun más confiable si se toman en cuenta las ventanas por dirección .

*A las olas, momentos de energía.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Asrubal Matínez Díaz de León por la paciencia, el compromiso y la dedicación al dirigir el presente proyecto, además de ser un excelente guía durante la parte terminal de mi carrera.

A mis sinodales Dr. Carlos R. Torres Navarrete y M.C. Román Lizárraga Arciniega por sus consejos y correcciones.

Al Laboratorio de Oceanografía Física por haber proporcionado la información de oelaje; Oc. Eduardo Gil Da Silva, M.C. Sergio I. Larios Castillo y Tec. Alejandro Sánchez Bárba, gracias por su apoyo.

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas por haber brindado el equipo necesario y un excelente espacio de trabajo.

A la Facultad de Ciencias Marinas por ser mi segunda casa durante estos largos años.

A el M.C. Rafael Hernández Walls por ser mi tutor y un excelente maestro durante la carrera.

A todo el personal docente de la Facultad de Ciencias Marinas por dedicar su tiempo a cultivar la ciencia y hacer de la oceanología una carrera de suma importancia en nuestra era.

## DEDICATORIA

Al mar, por ser el elemento más importante de mi hogar.

A la Tita y toda la familia por ser tan alegres y comprensivos.

A mis abuelos, Abi, Yaya y Tito que en paz descansen.

A mis padres, Guadalupe, Servando, Margara y Gonzalo por otorgar el cariño, el apoyo y sobretodo por su confianza.

A mis hermanos, Lucia, Silvestre y Magrit por ser la sangre que me acompaña en la vida.

A mis compas, Amilcar, Vlad, Barbas y Diego por compartir momentos inolvidables y por haber estado siempre presentes.

A María, por ser una gran inspiración en mi vida y por creer que los sueños siempre son posibles.

## INDICE

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tablas.....	ii
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Extrapolación de Datos.....	5
1.2 Justificación del Proyecto.....	6
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
<b>3. ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>13</b>
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
5.1 Aparatos de Medición .....	16
5.2 Base de datos.....	17
5.3 Análisis estadístico.....	19
5.4 Extrapolación de información de aguas profundas al interior de la Bahía de Todos Santos.....	21
<b>6. RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
6.1 Variación temporal de las características físicas del oleaje.....	24
6.2 Porcentaje de Ocurrencia de altura significativa (Hs) y periodo (T).....	26
6.2.1 Análisis anual.....	27
6.2.2 Análisis estacional.....	29
6.3 Rosa de Oleaje de Harvest Buoy.....	33

<b>6.4 Extrapolación de altura significativa (Hs) de Harvest Buoy al interior de la Bahía de Todos Santos.....</b>	<b>37</b>
<b>6.4.1 Correlación anual de altura significativa (Hs) de Harvest Buoy v.s. Punta Banda y de Harvest Buoy v.s. Punta Morro.....</b>	<b>38</b>
<b>6.4.2 Correlación estacional de altura significativa (Hs) de Harvest Buoy v.s. Punta Banda y de Harvest Buoy v.s. Punta Morro.....</b>	<b>40</b>
<b>6.4.3 Correlación por ventanas direccionales de altura significativa (Hs) de Harvest Buoy v.s. Punta Banda y de Harvest Buoy v.s. Punta Morro.....</b>	<b>42</b>
<b>6.5 Estadística General.....</b>	<b>46</b>
<b>7. DISCUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>7.1 Variación temporal de las características físicas del oleaje.....</b>	<b>50</b>
<b>7.2 Porcentaje de Ocurrencia de altura significativa (Hs) y periodo (T).....</b>	<b>51</b>
<b>7.3 Correlación anual y estacional de altura significativa (Hs) de Harvest Buoy v.s. Punta Banda y de Harvest Buoy v.s. Punta Morro.....</b>	<b>53</b>
<b>7.4 Correlación por ventanas direccionales de altura significativa (Hs) de Harvest Buoy v.s. Punta Banda y de Harvest Buoy v.s. Punta Morro.....</b>	<b>54</b>
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE TABLAS

### Tabla

I. Ahorro anual de la construcción ingenieril con datos de oleaje. ....	3
II. Propósitos y actividades que requieren de la adquisición de datos de oleaje.....	4
III. Meses considerados para definir las diferentes estaciones del año.....	19
IV. Valores extremos, promedios y desviación estándar de altura significativa, periodo y dirección correspondientes al periodo de medición de Invierno del 2001 a Otoño del 2002.....	47
V. Valores extremos, promedios y desviación estándar de altura significativa, para cada estación del año.....	48
VI. Valores extremos, promedios y desviación estándar del periodo, para cada estación del año.....	49

## LISTA DE FIGURAS

### Figura

1. Localización geográfica de la Bahía de Todos Santos, Ensenada, B C. y sus rasgos geográficos más importantes.....	14
2. Localización de Harvest Buoy con respecto a la Bahía de Todos Santos y distancia correspondiente a PB y PM.....	18
3. Variación temporal de la altura significativa (Hs) y periodo (T) para todo el año.....	25
4. Histogramas de altura significativa (Hs) y periodos (T) correspondientes a todo el año de medición para los diferentes instrumentos...28	
5. Histogramas de altura significativa (Hs) y periodo (T) por estación del año para Harvest Buoy.....	30
6. Histogramas de altura significativa (Hs) y periodo (T) por estación del año para Punta Banda.....	32
7. Histogramas de altura significativa (Hs) y periodo (T) por estación del año para Punta Morro.....	34
8. Rosa de oleaje de todo el año y por estaciones del año para Harvest Buoy.....	35
9. Diagramas de dispersión y regresiones lineales de Harvest Buoy	

contra Punta Banda y Harvest Buoy contra Punta Morro para todo el año. ....	39
<b>10. Diagramas de dispersión y regresiones lineales de Harvest Buoy</b>	
contra Punta Banda y Harvest Buoy contra Punta Morro por estaciones del	
año.....	41
<b>11. Diagrama de dispersión y regresión lineal por ventanas</b>	
direccionales de Harvest Buoy contra Punta Banda.....	44
<b>12. Diagrama de dispersión y regresión lineal por ventanas</b>	
direccionales de Harvest Buoy contra Punta Morro.....	45

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando uno observa el mar, se encuentra con infinitos movimientos irregulares que van y vienen, crecen y decrecen. Estos alternantes movimientos de masas de agua, que se pueden expresar de forma científica, como ondas gravitatorias, son la principal consecuencia de una tormenta, la acción del viento y consecuentemente la causa de la deformación de la línea costera.

El entendimiento del fenómeno de oleaje y su medición adquirió un gran interés desde mediados del siglo antepasado, cuando se inició el desarrollo a fondo de diversas teorías formuladas por grandes científicos del siglo XIX, tales como la teoría lineal de Airy (1884), la cual a través de algunas suposiciones, linealiza la ecuaciones de movimiento que explican el oleaje; por otro lado, la teoría de Stokes (1845), que permite obtener soluciones de segundo, tercer y cuarto grado. Estas dos teorías dan la pauta para describir y estudiar en forma analítica el oleaje (Arx, 1967).

Existen diversas razones por las cuales es de gran importancia el estudio del oleaje como las interacciones dinámicas del océano y la costa, el diseño y operación de embarcaciones, la planeación de rutas marítimas, el diseño ingenieril de puertos y muelles así como el diseño de protección costera, la pesca comercial y recreacional. El estudio del oleaje y su relación con algunas de las actividades mencionadas son

realizadas por las agencias federales, los gobiernos locales y de estado y las entidades publicas y de industria (Baer, 1980).

Los fenómenos ambientales esporádicos de gran magnitud, como los eventos de tormentas y huracanes, proporcionan un aumento en la energía del oleaje, ocasionando en situaciones extremas desastres en la costa, dejando pérdidas de gran magnitud económica. Con la excepción de la industria petrolera, algunos comercios –como hoteles y zonas turísticas- se niegan a coleccionar información de oleaje a largo plazo, con la cual se podría predecir la influencia de las tormentas y huracanes en el oleaje, por lo que debería ser una obligación de las agencias gubernamentales almacenar y proporcionar esta información de oleaje (Borgman, 1982).

Existen diversas categorías en las cuales se pueden integrar las diferentes aplicaciones de los datos de oleaje, tales como la ingeniería costera y oceánica, las operaciones de mar profundo (explotación de recursos marinos), los proyectos de erosión costera (reconstrucción de playas), la mitigación de problemas costeros (tormentas y huracanes), la calidad ambiental y la energía de oleaje (Baer, 1980).

Anualmente la industria ingenieril podría ahorrar de 100 millones a 1 billón de dólares en la construcción de infraestructura costera con la correcta adquisición de datos de oleaje. Además de garantizar la seguridad de espacios comerciales y recreativos (Baer, 1980).

La tabla I ofrece un pequeño resumen acerca de un estudio realizado por parte de la Nacional Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en 1977, donde remarca el ahorro anual que puede tener la construcción costera cuando se utilizan datos de oleaje confiables.

**Tabla I.** Ahorro anual en la construcción ingenieril cuando se utilizan datos de oleaje confiables. (Tomado de NOAA, survey 1977).

<b>Actividad y/o Estructura</b>	<b>Ahorro (millones de dólares)</b>
Operaciones Marinas	10
Rompeolas	10-20
Prevención de la Erosión Costera	20
Conductos submarinos	20
Otras estructuras de protección costera	20-30
<b>Total</b>	<b>80-100</b>

Un año después, durante el Simposium de Climatología de Oleaje llevado a cabo en la ciudad de Nueva York en 1978, se estimó el ahorro anual en un billón de dólares con la planificación de estructuras costeras a partir de datos de oleaje de alta calidad (Baer, 1980). Algún día el gobierno de la nación debería decidir gastar unos cuantos millones de dólares con el interés de ahorrar de 50 a 100 veces más.

Los datos necesarios que se deben adquirir a partir de la medición de oleaje dependen directamente de su aplicación dentro de las actividades que se realizan a corto y largo plazo, ya sea dentro o fuera de la costa (mar profundo). La tabla II relaciona los datos necesarios de oleaje con las actividades realizadas constantemente en el ambiente marino.

**Tabla II.** Propósitos y actividades que requieren de la adquisición de datos de oleaje. (Tomado de NOAA, survey 1977).

<b>Actividades</b>	<b>Aplicaciones del registro de oleaje</b>	<b>Datos Necesarios</b>
Criterio para la construcción ingenieril	Estructuras de protección, puertos, conductos submarinos y arquitectura naval	Espectro direccional Análisis estadísticos de oleaje en evento extremos. Propiedades no lineales
Planeamiento pre-operacional	Rutas de Navegación	Predicciones a corto y largo plazo, estadísticas geográficas.
Decisiones operacionales	Seguridad y eficiencia	Predicciones de altura significativa, dirección y periodo

Ya que el oleaje es un fenómeno físico aleatorio, es decir, que nunca se repite en tiempo y espacio, su estudio resulta muy complejo. Aunque esto suceda, una forma de aproximarse a la descripción de su comportamiento es utilizando métodos estadísticos con los cuales -aplicados a la información de oleaje- se puedan interpretar las características principales de este fenómeno. La eficiencia de los resultados estadísticos dependerá de manera proporcional a la cantidad de datos existentes, ya que con mayor cantidad de datos incluidos en la información del oleaje, los resultados obtenidos por los análisis estadísticos serán más apegados a la realidad. Es por esto que la obtención de información de oleaje a largo plazo se ha convertido en materia de suma importancia en países desarrollados como Estados Unidos, Canadá y otros países de Europa.

### **1.1 Extrapolación de Datos**

Mientras que para otros países la obtención de datos de oleaje se está convirtiendo en una costumbre (Takahashi y Soejima, 1974, Seymour *et al.*, 1985), en México no se han establecido programas para la obtención de datos oleaje a largo plazo, resultando difícil establecer la protección costera adecuada para prevenir la pérdida de estructuras dentro y fuera de la costa. La necesidad de la obtención de datos de oleaje es particularmente crítica para la costa noroeste de Baja California, donde la erosión de playas y la destrucción parcial y/o total de estructuras marítimas se han presentado (Lizarraga-Arciniega *et al.*, 2001).

Una ventaja de la costa noroeste de Baja California, y en particular de la Bahía de Todos Santos, es su cercanía a la costa suroeste de Estados Unidos, donde por más de veinte años se ha medido el oleaje que arriba a dicha costa. Esta actividad motiva por un lado establecer programas similares que consideren la medición a largo plazo del oleaje que arriba a nuestras costas, pero también que se investigue la posibilidad de extrapolar las mediciones de oleaje realizadas en la costa oeste de Estados Unidos a diferentes lugares a lo largo de la costa noroeste de Baja California.

### **1.2 Justificación del proyecto:**

Este trabajo pretende describir las características estadísticas de oleaje a partir de las mediciones de oleaje realizadas del 1<sup>ro</sup> de Diciembre del 2001 al 31 de Noviembre del 2002 en dos localidades de la Bahía de Todos Santos, así como investigar la posibilidad de extrapolar la información de oleaje medida en una estación de aguas profundas al sur del estado de California hacia el interior de la Bahía de Todos Santos.

Debido a que México no cuenta con una política adecuada para la obtención de datos de oleaje a corto y largo plazo (aún cuando el análisis de mediciones de oleaje por periodos cortos es importante), y tomando en cuenta la cercanía de la Bahía de Todos Santos (BTS), Baja California, a algunas de las estaciones de medición de oleaje del programa CDIP (Coastal Data Information Program; <http://cdip.ucsd.edu>), que se desarrolla a lo largo de la costa oeste de Estados Unidos, resulta conveniente investigar

la posibilidad de extrapolar la información medida por el CDIP para inferir las características del oleaje dentro de la BTS.

## **2. OBJETIVOS**

**2.1** Describir las características estadísticas del oleaje medido en dos localidades dentro de la BTS del 1<sup>ro</sup> de Diciembre del 2001 al 31 de Noviembre del 2002

**2.2** Extrapolar la altura significativa ( $H_s$ ) medida en aguas profundas en Punta Arguello, California, hacia aguas someras dentro de la Bahía de Todos Santos, Baja California.

### 3. ANTECEDENTES

Como se mencionó anteriormente, debido a la política actual y a la limitación tecnológica en México, no se ha establecido una continuidad de programas para la medición constante de oleaje a corto y largo plazo, por lo que los trabajos relacionados a la medición de oleaje en la costa noroeste de Baja California se encuentran un tanto limitados. Dentro de los cuales destacan:

Flick (1994) afirma que debido al gran tamaño del océano Pacífico, las tormentas tienen suficiente espacio de contacto o *fetch*, para generar olas altas y de gran longitud provocando la existencia constante del *swell*, y que la parte oeste de la Península de Baja California tiene una climatología de oleaje muy complicada debido a la reflexión, refracción, difracción y disipación de las olas incidentes ocasionada por la presencia de islas, bancos someros de arena, cañones submarinos y una batimetría compleja.

Oropeza-Rosales (1998) realizó un estudio estadístico del oleaje en la costa de Rosarito, Baja California de 1984 a 1988, en el cual concluyó que el comportamiento del oleaje del Pacífico mexicano está considerado como bimodal estacional, presentando dos regímenes: primavera-verano y otoño-invierno y que la sucesión entre estos dos regímenes en el tiempo no es simétrica, teniendo un cambio suave del patrón primavera-verano a otoño invierno y un cambio abrupto de la manera contraria.

Rivas-Cáceres (1992), realizó una clasificación general de alturas de oleaje que se aproxima a la costa oeste de B.C. Considera al oleaje de altura baja a aquel que llega hasta los 0.5 m; oleaje medio a olas entre 0.5m y 2.5m y oleaje extremo, a las olas con alturas mayores de 2.5 m, en condiciones de tormenta de invierno, alcanzando en momentos extremos los 7 m de altura.

Torres-Navarrete (1986) a partir de una distribución conjunta de alturas y periodos para la Bahía de Todos Santos, indicó que la situación más persistente durante su periodo de medición, fueron olas locales (periodos entre 6-9 s) y olas producidas por tormentas lejanas (periodos entre 21-24 s) cuyas alturas estuvieron entre 20 y 40 cm.

Martínez-Díaz-de-León *et, al.* (1987), destaca que la altura significativa dentro de la Bahía de Todos Santos tiene un comportamiento estacional, con un valor máximo de altura de 2.1 m para invierno y 0.41 m para verano, remarcando que se debe dar más importancia a estudios de la estadística del oleaje para un periodo de tiempo más amplio.

Raciél-de-Dios-Sanchez (2002), reconstruyó la climatología de altura significativa de oleaje frente a la costa Pacífico de Baja California a partir de datos del altímetro a bordo del satélite europeo ERS-2, y concluyó que las alturas del oleaje presentan una marcada variabilidad espacial y temporal a lo largo de la península de Baja California, en donde consistentemente se observa que las olas más altas se presentan durante la época de invierno y al noroeste de la península y las más chicas durante el verano y al sur de la

península. También afirmó que las épocas de primavera y otoño pueden ser consideradas como épocas de transición, presentando valores intermedios de altura de oleaje entre los valores extremos observados durante las épocas de verano e invierno, respectivamente.

Con el propósito de estimar el campo de oleaje dentro de la Bahía Todos Santos, Baja California, Perelló-Reina (2002) adaptó el modelo numérico de tercera generación para aguas someras SWAN (Simulating WAVes Nearshore) con datos de entrada obtenidos de la plataforma en *Harvest Buoy* comparando con datos obtenidos por medición *in situ*, dentro de la Bahía. La validación del modelo se realizó con correlaciones y pruebas de hipótesis entre los datos obtenidos con el modelo y los reportados por los aparatos dentro de la Bahía de Todos Santos, comparando medias de altura significativa, periodo y dirección ( $H_s$ ,  $T$  y  $\theta$ ). Concluyó que el modelo funciona bien para el periodo y la altura significativa a lo largo de la Bahía, con refracción del oleaje entrante y con generación de oleaje dentro de la misma. Afirmó que las condiciones de oleaje dentro de la Bahía son consecuencia y están estrechamente ligadas a las condiciones del oleaje fuera de ella (*Harvest Buoy*).

Cerca-Martínez (1995), utilizó 10 años de información generados por una boya oceanográfica instalada en *Mision Bay*, California, (U.S. Army Corps of Engineers), para extrapolar los datos a la playa de Rosarito B.C. concluyendo que el oleaje de la zona presenta un comportamiento marcadamente estacional, correspondiendo los

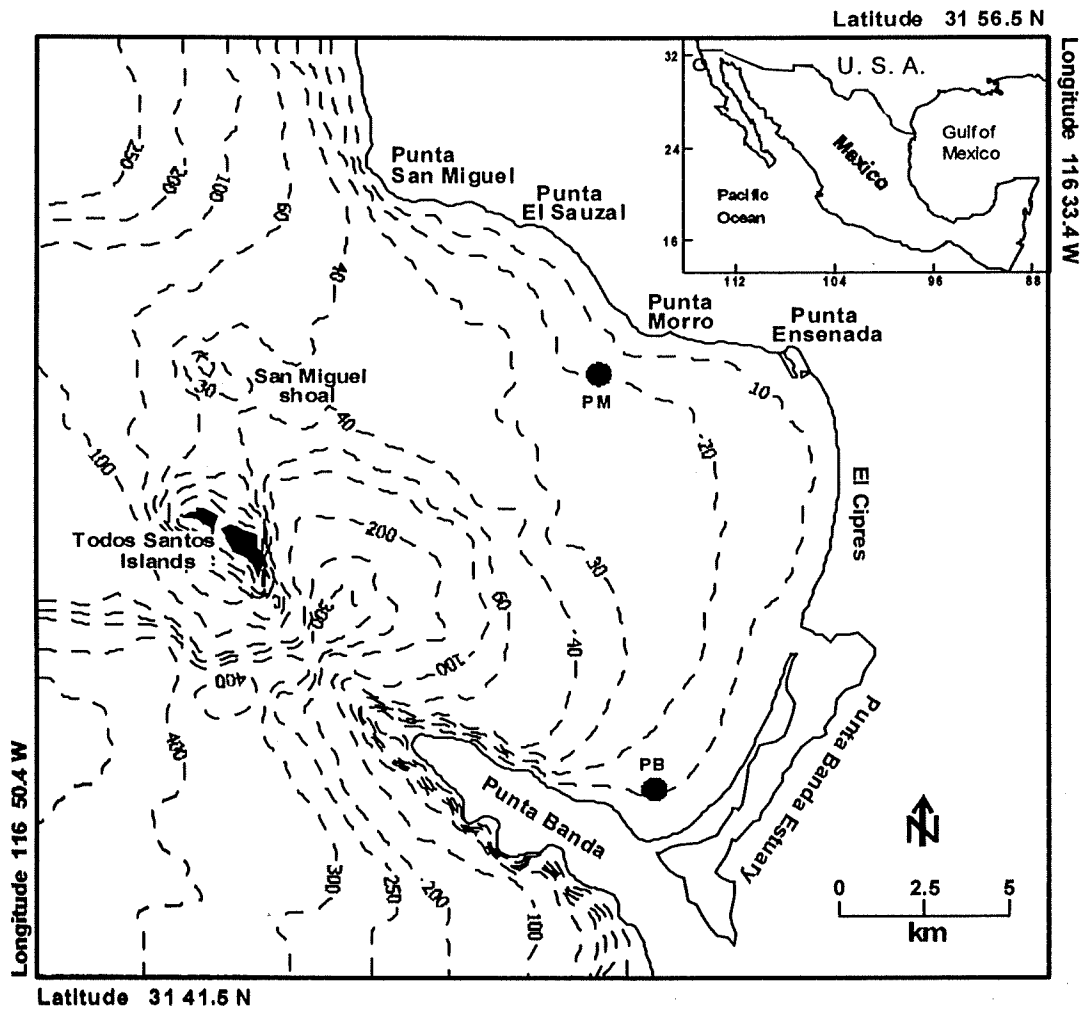
mayores valores de altura y período a los meses de invierno (diciembre-febrero), mientras que en verano (junio-agosto) se presentan condiciones de calma.

Martínez-Díaz-de-León (2002), utilizó los datos de HB para representar las condiciones del oleaje en la BTS para el periodo de invierno del 2001-2002; afirma que la variabilidad espacial de la altura dentro de la Bahía es inducida por una combinación de efectos, estos son: efecto de someramiento y convergencia de energía causada por la refracción del oleaje al momento de su entrada a la Bahía y también por la presencia de la Isla de Todos Santos. Determinó que existe una alta correlación en variabilidad temporal de Hs entre HB y todos los puntos dentro de la BTS. Este trabajo forma la base más estable para el proyecto en cuestión, por lo que servirá de guía durante el procesamiento de la información adquirida.

#### 4. ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Todos Santos se encuentra entre los 31° 40' y 31° 56' de latitud norte y los 116° 36' y 116° 50 de longitud oeste (figura 2), tiene una estructura trapezoidal formada por los límites de la Bahía y consta de un área aproximada de 24,090 ha. Los rasgos geográficos más importantes de la Bahía de norte a sur son: Punta San Miguel, Punta Morro, El Ciprés, Estero de Punta Banda y Punta Banda.

El origen de la Bahía es tectónico, debido a la falla de Agua Blanca, la cual generó la “península” de Punta Banda y el Estero. En el área comprendida entre Punta San Miguel y el Sauzal de Rodríguez encontramos afloramientos de rocas sedimentarias, así como terrazas de abrasión de origen marino. La zona comprendida entre el Sauzal de Rodríguez y poco antes de Punta Morro se encuentra el mismo tipo de afloramiento con la presencia de cantiles compuestos en mayor porcentaje de roca sedimentaria, además de la presencia de playas angostas de cantos rodados. De Punta Morro hasta Ensenada, la costa esta constituida por cantiles de roca ígnea extrusiva (Basalto y Andesita principalmente). La costa este de la Bahía la constituye una playa de arena de 14 km de longitud (desde el arroyo Ensenada hasta la boca del Estero de Punta B anda). Al sur encontramos el Estero de Punta Banda, limitado por una barra arenosa de 7 km de longitud y el valle de Maneadero.



**Fig. 1.** Localización geográfica de la Bahía de Todos Santos, Ensenada, B C. y sus rasgos geográficos más importantes.

Punta Banda, que forma la parte final de la Bahía, esta conformada por un cordón montañoso de rocas volcánicas, las cuales forman altos cantiles casi verticales, interrumpidos por pequeñas playas de bolsillo de cantos rodados.

Las estructuras batimétricas más notables son el bajo de San Miguel con una profundidad de 6 m, la isla de Todos Santos y el cañón submarino localizado entre Punta Banda y la isla, con una profundidad máxima de 550m. La presencia de la isla de Todos Santos establece dos ventanas principales a la aproximación del oleaje de aguas profundas, entre Punta Banda y la isla y entre San Miguel y la isla, siendo esta última la entrada más importante de oleaje de *swell* de invierno. Este *swell* invernal proviene del Pacífico Noroeste y es producto de los vientos provocados por los frentes fríos que se presentan periódicamente en California y Baja California (Seymour, 1996).

## **5. METODOLOGÍA**

La calidad de los datos de oleaje depende de diversos factores, tales como la naturaleza de los aparatos de medición (resolución, precisión, etc.) y el procesamiento adecuado de los datos. Algunas de las características de los instrumentos se describen más adelante.

### **5.1 Aparatos de Medición**

Se realizaron mediciones de oleaje en aguas someras en 2 localidades dentro de la Bahía de Todos Santos, identificadas como Punta Banda (PB) y Punta Morro (PM). La localización geográfica de los instrumentos es  $31^{\circ} 45.18' N$ ,  $116^{\circ} 43.02' W$  y  $31^{\circ} 51.46' N$ ,  $116^{\circ} 40.36' W$  respectivamente. La figura 1 ilustra la posición de los aparatos oceanográficos; como se puede observar, el aparato de medición en PB operó a una profundidad promedio de 10 m y en PM en una zona de los 20 m de profundidad.

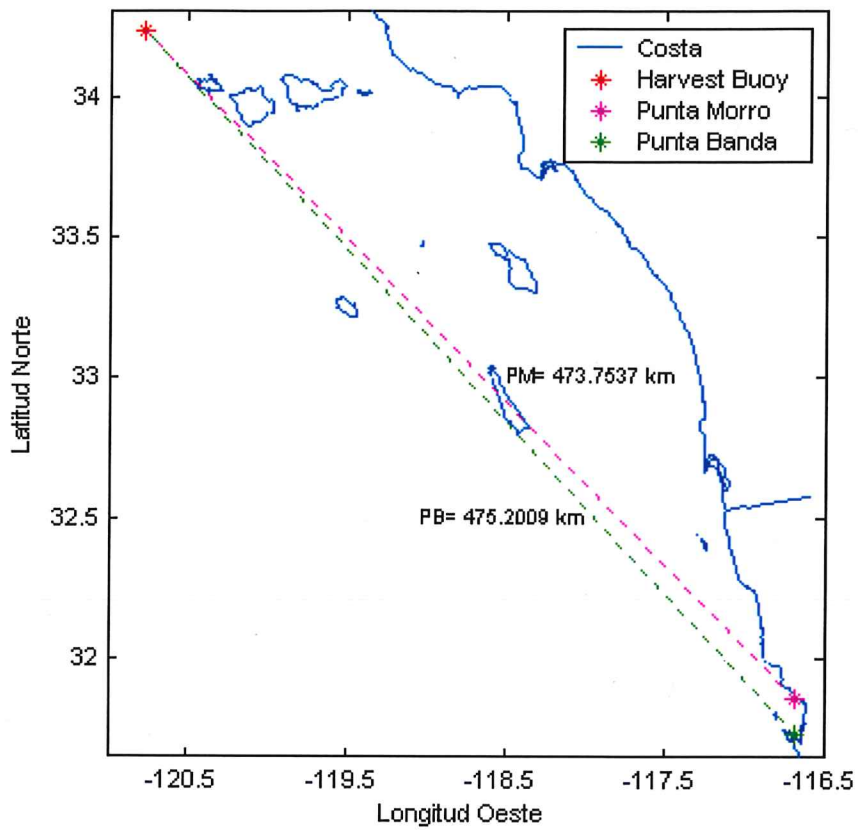
El instrumento localizado en PB empezó a operar en 29 de Noviembre del 2001 y la boya en PM se instaló el 6 de Diciembre del 2001, pero por fallas de instrumentación (falta de batería), dejaron de operar el 16 de Agosto del 2002 y el 26 de Diciembre del 2001 respectivamente y fueron reinstaladas hasta el 9 de Septiembre y 19 de Enero del 2002 respectivamente.

Como parte de los objetivos de este trabajo se consideró la posibilidad de extrapolar al interior de la BTS información de oleaje medida en aguas profundas, por lo que

también se analizó la información de oleaje medida en la estación denominada como *Harvest Buoy* (HB, No. ID. 071), la estación de aguas profundas más cercana a la BTS (figura 2), la cual es localizada aproximadamente a 14 km fuera de la costa de Punto Arguello al sur de California, entre los  $34^{\circ} 13.9' N$  y los  $120^{\circ} 46.8' W$ . Las series de tiempo de Hs, Tp y  $\theta$  se descargaron de la página correspondiente al programa de información de datos costeros CDIP, (<http://cdip.ucsd.edu>). CDIP es operada por el Grupo de Investigación de Ingeniería Oceánica del Centro de estudios Costeros en el Instituto de Oceanografía en Scripps, San Diego, California.

## **5.2 Base de Datos**

En general la base de datos analizada en este trabajo consta de un total de 43123 datos de oleaje, de los cuales 8745 corresponden a la estación PB, 17254 a PM y 17124 a HB. La diferencia en el número de datos entre instrumentos se debe a que no fueron instalados en el mismo momento, además de que en PB el instrumento estaba programado para adquirir datos cada hora. Es importante mencionar que existen lapsos de tiempo durante los cuales no hay datos debido a que se presentaron problemas de funcionamiento por parte de la batería del instrumento. Dentro de la sección de resultados se dan más detalles de las fechas y los porcentajes correspondientes a la falta de datos.



**Fig. 2.** Localización de HB con respecto a la Bahía de Todos Santos y distancia correspondiente a PB y PM.

### 5.3 Análisis Estadístico:

Para visualizar las posibles diferencias entre el comportamiento del oleaje en función del tiempo en cada una de las estaciones de medición, se plantearon dos situaciones de análisis: análisis anual y análisis estacional, es decir, el análisis en conjunto de todos los datos adquiridos y el análisis de los datos correspondientes a cada una de las estaciones del año.

Los meses que se consideraron para definir cada una de las estaciones del año se muestran en la tabla III.

**Tabla III.** Meses considerados para definir las diferentes estaciones del año.

<b>Estación</b>	<b>Meses considerados</b>
Primavera	Marzo-Mayo
Verano	Junio-Agosto
Otoño	Septiembre-Noviembre
Invierno	Diciembre-Febrero

El tratamiento de los datos se llevó a cabo de forma estadística, analizando los diferentes parámetros del oleaje como la altura significativa (Hs) y el periodo (T) de los tres instrumentos de medición. La dirección de aproximación del oleaje solo se analizó

a partir de la información proporcionada por la estación HB ya que esta es la única estación donde se midió dicha variable.

En todos los casos se realizaron gráficas en el dominio del tiempo para Hs y T, con el propósito de observar la calidad de los datos y obtener una apreciación visual de la similitud entre el comportamiento de las variables consideradas entre las diferentes estaciones de medición.

Una herramienta estadística para conocer los porcentajes de ocurrencia de nuestras variables físicas, Hs, T y  $\theta$ , es el histograma, ya que se puede visualizar con facilidad la moda y el tipo de distribución de los datos (unimodal o bimodal). En este trabajo se realizaron histogramas de la información anual y estacional de cada una de las estaciones de medición. Debido a que la magnitud de las alturas dentro y fuera de la Bahía resultó ser muy diferente, no fue posible utilizar un intervalo de clase similar en la generación de los histogramas de Hs, por lo que se consideró un intervalo de clase de 0.25 m para HB y de 0.1 m para PB y PM. En el caso del periodo, se consideró 1 s como intervalo de clase para todos los histogramas.

Aunque los instrumentos dentro de la Bahía no resuelven la dirección de aproximación del oleaje, es posible obtener información aproximada de la dirección de arribo del oleaje a la Bahía considerando la información proporcionada por la estación HB, por lo que se realizaron también histogramas de dirección de aproximación del

oleaje en forma de rosa de oleaje para todo el año y por estación del año de la información de  $\theta$  en HB.

#### **5.4 Extrapolación de información de aguas profundas al interior de la BTS**

Para investigar un posible método de extrapolación de datos obtenidos en aguas profundas (CDIP) hacia aguas someras dentro de la BTS, se realizaron correlaciones lineales de la altura significativa entre HB y los dos instrumentos localizados dentro de la Bahía. Para realizar estas correlaciones, se ajustó la base de datos de forma que el número de datos entre los instrumentos de medición fueran los mismos, es decir, el mismo número de renglones para cada columna correspondiente a su variable (Hs y T).

Para el caso de la correlación entre HB y PB, se consideraron solamente los datos obtenidos en un intervalo de tiempo de una hora, debido a que el instrumento localizado en PB registró datos con ese intervalo. Posteriormente se eliminaron los renglones correspondientes a las fechas en donde no hubo registro de datos debido a la falla de la batería de los instrumentos localizados en PB y PM.

Las correlaciones se llevaron a cabo utilizando el método de los mínimos cuadrados, obteniendo una recta de regresión que funcione como modelo para inferir los valores de la altura significativa dentro de la BTS. La línea recta se obtuvo ajustando la ordenada al origen en cero. La pendiente obtenida de cada correlación es el factor de corrección que se propone utilizar para la extrapolación de la altura significativa de aguas profundas

hacia el interior de la Bahía. Como una medida de la bondad de la extrapolación se utilizó el coeficiente de correlación ( $r^2$ ).

Para investigar el efecto que pudieran tener las diferentes direcciones de aproximación del oleaje a la Bahía, en el análisis de regresión lineal, y en consecuencia en la calidad de los datos de la extrapolación, se realizaron correlaciones lineales por diferentes ventanas direccionales. Las ventanas direccionales se seleccionaron con intervalos de  $30^\circ$  a partir de los  $360^\circ$  (Norte franco) hasta los  $180^\circ$  (Sur franco). De esta forma se pueden identificar condiciones que dependen de la dirección del oleaje y así realizar extrapolaciones de mayor precisión, ya que, como se comenta más adelante, el oleaje proveniente del sur y suroeste llega primero a los instrumentos localizados dentro de la BTS que a la estación HB.

Como se observa en la figura 1, las estaciones de medición PB y PM se encuentran expuestas al oleaje con diferentes direcciones de aproximación. A la estación de PB se le pueden asociar hipotéticamente direcciones provenientes del noroeste y oeste donde los datos de oleaje posiblemente tengan una mejor correlación con los obtenidos por HB, a diferencia de direcciones provenientes de sur o suroeste, mientras que a la estación de PM se le pueden asociar direcciones provenientes del oeste y suroeste. Más adelante en la sección de resultados se verifican estas asociaciones.

Como parte fundamental de la estadística y complemento de este trabajo, se calcularon estadísticas generales tales como promedios, desviación estándar y se identificaron los valores extremos de  $H_s$ ,  $T$  y  $\theta$  por estaciones del año y por año, esto con el fin de comparar los máximos y mínimos, así como el de agrupar las características más sobresalientes de la totalidad de los datos, a partir de la cuales se pueden realizar diversos estudios, tales como los utilizados para la construcción de estructuras costeras.

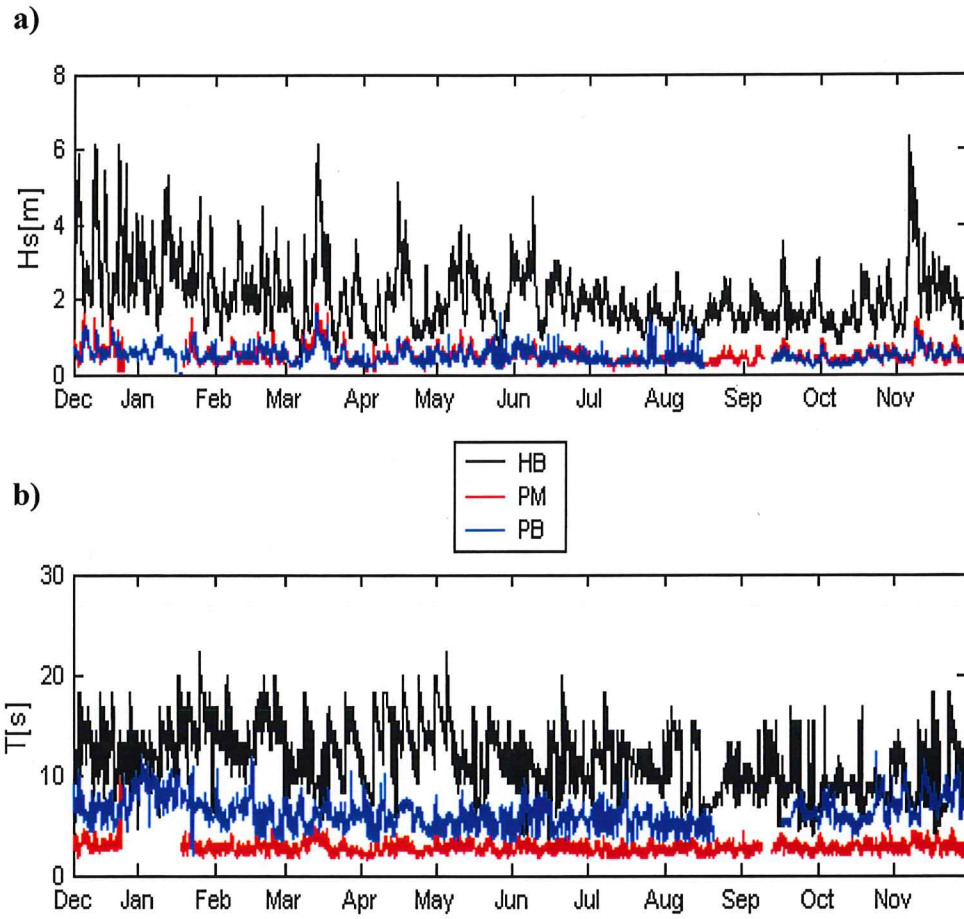
## **6. RESULTADOS**

### **6.1 Variación temporal**

Con la finalidad de visualizar y comparar la variación temporal del oleaje durante todo el periodo de medición (1<sup>ro</sup> de Diciembre del 2001 al 30 de Noviembre del 2002), se graficaron en función del tiempo la altura significativa y el periodo (figura 3) para las tres estaciones de medición (HB en negro, PB en azul y PM en rojo). La dirección no se considera en estas series de tiempo ya que HB fue el único instrumento que la midió. Los espacios en blanco observados representan los intervalos de tiempo en los cuales no se obtuvo información. Estos intervalos comprenden del 26 de Diciembre del 2001 al 19 de Enero del 2002 para PM y del 16 de Agosto al 9 de Septiembre del 2002 para PB, representando un 9.8% y un 10.1 % de la totalidad de los datos respectivamente.

Con respecto a la variación temporal de Hs (figura 3) se puede ver como las líneas correspondientes a los puntos dentro de la BTS (PB y PM), tienen una gran similitud cualitativa con el comportamiento de la altura de aguas profundas (HB), es decir, en donde se presentan los picos principales –generalmente en invierno- en HB, también se observan los picos -en menor escala- en las graficas de PB y PM.

En general las alturas variaron entre 0.5 y 6.3 m para HB, entre 0.1 y 2.1 m para PB y finalmente entre 0.1 y 1.9 para PM.



**Fig. 3.** Variación temporal de la altura significativa (arriba) y periodo (abajo), para todo el año de medición considerado en este trabajo.

A diferencia del comportamiento de la variación temporal de las alturas, el periodo (figura 3b) presentó un comportamiento más uniforme a lo largo del año, con valores entre 3.6 y 22.2 s para HB, 2.1 y 12.7 s para PB y por último, 1.6 y 9.9 s para PM. Aunque la teoría lineal del oleaje considera que el periodo es conservativo se pueden observar diferencias de periodo entre los tres aparatos de medición; la diferencia entre estos valores se atribuye a que los instrumentos midieron diferentes tipos de periodo, periodo promedio del pico espectral en HB ( $T_p$ ), periodo de cruces por cero en PB ( $T_z$ ) y periodo promedio de crestas en PM ( $T_c$ ). Por esta razón no se consideró al periodo dentro del análisis de extrapolación. Para evitar confusión, en cualquier instrumento de medición, se indica el periodo como T.

## **6.2 Porcentaje de Ocurrencia de Hs y T**

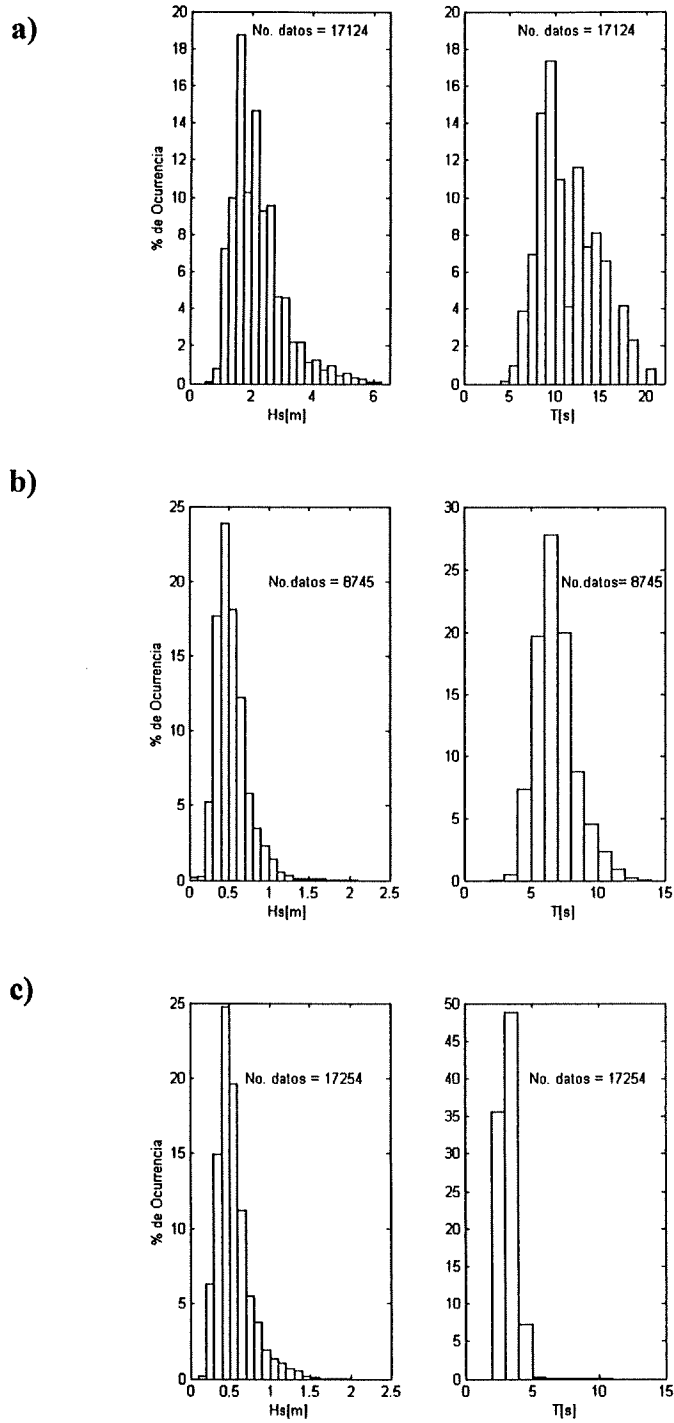
Como se mencionó anteriormente, para cada estación del año y por año para cada variable (Hs y T) se realizaron histogramas de frecuencia de ocurrencia (figuras de 4 a 8). Los intervalos de clase utilizados para la altura significativa son de 0.25 m para HB y 0.1 m para PB y PM ya que las alturas en HB son mucho mayores que en PB y PM y de esta forma se pueden visualizar mejor los resultados. En todos los casos se consideró un intervalo de clase de 1 s para el periodo. El valor del porcentaje de ocurrencia de todos los histogramas se calculó dividiendo la frecuencia de ocurrencia de cada clase entre el número total de datos y multiplicando el resultado por 100.

### 6.2.1. Análisis anual

El mayor porcentaje de ocurrencia de valores de Hs para HB (figura 4) se concentró entre 1 y 3 m, con poco más del 80% de los datos, el resto de las alturas varió entre los 3 y 6 m, a excepción del 1% de los datos que se presentaron con valores por debajo de 1 m de altura. El mayor porcentaje de ocurrencia por clase, se presentó para olas de 1.75 a 2 m, representando el 19% de la totalidad de los datos, seguido por olas de 2.25 a 2.5 m con poco más del 14 %.

Con respecto al periodo en HB, se observó muy poco porcentaje de ocurrencia por debajo de los 6 s. El mayor porcentaje de ocurrencia se concentró para periodos entre los 8 y 16 s. Sin embargo, si consideramos las condiciones del periodo de *swell* ( $T > 10s$ ) se observó casi un 60% de ocurrencia para periodos mayores a 10 s, lo que podría estar indicando que durante la época de medición el oleaje medido correspondió en su mayoría a oleaje del tipo *swell*.

El mayor porcentaje de ocurrencia de Hs en la estación de Punta Banda (figura 4b) se concentró entre 0.3 y 0.8 m con poco más del 50 % de los datos. El porcentaje de ocurrencia disminuye considerablemente para alturas mayores a 1 m.



**Fig. 4.** Histogramas de altura significativa ( $H_s$ ) y periodos ( $T$ ) correspondientes a todo el año de medición para los instrumentos: a) HB, b) PB y c) PM.

Las alturas con mayor porcentaje de ocurrencia fueron de 0.4 a 0.5 m con casi el 25% de la totalidad de los datos, de manera que este histograma se puede considerar unimodal con una forma que pudiera ser representada por una función de distribución de probabilidad teórica de tipo Rayleigh.

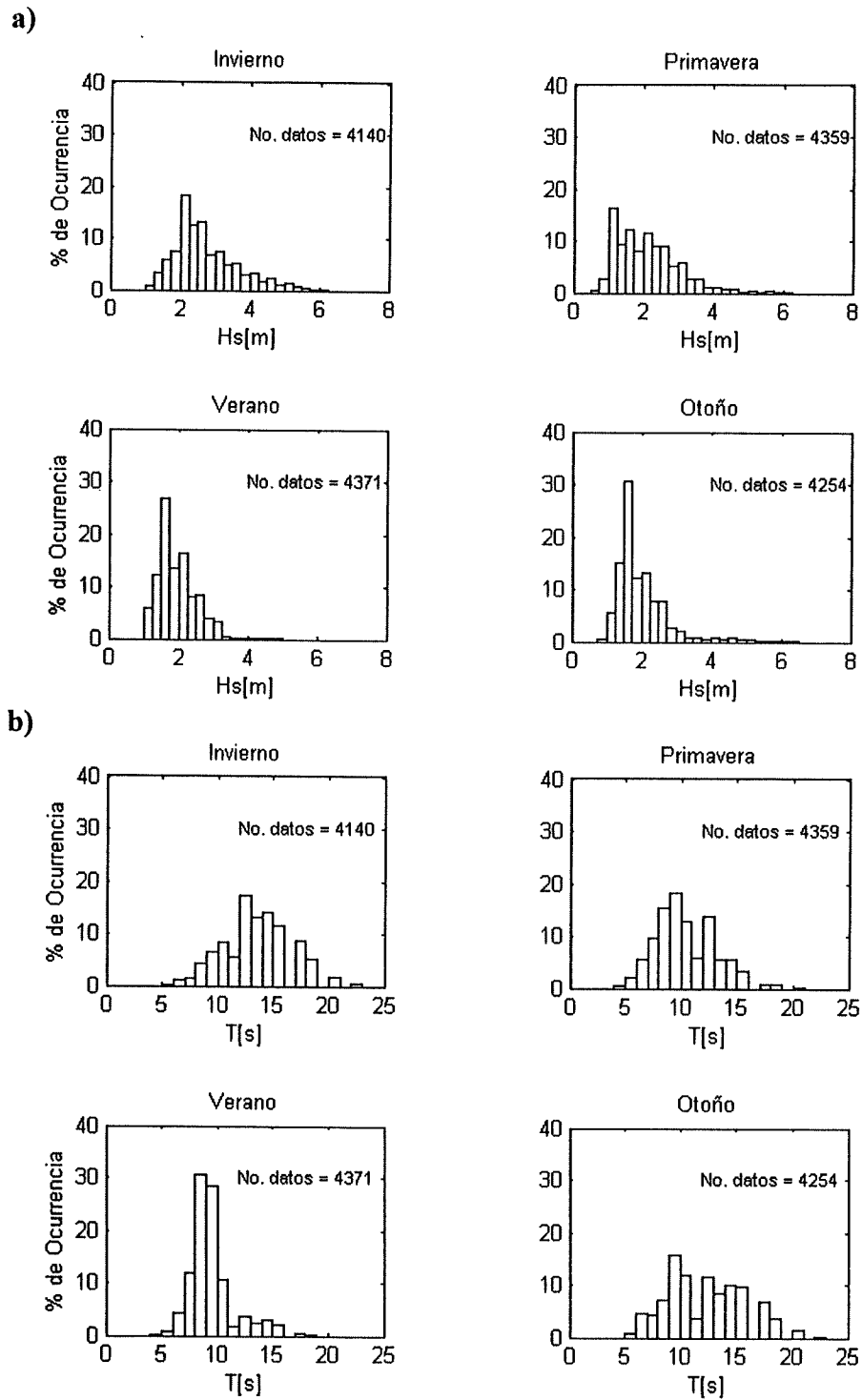
Los periodos que se presentaron con mayor frecuencia de ocurrencia se encontraron entre los 6 y 8 s, representando casi un 70 % del total de datos.

En Punta Morro, el porcentaje de ocurrencia de Hs (figura 4c) se concentró en su mayoría entre los 0.2 y 0.7 m, presentando valores bajos de 1 a 1.5 m y casi nulos de 1.5 a 2 m. De manera similar a la frecuencia de ocurrencia de alturas en PB, se puede observar que en el caso individual, el mayor porcentaje de ocurrencia en PM fue para alturas entre 0.4 y 0.5 m.

El periodo con mayor porcentaje de ocurrencia en PM lo obtuvo el intervalo de 3 a 4 s, con casi el 50% de la totalidad de los datos.

### **6.2.2. Análisis estacional**

Para el análisis estacional se elaboraron histogramas de frecuencia de ocurrencia de Hs y T (figuras 5-7). En todos los casos la columna “a” se utiliza para los histogramas de Hs y la columna “b” para los de T.

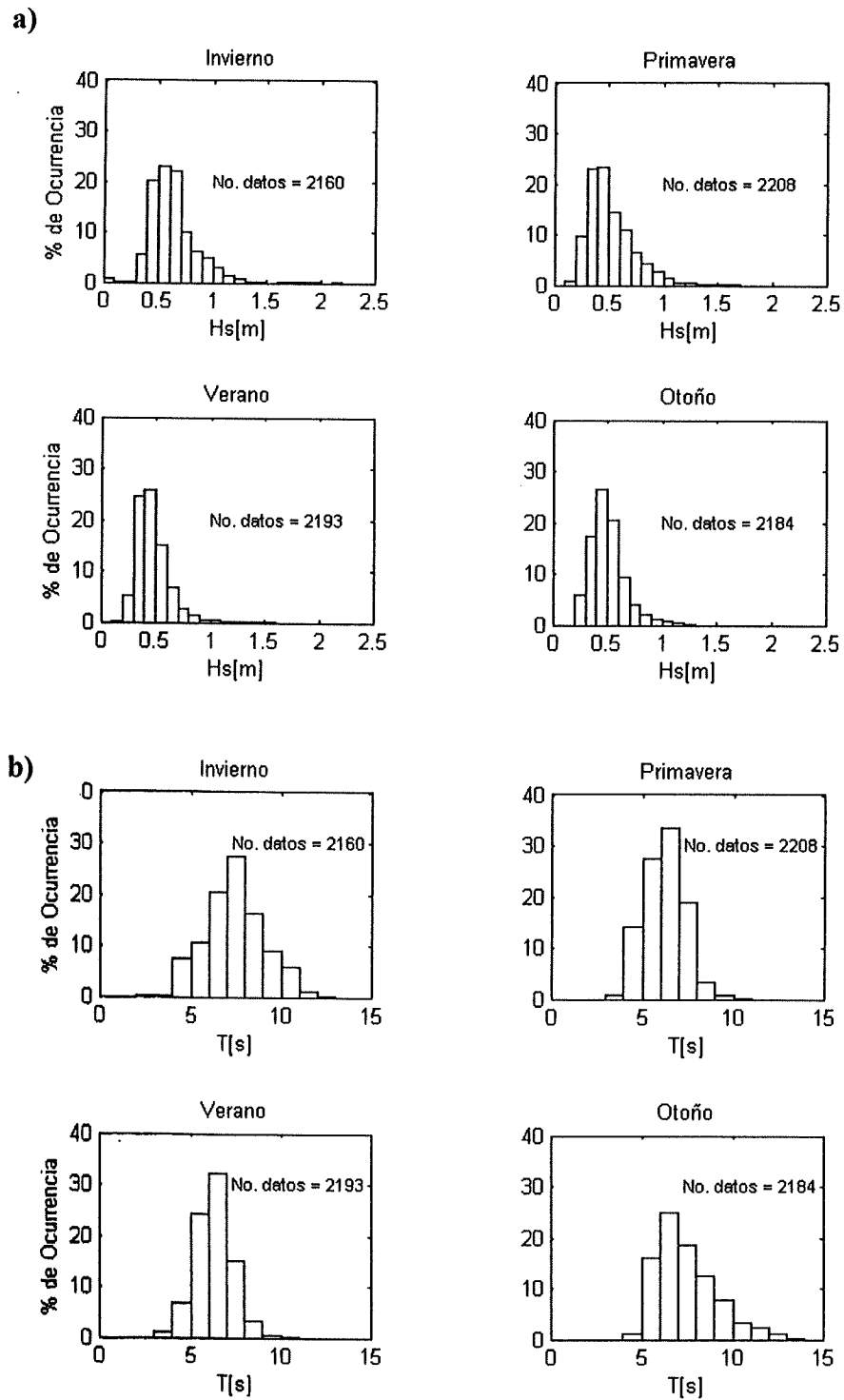


**Fig. 5.** Histogramas de altura significativa (Hs) y periodo (T) por estación del año para *Harvest Buoy*.

Dentro del análisis estacional de la altura significativa para HB (figura 5a), a diferencia de los demás histogramas, invierno fue la estación que concentró el mayor porcentaje de ocurrencia para alturas mayores a los 2 m, con aproximadamente el 70% de los datos correspondientes a esa época, dentro de los cuales el 10 % representan alturas entre los 4 y 5 m y solo un 4 % correspondió a alturas de 5 a 6.1 m. En primavera, se observó la disminución de las alturas significantes, en donde el mayor porcentaje de ocurrencia de alturas significativa fue para el intervalo entre 1 y 3 m, sin embargo, en esta estación se alcanzaron valores de altura significativa de 6.1 m. Posteriormente el histograma de verano muestra una disminución considerable en el porcentaje de ocurrencia de los 2 a los 3 m, y valores casi nulos entre los 3 y los 4 m. No se presentaron valores mayores a los 4.7 m. El histograma de otoño se asemeja al de verano, con la diferencia de que se presentaron alturas significantes entre 4 y 6.3 m, por lo que el otoño puede ser considerado como una época de transición hacia el invierno.

El intervalo que presentan los histogramas de periodo para HB (figura 5b) es de 3.6 a 22.2 s, concentrando el mayor porcentaje de ocurrencia para periodos entre los 5 y los 15 s, con ocurrencias intermitentes entre los 15 y los 22.2 s. En invierno se registraron altos porcentajes de ocurrencia para periodos mayores a 10 s, cuando en verano este porcentaje se desplazó hacia periodos menores.

En PB se observó una variabilidad temporal de Hs (figura 6a) semejante a la de HB pero en menor escala, siendo la época de invierno la que presentó valores más altos, con



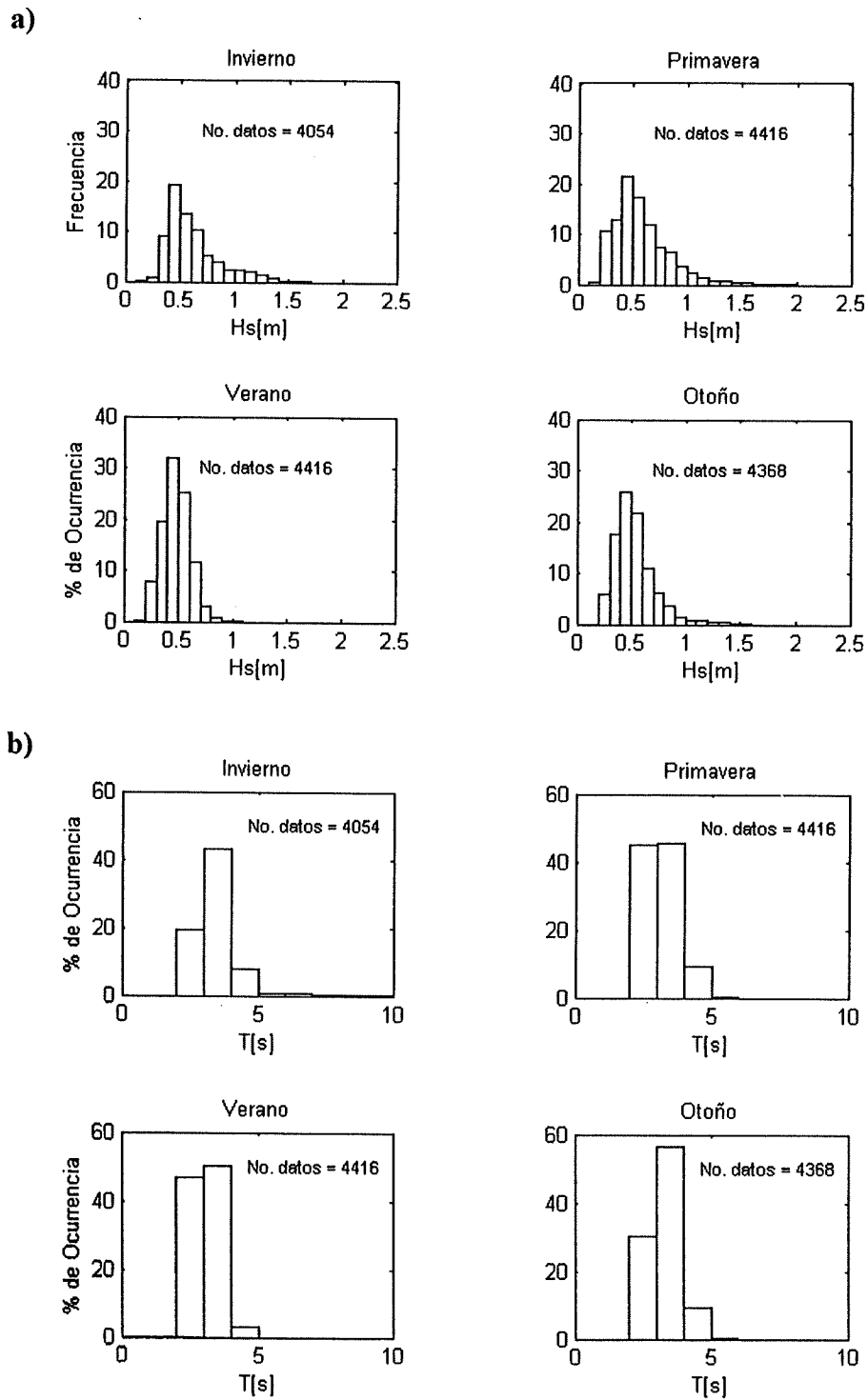
**Fig. 6.** Histogramas de altura significativa ( $H_s$ ) y periodo ( $T$ ) por estación del año para Punta Banda.

un intervalo de 0.1 a 2.1 m. Las demás estaciones del año no presentaron alturas mayores a 2 m. El mayor porcentaje de ocurrencia en las cuatro estaciones del año se concentró entre los 0.4 y 1 m. Por otra parte, el intervalo de periodo que presentó mayor porcentaje de ocurrencia en PB (figura 6b) en las cuatro estaciones del año fue de 6 a 7 s. En otoño e invierno se presentaron los periodos más grandes con valores de 12.1 y 12.7 s respectivamente.

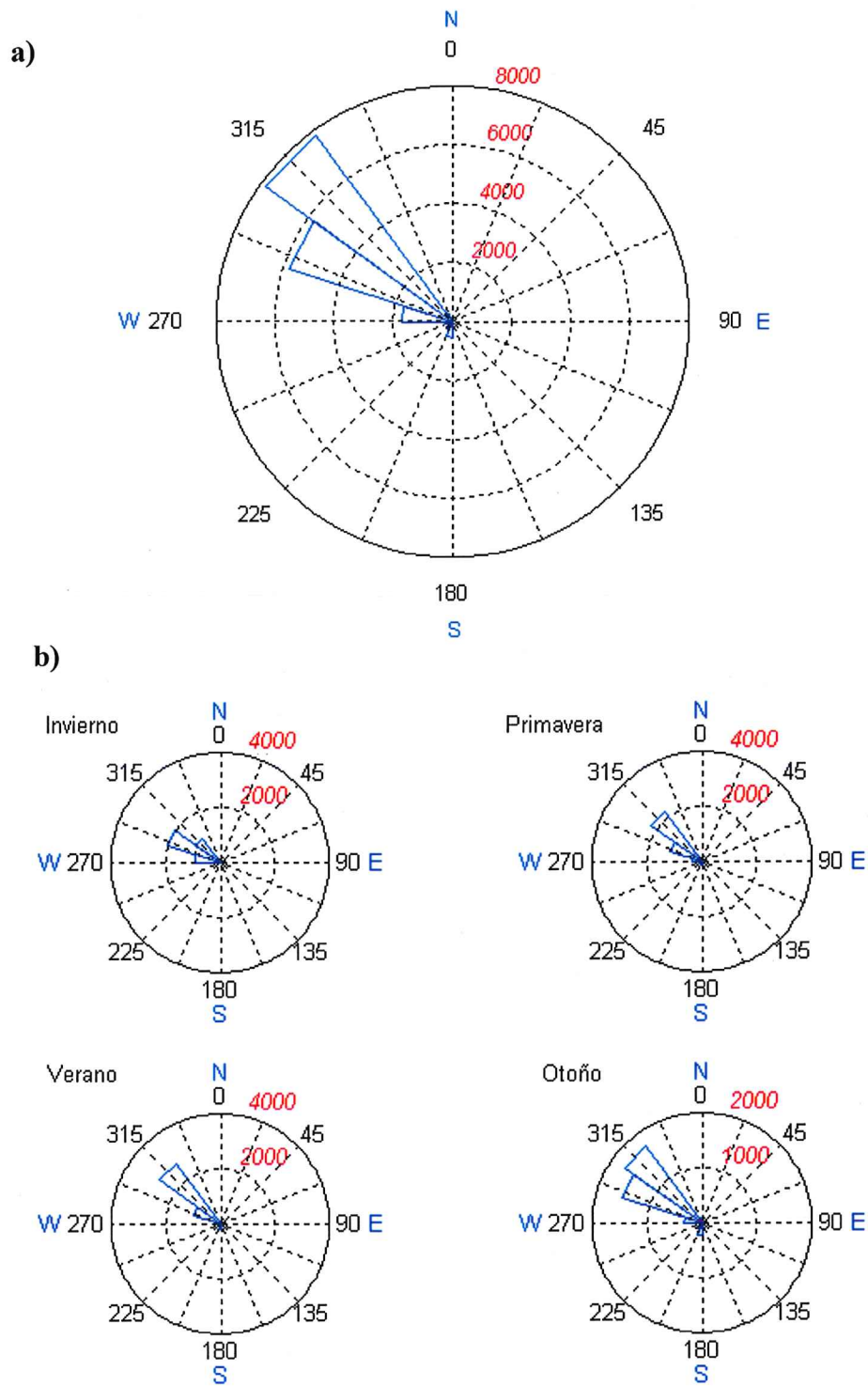
En los histogramas de Hs de PM (figura 7a), el mayor porcentaje de ocurrencia para las 4 estaciones del año se presentó para el intervalo de 0.4 a 0.5 m, en invierno y en primavera se presentaron las olas más altas con valores de 1.6 y 1.9 m respectivamente. A diferencia de las demás estaciones, la época de verano no presentó alturas mayores a 1.5 m y concentró el mayor porcentaje de ocurrencia por debajo de los 0.5 m. Los periodos en PM (figura 7b) mostraron mayor porcentaje de ocurrencia entre los 3 y los 5 s con casi el 90% de los datos de todo el año; en primavera y otoño se llegaron a presentar muy bajos porcentajes de ocurrencia para periodos poco mayores a los 5 s, y en invierno se presentó un máximo de 9.9 s. En verano no hubo presencia de periodos mayores a los 5 s. En ninguna estación del año hubo periodos mayores a los 10 s.

### **6.3 Rosa de Oleaje de HB (anual y estacional)**

Para visualizar de forma general la dirección de aproximación del oleaje en aguas profundas (figura 8), en la estación HB, y en consecuencia la posible dirección de



**Fig. 7.** Histogramas de altura significativa ( $H_s$ ) y periodo ( $T$ ) por estación del año para Punta Morro.



**Fig. 8.-** Rosa de oleaje de todo el año (a) y por estaciones del año (b) para *Harvest Buoy*.

aproximación del oleaje a la BTS, se realizaron histogramas de frecuencia de ocurrencia de la dirección en forma de rosas de oleaje por año y por estaciones del año.

El intervalo de clase de dirección que se utilizó fue de  $22.5^\circ$ . Estas clases están representadas con las líneas segmentadas numeradas cada  $45^\circ$ . Los círculos concéntricos representan frecuencia de ocurrencia de direcciones en número de datos, con intervalos de clase cada 2,000 datos.

Las direcciones de aproximación predominantes del oleaje registrado en HB en todo el año (figura 8a) fueron las provenientes del oeste y del noroeste, entre los  $270^\circ$  y los  $347^\circ$ , con una cantidad de 15576 datos, los cuales corresponden al 90.1 % de la totalidad de los datos registrados. El porcentaje restante corresponde a direcciones registradas entre los  $180^\circ$  y  $270^\circ$ , a excepción de 148 datos que representaron el 0.01% correspondiente a direcciones entre los  $112^\circ$  y los  $174^\circ$ . Para todo el año la máxima dirección fue de  $347^\circ$  y la mínima de  $112^\circ$ .

Una característica similar se observó en las rosas correspondientes a las cuatro estaciones del año (figura 8b), donde también destacó el oleaje proveniente del noroeste y oeste, con la pequeña diferencia de que a principios de otoño y finales de verano se registró la mayor cantidad de datos de oleaje provenientes del suroeste, en comparación a las demás épocas del año. Es de suma importancia aclarar que los datos direccionales

de oleaje corresponden solamente a HB, ya que ningún aparato dentro de la BTS midió dirección.

#### **6.4 Extrapolación de Hs de HB al interior de la BTS**

Como se mencionó anteriormente, para proponer una herramienta que permita extrapolar la altura significativa al interior de la BTS a partir de las mediciones en HB se realizaron correlaciones lineales (figuras de 9 a 12) entre el registro de oleaje medido por HB y los registros de oleaje obtenidos al interior de la BTS (PB y PM). Estas correlaciones se hicieron para los datos de todo el año, las correspondientes a cada estación del año y por ventanas direccionales con un intervalo de  $30^\circ$  de sur a norte, es decir, de los  $180^\circ$  a los  $360^\circ$ .

Como se mencionó en la sección de metodología, para todos los casos se eliminó de la base de datos el grupo de renglones correspondientes a las fechas en las cuales ocurrieron fallas de medición por parte de los instrumentos dentro de la BTS, cuyos porcentajes son el 10.1% para PB y el 9.8 % para PM, de forma que ahora el registro de oleaje cuenta con un total de 7863 datos para PB y 15556 para PM. Es importante mencionar que esta diferencia de datos se debe a que la correlación de datos entre HB y PB se realizó para cada hora del registro de oleaje, mientras que la correlación de datos entre HB y PM se obtuvo cada media hora, es por eso que existe aproximadamente la mitad de datos en las correlaciones de HB v.s. PB a diferencia de las correlaciones de HB v.s PM.

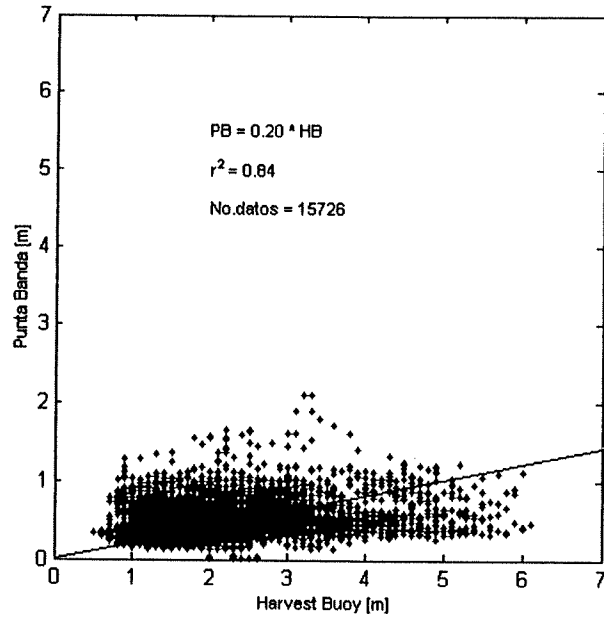
Para obtener una ecuación con la cual el cálculo de la extrapolación sea directo, se consideró al registro de altura significativa de oleaje de HB como variable independiente y las alturas de los instrumentos PB y PM variables dependientes.

#### **6.4.1 Correlación anual**

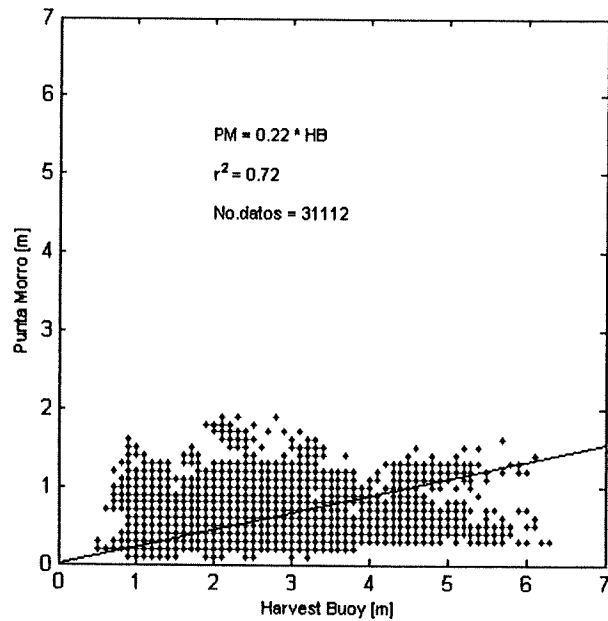
Para dar una idea general de la correlación de los datos y obtener un parámetro de extrapolación aproximado con el cual se pueda inferir a grandes rasgos los valores de la altura significativa –por lo menos dos puntos- al interior de la BTS a partir de la información proporcionada por el CDIP, se graficaron por año los diagramas de dispersión de Hs de HB v.s. PB (figura 9a) y de HB v.s. PM (figura 9b), a partir de los cuales se obtuvieron regresiones lineales con el fin de construir una función de primer orden –recta de regresión- que funcione como modelo predictivo para inferir el comportamiento de la altura significativa dentro de la BTS a partir de las características de las olas en aguas profundas.

Como se observa en la figura 9, la regresión lineal entre HB y PB mostró un mayor coeficiente de correlación que el mostrado entre HB y PM, con valores respectivos de 0.84 y 0.72. Estos sugieren a primera vista que las características de la altura del oleaje en aguas profundas (fuera de la Bahía) y las que se observan dentro de la Bahía están altamente relacionadas.

a)



b)



**Figura 9.-** Diagramas de dispersión y regresiones lineales de: a) HB contra PB y b) HB contra PM, en cada caso se expresa la ecuación de la recta así como el coeficiente de regresión lineal.

Las pendientes de la ecuación de la recta de regresión en ambos casos son prácticamente iguales, con valores de 0.20 para PB y 0.22 para PM. Esta similitud sugiere que las alturas significantes en ambos puntos dentro de la bahía tienen un comportamiento parecido, sin embargo, con estos resultados no es posible especificar en que época del año las pendientes son más afines. Cuestión que se pretende analizar en el siguiente punto.

#### **6.4.2 Correlaciones estacionales.**

Las correlaciones del análisis de regresión por estación del año entre HB y PB (figura 10a) presentaron altos coeficientes de correlación ( $r^2 > 0.75$ ) en invierno, primavera y otoño, con valores de 0.84, 0.76 y 0.89 respectivamente. En contraste, el verano presentó el valor más bajo de  $r^2$ , siendo de 0.67. Este contraste sugiere que el oleaje de verano registrado por HB es diferente al oleaje de verano registrado en PB, debido posiblemente a los efectos inducidos por la configuración geográfica de la BTS, que dificulten la detectabilidad de datos de oleaje en PB hacia la época de verano. De hecho, es en la época de verano cuando tenemos la ocurrencia de oleaje en aguas profundas que se propaga frente a la Bahía proveniente del sur y suroeste. Este oleaje es generado en el Pacífico del hemisferio sur, cuando allá es la época de invierno.

Entre HB y PM las correlaciones estacionales (figura 10b) presentaron los mayores coeficientes en verano y otoño con valores de 0.87 y 0.88 respectivamente, y los menores en invierno y primavera con valores respectivos de 0.64 y 0.69.

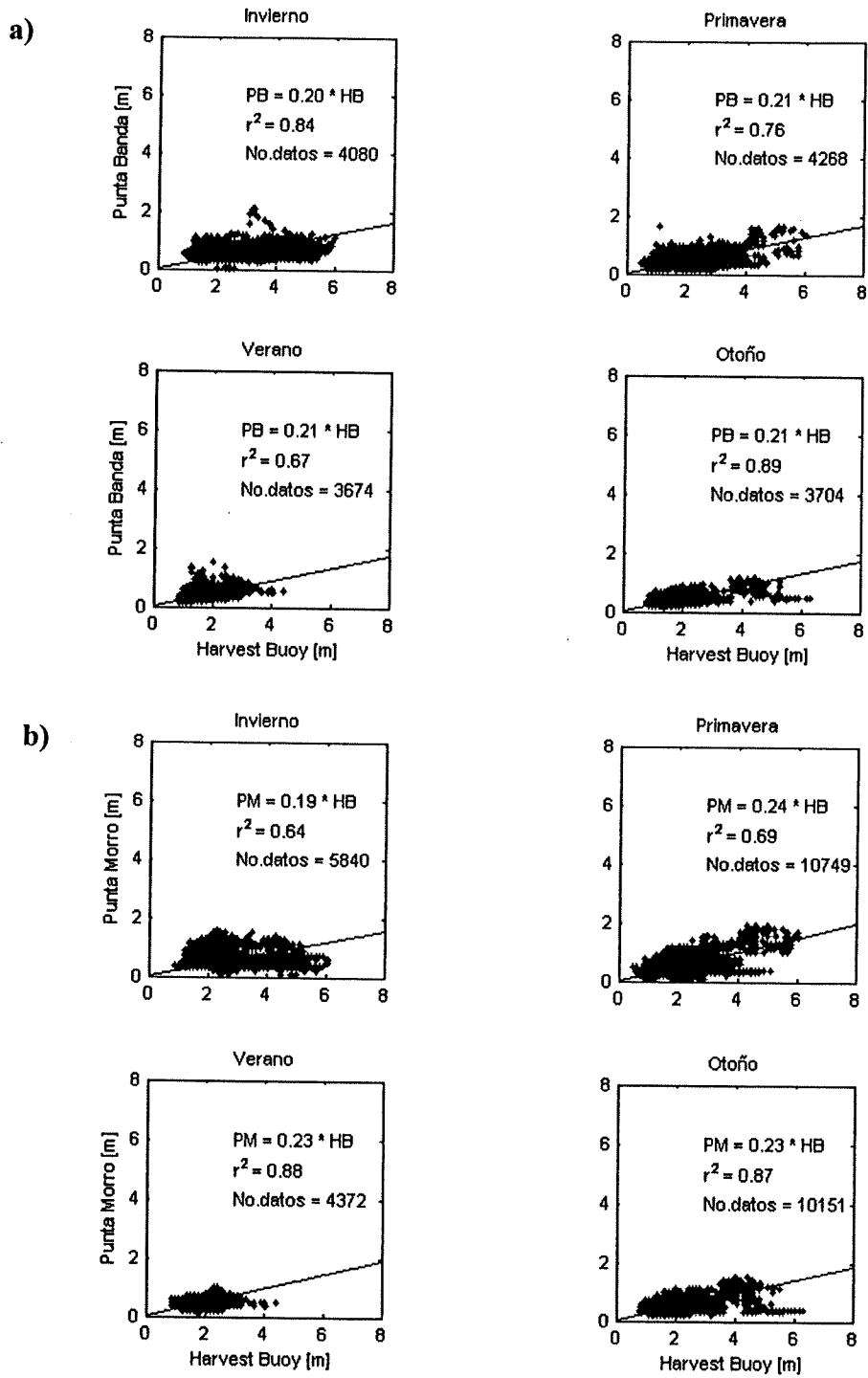


Figura 10.- Diagramas de dispersión y regresiones lineales por estación del año.

Ya que Punta Banda representa una barrera geográfica para el oleaje que se aproxima del sur –oleaje generalmente de verano-, la correlación de verano fue más baja para esta estación de medición, en cambio, el oleaje de verano presentó correlaciones más altas para la estación PM.

#### **6.4.3 Correlaciones por ventanas direccionales.**

Debido a que las correlaciones por estaciones del año no consideran la dirección de arribo del oleaje, se construyeron correlaciones a partir de datos direccionales de oleaje obtenidos en HB (figuras 11 y 12). Como se mencionó anteriormente, la presencia de la isla de Todos Santos establece dos entradas principales a la aproximación del oleaje proveniente de aguas profundas, lo que permite establecer la hipótesis de que la información de oleaje entre HB y los dos puntos dentro de la BTS pudiera estar mejor correlacionada para algunas direcciones en particular (PB-NO, O y PM - O y SO). Además hay que considerar que la dirección de aproximación del oleaje dentro de la Bahía se ve modificada por la refracción inducida por la configuración batimétrica de la misma.

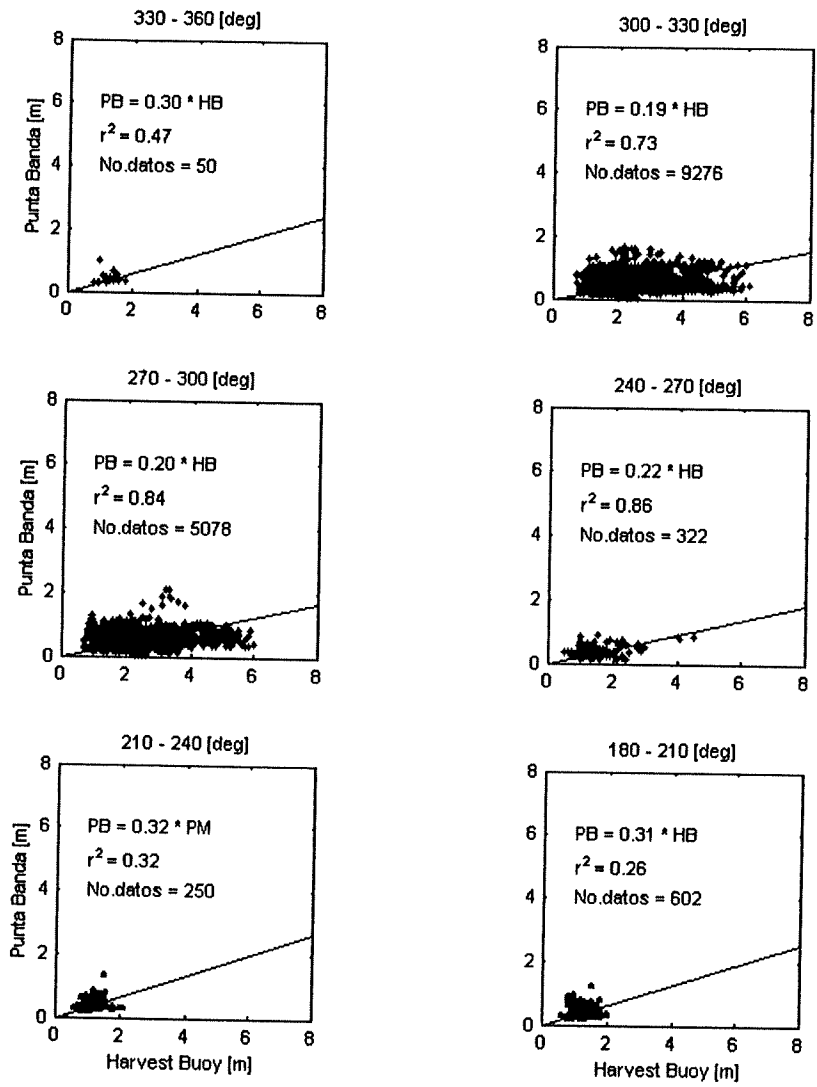
Las correlaciones por ventanas direccionales se realizaron cada 30° a partir del norte franco hasta sur franco para las dos estaciones de medición al interior de la Bahía.

Con respecto a la correlación de HB v.s PB (figura 11), las más altas correlaciones 0.84 y 0.86 fueron para los siguientes intervalos: entre 270° y 300° y entre 240° y 270°;

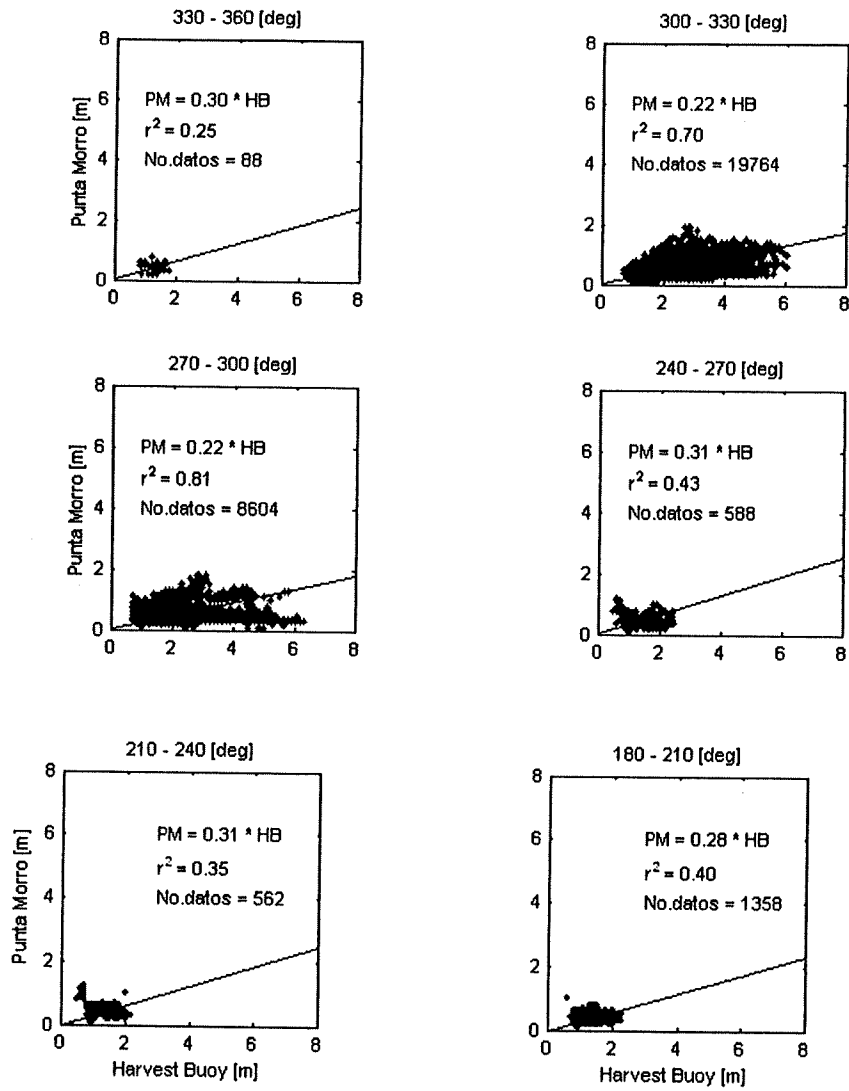
una correlación media de 0.73 entre 300 y 330° y tres correlaciones bajas de 0.47, 0.32 y 0.26 entre 330° y 360°, 240° y 270° y entre los 180° y 210° respectivamente.

En el caso de HB v.s. PM (figura 12), se mostró un coeficiente de correlación alto entre 270° y 300° con 0.81, un coeficiente medio de 0.70 entre 300° y 330° y el resto de los intervalos direccionales obtuvieron valores bajos, sin embargo, los coeficientes de correlación de los intervalos comprendidos entre 180° y 240° fueron más altos que en las correlaciones de HB v.s. PB. La correlación más baja se presentó para el intervalo de 330° y 360° con un valor de 0.25.

Es importante mencionar que se deben establecer diferentes conceptos con respecto a las correlaciones obtenidas por estaciones del año y por ventanas direccionales, ya que por estaciones del año las correlaciones fueron obtenidas utilizando datos agrupados por épocas del año, en las cuales no se consideró el cambio de la dirección de aproximación del oleaje; mientras que en el caso de ventanas direccionales, los datos se agruparon sin importar el tiempo, tomando como base los intervalos de la dirección obtenida por HB.



**Figura 11.-** Diagramas de dispersión y regresiones lineales por ventanas direccionales para HB v.s. PB.



**Fig. 12.** Diagramas de dispersión y regresiones lineales por ventanas direccionales para HB v.s. PM.

## 6.5 Estadísticas Generales

Por último, las tablas IV, V y VI muestran un resumen de los parámetros estadísticos más importantes tales como la media, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos de  $H_s$ ,  $T$  y  $\theta$  para todo el año así como para cada una de las estaciones del año. En la tabla V destacan en la época de invierno los mayores promedios de  $H_s$  y los más bajos en verano, sin embargo, en otoño y primavera se presentaron alturas máximas para HB y PM respectivamente.

En la tabla VI, los periodos máximos se presentaron en invierno para las locaciones de HB y PM y en otoño para la locación de PB. De forma contraria, los periodos promedio más bajos se presentaron en la época de verano. Con respecto a las desviaciones estándar de las alturas y de los periodos (Tablas V y VI), son mayores durante el invierno y menores durante el verano, ya que en el invierno se presentó una mayor variabilidad en el comportamiento de las alturas significantes a diferencia del verano. En primavera y otoño, las desviaciones estándar fueron bastante similares.

**Tabla IV.-** Valores extremos, promedios y desviación estándar de Hs, T y  $\theta$  correspondientes a el periodo de medición de Invierno del 2001 a Otoño del 2002.

<b>Locación</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>
<b>HB</b>	Hs (m)	0.5	$2.07 \pm 0.85$	6.3
	T (s)	3.6	$10.96 \pm 3.26$	22.2
	$\theta$ (°)	112	$295.9 \pm 30.8$	347
<b>PB</b>	Hs (m)	0.02	$0.48 \pm 0.2$	2.1
	T (s)	2.1	$6.38 \pm 1.47$	12.7
<b>PM</b>	Hs (m)	0.1	$0.49 \pm 0.21$	1.9
	T (s)	1.6	$2.78 \pm 0.62$	9.9

**Tabla V.-** Valores extremos, promedios y desviación estándar de Hs, para cada estación del año.

<b>Estación</b>	<b>Locación</b>	<b>Hs min (m)</b>	<b>Hs prom (m)</b>	<b>Hs max (m)</b>
Invierno	HB	0.9	$2.62 \pm 0.92$	6.1
	PB	0.1	$0.58 \pm 0.21$	2.1
	PM	0.1	$0.56 \pm 0.24$	1.6
Primavera	HB	0.5	$2 \pm 0.9$	6.1
	PB	0.14	$0.46 \pm 0.20$	1.64
	PM	0.1	$0.53 \pm 0.23$	1.9
Verano	HB	0.9	$1.82 \pm 0.53$	4.7
	PB	0.14	$0.41 \pm 0.15$	1.54
	PM	0.1	$0.42 \pm 0.12$	1
Otoño	HB	0.8	$1.86 \pm 0.74$	6.3
	PB	0.16	$0.44 \pm 0.15$	1.18
	PM	0.2	$0.47 \pm 0.19$	1.5

**Tabla VI.-** Valores extremos, promedios y desviación estándar de T, para cada estación del año.

<b>Estación</b>	<b>Locación</b>	<b>T min (s)</b>	<b>T prom (s)</b>	<b>T max (s)</b>
Invierno	HB	4.6	$13.13 \pm 2.97$	22.2
	PB	2.1	$6.95 \pm 1.6$	12.1
	PM	1.8	$3.01 \pm 0.92$	9.9
Primavera	HB	3.6	$9.97 \pm 2.71$	20
	PB	3.3	$5.96 \pm 1.07$	10.4
	PM	1.6	$2.72 \pm 0.57$	5.1
Verano	HB	4.4	$9.02 \pm 2.1$	18.2
	PB	3.3	$5.84 \pm 1$	9.6
	PM	1.7	$2.65 \pm 0.45$	4.1
Otoño	HB	4.6	$11.84 \pm 2.44$	22.2
	PB	4	$6.94 \pm 1.61$	12.7
	PM	1.7	$2.83 \pm 0.5$	5.2

## **7. DISCUSIONES**

### **7.1 Variación temporal de las características físicas del oleaje**

La variación estacional de Hs durante todo el periodo de mediciones (figura 3a) indica que su comportamiento sigue un patrón bien definido en donde para las tres localidades en donde se realizaron las mediciones, la altura significativa aumenta durante el invierno -época en la que alcanzan sus máximos valores- y disminuyen en el verano, donde se registró la mayor ocurrencia de alturas pequeñas. De manera que el oleaje dentro de la BTS refleja -a menor escala (el oleaje registrado en HB es por lo general 4 veces mayor al oleaje registrado en los dos puntos al interior de la Bahía)- el oleaje que sucede en aguas profundas. HB presentó 5 picos principales, de los cuales 4 corresponden a la época de invierno y uno en primavera, estos picos representan las máximas alturas significantes registradas, lo cual era de esperarse, ya que en invierno es cuando se forman las tormentas extratropicales al oeste del Pacífico Norte (Martínez-Díaz-de-León y Coria-Méndez, 1993).

La variación de alturas significantes en PB y PM muestran también los picos principales en el invierno alcanzando alturas máximas del orden de los 2 m. La mayor ocurrencia de alturas significantes pequeñas para los tres instrumentos se presentó en el verano, marcando esta estación del año como época de calma.

## 7.2 Porcentaje de Ocurrencia de Hs y T (anual y estacional)

Una de las características principales de los histogramas de Hs y T (figuras 4, 5, 6 y 7), es su distribución de probabilidad, ya que todos los histogramas de Hs se asemejaron visualmente a una distribución de probabilidad teórica del tipo Rayleigh y los histogramas de periodo a una distribución tipo Gaussiana, lo cual coincide con lo que predice la teoría lineal de oleaje (Arx, 1976).

Con respecto al análisis de los histogramas estacionales de Hs en los tres instrumentos (figuras 5a, 6a y 7a), se encontró que el mayor porcentaje de ocurrencia de las alturas más grandes se presentó en invierno, debido a las tormentas generadas por el cinturón sub-polar de baja presión localizado entre los 60° y 65° de latitud norte, el cual es caracterizado por los vientos dominantes del oeste (Johnson, 1974).

Por el contrario, en la época de verano el mayor porcentaje de ocurrencia corresponde a alturas por debajo de los 4.7, 1.54 y 1 m para HB, PB y PM respectivamente. Este comportamiento típico en el verano se debe a que las tormentas en el hemisferio norte han disminuido en magnitud y frecuencia de ocurrencia por la estabilización del centro subtropical de alta presión localizado entre los 30 y 35° de latitud norte, el cual esta caracterizado por vientos débiles y cielos despejados (Johnson, 1974).

La primavera y el otoño se consideran épocas de transición, debido a que en otoño los valores de Hs se incrementan, en comparación con los observados en verano, hasta

llegar a alturas máximas en invierno; en sentido inverso, la primavera presenta un decremento en las alturas, que da lugar a los pequeños valores de verano (Martínez-Díaz-de-León y Coria-Méndez, 1993), además de que la forma de la distribución de ocurrencia de valores de Hs entre ambas es muy parecida.

Según la clasificación de Rivas-Cáceres (1992), con la variación estacional de Hs, (figuras 6a y 7a) se pueden definir dos tipos de oleaje que se presenta dentro de la Bahía, presentando mayor porcentaje de ocurrencia el oleaje considerado como bajo (0 a 0.5 m) en verano y oleaje medio de (0.5 a 2.5 m) en invierno.

El comportamiento del T a lo largo del año, (figuras 3b, 5b, 6b y 7b), no mostró una marcada variación estacional para los instrumentos localizados dentro de la BTS donde encontramos que el intervalo de periodo con mayor porcentaje de ocurrencia en PB (figura 6b) fue de 8 a 9 s en invierno y de 6 a 7 s en el resto de las estaciones del año. En el caso de PM, de 3 a 4 s fue el intervalo de periodo que presentó mayor porcentaje de ocurrencia en todas las estaciones del año. Este comportamiento del periodo se encuentra asociado con la longitud del *fetch* y el tiempo de duración de la tormenta, y no a la intensidad de la misma –como en el caso de las alturas-, por lo que a través de los intervalos de periodo antes mencionados, se puede inferir que el oleaje medido dentro de la Bahía, fue producto de tormentas con longitudes de *fetch* y duraciones similares. Sin embargo no se pueden realizar comparaciones precisas entre los periodos obtenidos por

las diferentes estaciones de medición ya que cada aparato midió diferentes periodos (ver Metodología).

### **7.3 Correlaciones anuales y estacionales**

La correlación de de las alturas significantes de HB v.s. PB (figura 9a) fue mayor a lo largo del año que entre HB v.s. PM (figura 9b), con valores de 0.84 y 0.72 respectivamente. Una de tantas causas –que se explicarán más adelante- de la diferencia entre correlaciones es que la estación de PB se encuentra más expuesta a el oleaje que proviene de aguas profundas del norte y noroeste que es donde se encuentra la estación de medición HB.

Las estaciones del año con buena correlación (considerada en este trabajo de 0.75 a 1) para PB (figura 10a) fueron invierno (0.84), primavera (0.76) y otoño (0.89) y para PM (figura 10b) fueron verano (0.88) y otoño (0.87). Otra causa de estas diferencias radica en que durante las diferentes épocas del año la dirección del oleaje cambia, y debido a que la batimetría y los rasgos geográficos de la BTS son bastante complejos, la variabilidad espacial de Hs dentro de la Bahía se ve inducida por efectos de someramiento, convergencia de energía inducida por refracción del oleaje y lo más relevante, un efecto de sombreado producido por la presencia de la isla de Todos Santos (Martínez-Díaz-de-León, 2002), lo que hace menos detectable al oleaje. Por lo tanto, el oleaje que se aproxima a PB llega de forma más directa y se verá menos modificado por los efectos antes mencionados si proviene del NO y O, oleaje generalmente de invierno.

Por otro lado, la ubicación del aparato de medición en PM, se asocia a una aproximación de oleaje si proviene del O y SO. Sin embargo, las pendientes de cada estación del año en PB son similares, con 0.20 en invierno, 0.21 en primavera, 0.21 en verano y 0.21 para otoño. De forma similar, las pendientes en PM fueron también parecidas, con 0.19 en invierno, 0.24 en primavera y 0.23 en verano y en otoño.

Con el fin de obtener una extrapolación más confiable, con los factores de correlación por estación del año se puede tener una idea de que época presenta condiciones similares en el comportamiento de Hs ente HB y los dos puntos al interior de la Bahía. Sin embargo, la similitud entre los factores de corrección obtenidos sugiere que la extrapolación de HB a PB y PM no es tan diferente entre las diferentes estaciones del año.

#### **7.4 Correlaciones por ventanas direccionales**

Con respecto a la correlación por ventanas direccionales de HB v.s. PB (figura 11) los mayores coeficientes de determinación fueron de 0.84 para el intervalo entre 270° y 300°, y 0.86, para el intervalo de 240° a 270°. Estas direcciones –como se mencionó anteriormente- corresponden a una aproximación de oleaje más directo a la posición del aparato en PB. Para las ventanas direccionales de 330° a 360° 210° a 240° y de 180° a 210° se obtuvieron bajos coeficientes de determinación con valores de 0.47, 0.32 y 0.26 respectivamente. Estas diferencias son debidas a que primero el oleaje proveniente de norte (330° a 360°) corre paralelo a la costa oeste de California con dificultades para

llegar al interior de la BTS y segundo que el oleaje proveniente de direcciones sureñas llega primero a la BTS que a HB, además de que el oleaje con estas direcciones no se mide en PB, ya que la “península” de Punta Banda funciona como una barrera natural a este tipo de aproximación de oleaje.

A diferencia de la correlación por ventanas direccionales de HB v.s PB, la correlación de HB v.s. PM (figura 12) presentó un coeficiente alto de los 270° a los 300°, con un valor de 0.81 y un coeficiente medio entre los 300° y los 330°, con un valor de 0.70. Los demás coeficientes -todos bajos- fueron de 0.25 entre 330° y 360°, 0.43 entre 240° y 270°, 0.35 entre 210° y 240° y 0.48 entre 180° y 210°. La ventana direccional con coeficiente alto (270°-300°), corresponde a la ventana direccional asociada con una aproximación de oleaje más directa a la posición del aparato en PM, sin embargo, la ventanas S y SO presentaron una correlación baja, aunque mayores que en PB, debido a que la estación de medición de PM se encuentra más expuesta al oleaje sureño, detectando mayor cantidad de olas con esta dirección.

Las correlaciones por ventanas direccionales presentaron mayor variabilidad en las pendientes a diferencia de las correlaciones por año. Los valores de pendientes similares correspondieron a las ventanas direccionales con mayor coeficiente de determinación para ambos casos.

En PB las pendientes con mayor similitud fueron 0.19, 0.20 y 0.22 para los intervalos de 300° a 330°, 270° a 300° y 240° a 270° respectivamente. En PM se obtuvieron dos pendientes iguales, con un valor de 0.22 para los intervalos de 300° a 330° y de 270° a 300°, por lo que se podría generalizar la extrapolación de datos de oleaje en estos intervalos direccionales y obtener solamente un factor de corrección para un intervalo direccional más amplio.

Para obtener una extrapolación más refinada se pueden combinar las correlaciones por estación del año y las correlaciones por ventanas direccionales. Una forma de hacer esto es eliminando de cada estación del año las alturas significantes correspondientes a los intervalos direccionales de oleaje obtenidos por HB de baja correlación que se puedan presentar en dicha época del año.

## **8. CONCLUSIONES**

En este trabajo se ha analizado por primera vez el uso de la información del oleaje medida en dos puntos dentro de la BTS y la información medida fuera de ella en la estación de medición HB, con el propósito de proponer una metodología sencilla para la extrapolación de datos de oleaje de aguas profundas hacia aguas someras al interior de la BTS. Del análisis realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones.

El comportamiento del oleaje que prevalece en la Bahía de Todos Santos caracteriza el área como altamente dinámica, debido a que los principales parámetros, altura significativa y periodo, son variables y alternan estacionalmente, lo cual se atribuye a la variabilidad climática a lo largo del año.

En las dos localidades de medición, Punta Banda y Punta Morro, se encontró que las estaciones de invierno y verano presentaron características opuestas en cuanto a las alturas de oleaje, ya que en el invierno se presentaron los mayores valores de altura significativa en comparación a los del verano cuando se presentaron los menores. Mientras que en PB se encontraron valores hasta 2.1 en invierno y en verano solo alcanzaron valores de 1.54 m. En PM, los valores encontrados para invierno y verano fueron de 1.6 y 1m respectivamente, lo cual podría atribuirse a los cambios en la configuración batimétrica que se presentan para ambas localidades.

Primavera y otoño pueden ser consideradas como etapas de transición para la altura del oleaje, en donde los valores promedio de altura significativa para PB y PM se mantienen entre los valores extremos de invierno y verano.

El porcentaje de ocurrencia de altura significativa en PB asociado a oleaje bajo -según la clasificación de Rivas-Cáceres (1992)- fue 58.7 %, y para PM del 65 %, el porcentaje restante corresponde a oleaje medio, ya que ningún valor de altura significativa rebasó los 2.5 m.

La distribución del porcentaje de ocurrencia del periodo no mostró una variabilidad considerable dentro de la BTS. En promedio, el periodo de mayor porcentaje de ocurrencia obtenido por PB se encontró entre los 6 y 7s, y en PM entre los 3 y 4 s, siendo esta última la condición más persistente a lo largo del año en PM. Sin embargo, en invierno y en otoño se presentaron periodos extremos de 12.1 y 12.7 s en PB. El mayor periodo en PM se presentó en invierno con un valor de 9.9 s. Hay que recordar que los instrumentos de medición en HB, PB y PM obtuvieron periodos por diferentes métodos, lo cual provocó estas diferencias.

Con respecto a la metodología propuesta para la extrapolación de Hs de aguas profundas al interior de la Bahía se puede decir que este trabajo ofrece ecuaciones lineales para extrapolar alturas correspondientes a medias anuales, medias estacionales y por ventanas direccionales. En base a la obtención del factor de correlación ( $r^2$ ) de los

cálculos de regresión, se concluye que se puede obtener una extrapolación de Hs anual a groso modo; una extrapolación confiable de algunas de las estaciones del año –invierno, primavera y otoño para PB; verano y otoño para PM- y una extrapolación aun más confiable si se toman en cuenta las ventanas por dirección.

Finalmente se puede concluir que para obtener valores precisos y confiables de la altura significativa del oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos a través de la extrapolación de datos de oleaje medidos en aguas profundas, se pueden combinar los múltiples casos de correlaciones lineales realizados en el presente trabajo; de manera que a futuro se despierte el interés de incluir diferentes condiciones a las regresiones lineales con el propósito de mejorar los modelos de extrapolación.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

ARX, V.W., 1976. An Introduction to Physical Oceanography. 3<sup>th</sup> Ed. Addison Weasley Publishing Company, Massachusets, U.S.A., 422 pp.

BAER, L., 1981. Operational needs for wave data. Symposium and Workshop on Wave-Measurement Technology. New York; 85 pp..

BORGMAN, L.E., 1982, Research needs for wave data. Symposium and Workshop on Wave-Measurement Technology. New York, 85 pp.

CERCA-MARTÍNEZ, L. M., 1995. Evaluación del potencial de extracción de energía eléctrica a partir del oleaje, como posible fuente alterna en Rosarito B.C. Facultad de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada B.C., Tesis de Licenciatura. 70 pp

FLICK, R., 1994. Shoreline erosion assessment. An atlas of the San Diego region. Department of boating and waterways & the San Diego association of governments, Vol. I. Sacramento, California.

JOHNSON, J.C., 1974. Physical Meteorology. The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 393. pp

LIZARRAGA-ARCINIEGA, R. and FISHER, D.W., 1998 Coastal erosion along the Todos Santos Bay, Ensenada, Baja California, México: An Overview, Journal of Coastal Research, Vol 14(4):1231-1241.

MARTÍNEZ-DÍAZ-DE-LEÓN, A., NAVA BUTTON, C., OCAMPO-TORRES, F.J., 1987. Estadísticas del oleaje en la bahía de Todos Santos, B.C., de Septiembre de 1986 a Agosto de 1987. Ciencias Marinas 15(3): 1-20.

MARTÍNEZ-DÍAZ-DE-LEÓN, A., LIZARRAGA-ARCINIEGA R, OCAMPO-TORRES F.J., 2002. The usefulness of CDIP wave data further south of the U.S.-mexican border. Shore and Beach, 70(4):2-4.

OROPEZA-ROSALES, F., 1998. Descripción del clima de oleaje para las costas mexicanas del océano Pacífico en los estados de Baja California, Colima, Michoacán y Guerrero.” Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C., Ensenada B.C., Tesis de Licenciatura. 58 pp.

PERELLÓ-REINA, D., 2002. Estimación del campo de oleaje en la Bahía de Todos Santos mediante el uso de un modelo de predicción de oleaje en aguas someras. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C., Ensenada B.C., Tesis de Licenciatura. 74 pp.

RACIEL-DE-DIOS-SÁNCHEZ, D., 2002 Climatología de la altura significativa del oleaje frente a la costa Pacífico de Baja California a partir de datos del altímetro a bordo del satélite ERS-2. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C. Ensenada, Baja California. Tesis de Licenciatura 66 pp.

RIVAS-CÁCERES, H. S., 1992. Conversión de energía de Oleaje: diseño, usos y aplicaciones. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C., Ensenada B.C Tesis de Licenciatura, 62 pp.

SEYMOUR, R.J., SESSIONS, M.H., CASTEL, D., 1985. Automated remote recording analysis of coastal data. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineering, Vol. 111(2): 338-400

SEYMOUR, R.J. 1996 Wave climate Variability in Southern California, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineering, Vol. 122(4), 182-186

TAKASHI, T., SOEJIMA, T., 1974. Coastal wave observations and information for engineering use in Japan. Proceedings of the International Symposium on Wave Measurement and Analysis. New Orleans, LA., Vol 2:62-81.

TORRES-NAVARRETE, C.R., 1986. Comparación y análisis de registros de oleaje obtenidos en una localidad al sur de la Bahía de Todos Santos, B.C. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C. Ensenada B.C. Tesis de Licenciatura. 73 pp.