

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



“LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO, ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y  
PATRÓN DE REFRACCIÓN DEL OLEAJE EN PUNTA COLONET, B.C.,  
MÉXICO ABRIL 2007 – ABRIL 2008”

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
OCEANÓLOGO  
PRESENTA:  
ALONSO MADRIGAL-SÁNCHEZ

Ensenada, Baja California, Agosto 2009

A mis padres  
Teresa Sánchez Novoa  
José J. Madrigal Franco

A mis hermanos  
Augusto Madrigal Sánchez  
Alejandro Madrigal Sánchez  
y las pequeñas personitas hermosas  
que dan nuevas alegrías a esta familia  
(Emilio y Alejandro)

A todos, Gracias

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue posible realizarlo gracias a las facilidades proporcionadas por la Secretaría de Marina, al permitir desarrollar este estudio con información recabada por la Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada.

Agradezco a mi director de tesis Dr. Ronald Spelz Madero y a mis sinodales M. C. Nidia Teresa Angulo Larios y Dr. Guillermo E. Ávila Serrano, gracias por sus valiosos consejos y apoyo para culminar este proyecto.

A todo el personal del Buque Oceanográfico ALTAIR de la Secretaría de Marina, así como al grupo de la Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada en especial al 1er. Mtre. SIA. Ing. Geo. Diego López Andrés por sus consejos y ayuda en la elaboración de la carta batimétrica.

A mis grandes amigos de Guadalajara Alan, Grimaldo, Max, Negro, Diego y Miguel, esa “bolita de los siete” tan querida y de los cuales he aprendido tantas cosas. Sin dejar afuera a mi hermano adoptivo el Davo.

A toda la familia Sánchez Novoa y a la familia Madrigal Franco, por ser parte de mi vida en estos 25 años.

A mi gran compañera en este proyecto de vida Tania Romero Brito, gracias por estos dos años.....y los que nos faltan. Ahhhh y por su gran apoyo en la revisión de esta tesis, muchas gracias Changa.

A todos mis amigos de Ensenada Chachalaco (Daniel), Fernando, Mau, Andrés, Chino, Patiño, Plebe, Zarco, Eder, Quique, Rocío, Pooh (Daniela), Abi, Panfla, Vika, Erasmo, Chavaleón, Lalo, Emir, Yann, Pablo, Yuri, Badillo y en especial al Paul, échale ganas hermano. Sin intención de omitir a nadie gracias a toda la generación Escaramujos y a todas las personas de la Facultad que durante seis años influyeron de una u otra forma en mi vida.

## RESUMEN

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) pretende desarrollar un megaproyecto marítimo en la región de Bahía Colonet, con el cual se busca controlar el tráfico de carga contenerizada de la costa N del Océano Pacífico. Al diseñar este tipo de obras de ingeniería marítima, no solamente se deben considerar las dimensiones, el tipo de materiales y las fuerzas hidrodinámicas que sobre éstas ejercen el oleaje y las corrientes marinas, sino también la dinámica del ambiente costero y las modificaciones que estas obras producirán en el medio marino. En este estudio se analizaron aspectos oceanográficos para el diseño de esta obra marítima, tales como el levantamiento batimétrico, el análisis estadístico y patrón de refracción del oleaje incidente en Bahía Colonet. La batimetría de la bahía mostró una configuración morfológica altamente irregular debido a los constantes cambios en los contornos batimétricos, consecuencia de la acción del oleaje altamente energético. Del oleaje incidente en la zona sólo se analizaron tres parámetros: altura significativa ( $H_s$ ) con valores mínimos en verano ( $\sim 0.5\text{m}$ ) y máximos en invierno ( $\sim 3\text{m}$ ); periodo del pico espectral ( $T_p$ ) con un rango de 4 hasta 24 s, que caracteriza un comportamiento no estacional; y una dirección de arribo con componentes predominantes del Sur-Suroeste ( $\sim 180^\circ$ ). Los resultados de  $H_s$  y  $T_p$  concuerdan con el patrón que rige la costa Oeste de Baja California, así como con componentes de dirección de arribo que coinciden con información reportada para bahías semiprotegidas. En el patrón de refracción se analizaron dos metodologías, caracterizadas por la presencia de dos regiones de concentración de energía y una zona de disipación de energía (región central).

# INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>INDICE.....</b>	<b>6</b>
<b>1. OBJETIVOS Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>11</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.2. OBJETIVOS .....	14
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	14
1.2.2. <i>Objetivos particulares</i> .....	14
1.3. ANTECEDENTES .....	15
1.3.1. <i>Antecedentes Generales</i> .....	15
1.3.1.1. Costa Oeste de Baja California.....	15
1.3.1.2. Punta Cabras y Eréndira, B. C.....	16
1.3.1.3. Santa Rosalita, B. C.....	16
1.3.1.4. San Felipe, B. C.....	17
1.3.1.5. Rosarito, B. C. ....	17
1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	18
1.4.1. <i>Clima</i> .....	20
1.4.2. <i>Oleaje</i> .....	22
1.4.3. <i>Régimen de mareas</i> .....	22
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
2.1. BATIMETRÍA .....	24
2.2. OLEAJE .....	27
2.3. REFRACCIÓN .....	30
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
3.1. BATIMETRÍA .....	35
3.2. OLEAJE .....	38
3.2.1. <i>Series de tiempo</i> .....	38
3.2.2. <i>Histogramas de Hs y Tp</i> .....	49
3.2.3. <i>Dirección de arribo del oleaje</i> .....	52
3.2.3.1. Rosa de oleaje.....	53
3.2.3.2 Histograma de dirección de arribo.....	54
3.2.4. <i>Análisis de los parámetros (Hs y Tp)</i> .....	55
3.2.5. <i>Estadística general</i> .....	58
3.3. REFRACCIÓN.....	59
<b>4. DISCUSIONES.....</b>	<b>65</b>
4.1. BATIMETRÍA .....	65
4.2. OLEAJE .....	67
4.2.1. <i>Series de tiempo</i> .....	67
4.2.1.1 Comparación de series de tiempo .....	69
4.2.2. <i>Histogramas de Hs y Tp</i> .....	73
4.2.3. <i>Dirección de arribo del oleaje</i> .....	75

4.3. REFRACCIÓN.....	78
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>84</b>
5.1. RECOMENDACIONES.....	85
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>86</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>90</b>
ANEXO 1.....	90
ANEXO 2.....	91
ANEXO 3.....	92
ANEXO 4.....	93
ANEXO 5.....	94

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> FOTOGRAFÍAS DEL ESTADO ACTUAL DE LA MARINA EN SANTA ROSALÍTA, B. C. EN AMBAS IMÁGENES SE OBSERVA EL IMPACTO CAUSADO (INTERIOR DE LA DÁRSENA Y SECCIÓN DEL ROMPEOLAS) POR EL TRANSPORTE EÓLICO PROVENIENTE DEL CAMPO DE DUNAS ALEDAÑO (FOTOGRAFÍAS DE GUILLERMO E. ÁVILA SERRANO). .....	12
<b>FIGURA 2.</b> MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, BAHÍA COLONET, B.C.....	19
<b>FIGURA 3.</b> EJEMPLIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA ECOSONDA PARA LA OBTENCIÓN DE VALORES DE PROFUNDIDAD DE UN CUERPO DE AGUA IDEAL. ....	25
<b>FIGURA 4.</b> COMPORTAMIENTO DE UN TREN DE ONDAS AL ACERCARSE A LA LÍNEA DE COSTA Y SER MODIFICADO POR SU BATIMETRÍA (LÍNEAS SEGMENTADAS) PRODUCIÉNDOSE EL FENÓMENO DE REFRACCIÓN. LAS FLECHAS (ORTOGONALES), MUESTRAN QUE AL REDUCIRSE LA DISTANCIA ENTRE ELLAS SE PRESENTARÁ LA CONVERGENCIA (PARTE CENTRAL) Y AL ALEJARSE UNA DE LA OTRA SE OBTENDRÁ LA DIVERGENCIA DE LAS ORTOGONALES (PARTE INTERNA DE LAS BAHÍAS), DETERMINANDO ASÍ LA DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA (TOMADA Y MODIFICADA DE <i>USACE</i> , 1984). ....	33
<b>FIGURA 5.</b> LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO DE BAHÍA COLONET, REALIZADO CON UNA ECOSONDA <i>RAYTHEON</i> MODELO <i>DE719</i> (GENERANDO 2 DATOS CADA SEGUNDO).....	37
<b>FIGURA 6.</b> SERIES DE TIEMPO DE LOS REGISTROS DE OLEAJE PARA LA ALTURA SIGNIFICANTE (Hs) DURANTE TODO EL AÑO DE MUESTREO (ABRIL 2007- ABRIL 2008). ....	40
<b>FIGURA 7 .</b> SERIES DE TIEMPO DE LOS REGISTROS DE OLEAJE PARA EL PERIODO DEL PICO ESPECTRAL (Tp) DURANTE TODO EL AÑO DE MUESTREO (ABRIL 2007- ABRIL 2008).....	41
<b>FIGURA 8.</b> COMPARACIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO DE LOS CUATRO PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL REGISTRO DE ALTURA DE OLA HAV, Hs, HMAX Y H <sub>10</sub> , OBTENIDOS A PARTIR DEL CORRIENTÍMETRO-OLÓMETRO <i>INTEROCEAN</i> MODELO <i>S4A v 5.056</i> . (A) GRÁFICA DE ALTURAS DE SEPTIEMBRE 2007. (B) GRÁFICA DE ALTURAS DE NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2007. (C) GRÁFICA DE ALTURAS DE MARZO-ABRIL 2008. ....	44
<b>FIGURA 9.</b> COMPARACIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO DE LOS CINCO PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL REGISTRO DE PERIODO DE OLA Tp, Tz, Tc, Ts Y TMAX, OBTENIDOS A PARTIR DEL CORRIENTÍMETRO-OLÓMETRO <i>INTEROCEAN</i> MODELO <i>S4A v 5.056</i> . (A) GRÁFICA DE PERIODOS DE SEPTIEMBRE 2007. (B) GRÁFICA DE PERIODOS DE NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2007. (C) GRÁFICA DE PERIODOS DE MARZO-ABRIL 2008. ....	45
<b>FIGURA 10.</b> COMPARACIÓN DE SERIES DE TIEMPO DE LOS PARÁMETROS Hs Y Tp PARA ABRIL-MAYO 2007, USANDO DATOS DEL PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER (ADP) MARCA <i>SONTEK</i> MODELO <i>ARGONAUTA XR</i> . ....	46
<b>FIGURA 11.</b> COMPARACIÓN DE SERIES DE TIEMPO DE LOS PARÁMETROS Hs, Tp Y $\theta$ PARA SEPTIEMBRE 2007, USANDO DATOS DEL CORRIENTÍMETRO-OLÓMETRO <i>INTEROCEAN</i> MODELO <i>S4A v 5.056</i> . ....	46
<b>FIGURA 12.</b> COMPARACIÓN DE SERIES DE TIEMPO DE LOS PARÁMETROS Hs, Tp Y $\theta$ PARA NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2007, USANDO DATOS DEL CORRIENTÍMETRO-OLÓMETRO <i>INTEROCEAN</i> MODELO <i>S4A v 5.056</i> . ....	47
<b>FIGURA 13.</b> COMPARACIÓN DE SERIES DE TIEMPO DE LOS PARÁMETROS Hs, Tp Y $\theta$ PARA MARZO-ABRIL 2008, USANDO DATOS DEL CORRIENTÍMETRO-OLÓMETRO <i>INTEROCEAN</i> MODELO <i>S4A v 5.056</i> . ....	48
<b>FIGURA 14.</b> HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA POR PORCENTAJE DE OCURRENCIA DE LA ALTURA SIGNIFICANTE (Hs). EL NÚMERO SUPERIOR DE CADA BARRA CORRESPONDE AL VALOR	

DEL PERIODO DEL PICO ESPECTRAL (Tp) PROMEDIO CORRESPONDIENTE A CADA INTERVALO DE CLASE. (A) ABRIL-MAYO 2007. (B) SEPTIEMBRE 2007. (C) NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2007. (D) MARZO-ABRIL 2008. ....	50
<b>FIGURA 15.</b> HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA POR PORCENTAJE DE OCURRENCIA DEL PERIODO DEL PICO ESPECTRAL (Tp). EL NÚMERO SUPERIOR DE CADA BARRA CORRESPONDE AL VALOR DE ALTURA SIGNIFICANTE (Hs) PROMEDIO CORRESPONDIENTE A CADA INTERVALO DE CLASE. (A) ABRIL-MAYO 2007. (B) SEPTIEMBRE 2007. (C) NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2007. (D) MARZO-ABRIL 2008. ....	51
<b>FIGURA 16.</b> DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE ARRIBO PREDOMINANTE DEL OLEAJE EN BAHÍA COLONET, B. C. OBTENIDOS A PARTIR DEL CORRIENTÍMETRO-OLÓMETRO <i>INTEROCEAN</i> MODELO <i>S4A v 5.056</i> , (SEPTIEMBRE 2007).....	53
<b>FIGURA 17.</b> DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE ARRIBO PREDOMINANTE DEL OLEAJE EN BAHÍA COLONET, B. C., POR MEDIO DE HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA EN PORCENTAJE (SEPTIEMBRE 2007), OBTENIDOS A PARTIR DEL EQUIPO <i>INTEROCEAN</i> MODELO <i>S4A v 5.056</i> . ....	55
<b>FIGURA 18.</b> HISTOGRAMA DE FRECUENCIA POR PORCENTAJE DE OCURRENCIA DE LA ALTURA SIGNIFICANTE (Hs) DE ABRIL 2007 A ABRIL 2008. LOS NÚMEROS SUPERIORES EN CADA BARRA SON EL VALOR PROMEDIO CORRESPONDIENTE A ESE INTERVALO DE CLASE. ....	56
<b>FIGURA 19.</b> HISTOGRAMA DE FRECUENCIA POR PORCENTAJE DE OCURRENCIA DEL PERIODO DEL PICO ESPECTRAL (Tp), DE ABRIL 2007 A ABRIL 2008. LOS NÚMEROS SUPERIORES EN CADA BARRA SON EL VALOR PROMEDIO CORRESPONDIENTE A ESE INTERVALO DE CLASE. ....	57
<b>FIGURA 20.</b> DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE PARA EL CASO 1 USANDO LA METODOLOGÍA MANUAL, EN LAS COSTAS DE BAHÍA COLONET, B. C. (DIRECCIÓN SW). 63	
<b>FIGURA 21.</b> DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE PARA LA METODOLOGÍA COMBINADA POR MEDIO DEL USO DE <i>WAVES v 1.0</i> , EN LAS COSTAS DE BAHÍA COLONET, B. C.....	64

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA I.</b> NORMALES CLIMÁTICAS A LO LARGO DE UN INTERVALO DE 30 AÑOS (1971-2000) EN LA REGIÓN DE PUNTA COLONET-SAN TELMO, B. C (TOMADA Y MODIFICADA DE SPELZ, 2008). .....	21
<b>TABLA II.</b> NIVELES HIDROGRÁFICOS DE MAREA (REFERIDOS AL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR), PARA EL PUERTO DE ENSENADA (SEMAR, 2009). .....	23
<b>TABLA III.</b> PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS DEL OLEAJE OBTENIDOS DE LOS REGISTROS DEL S4A, PARA BAHÍA COLONET, B.C. ....	28
<b>TABLA IV.</b> ESTADÍSTICA GENERAL DEL OLEAJE PARA BAHÍA COLONET, EN EL PERIODO ABRIL 2007- ABRIL 2008. ....	58
<b>TABLA V.</b> INFORMACIÓN DE APOYO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PATRÓN DE REFRACCIÓN PARA EL CASO 1 (DIRECCIÓN S-SW), OBTENIDA EN BASE AL APÉNDICE C DEL <i>SHORE PROTECTION MANUAL</i> (1984). ....	60
<b>TABLA VI.</b> INFORMACIÓN DE APOYO UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DEL PATRÓN DE REFRACCIÓN PARA LA METODOLOGÍA COMBINADA ( <i>WAVES VI.0</i> ). ....	60
<b>TABLA VII.</b> COEFICIENTES DE REFRACCIÓN (KR) OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE “REFRACCIÓN POR BATIMETRÍA”. (A) METODOLOGÍA MANUAL PARA EL CASO 1 CON DIRECCIONES DE ARRIBO DEL S-SW. (B) METODOLOGÍA COMBINADA UTILIZANDO EL <i>WAVES VI.0</i> , CON DIRECCIÓN DE ARRIBO DEL S-SW. ....	61

# **1. OBJETIVOS Y ANTECEDENTES**

## **1.1. Introducción**

El conocimiento de la dinámica del ambiente costero es de suma importancia para el diseño, construcción y operación de complejos industriales, turísticos y urbanos. En esta zona se encuentra la frontera entre el ambiente oceánico, continental y atmosférico, los cuales interactúan entre sí para lograr de manera natural un estado de equilibrio. La consideración de los cambios y/o alteraciones que se presentan en cada ambiente ayudan a comprender y prevenir los problemas que suelen suscitarse en la zona costera debido a las actividades antropogénicas y/o eventos naturales extremos (Cano, 2004).

En el diseño de las obras de ingeniería costera no solamente deben considerarse las dimensiones, el tipo de materiales y las fuerzas hidrodinámicas que sobre ellas ejercen el oleaje y las corrientes marinas, sino también la dinámica del ambiente costero y las modificaciones que estas obras producen en el medio marino. Para esto, se deben comprender los aspectos básicos de la interacción entre las variables geológicas, meteorológicas y oceanográficas (Huerta, 2002).

La Marina de Santa Rosalita en Baja California (Proyecto Nacional “ Proyecto Mar de Cortés”) actualmente presenta problemas debidos el gran aporte sedimentario de los campos de dunas adyacentes por el transporte eólico; esta acumulación de sedimentos en su parte interior la ha vuelto ineficiente ya que los costo de rehabilitación rebasarán la capacidad económica y de mano de obra (Figura 1). Este es un ejemplo tangible de las

deficiencias entre muchas otras, que a nivel nacional se presentan por la falta de planeación y estudios, así como decisiones inapropiadas en el manejo de las zonas costeras que influyen negativamente en niveles económicos, sociales y ambientales (García-Krasovsky, 1973). Estas consecuencias negativas incluyen, entre otras, la modificación del transporte eólico en campos de dunas, la destrucción de la vegetación endémica, la alteración de la dinámica costera y el transporte litoral.



**Figura 1.** Fotografías del estado actual de la marina en Santa Rosalita, B. C. En ambas imágenes se observa el impacto causado (interior de la dársena y sección del rompeolas) por el transporte eólico proveniente del campo de dunas aledaño (fotografías de Guillermo E. Ávila Serrano).

Actualmente en México ha aumentado no sólo el interés sino también las regulaciones ambientales con el objetivo de conocer y mejorar el manejo de los ambientes costeros, surgiendo así diversos estudios para entender su dinámica y naturaleza. Sin embargo, la zona costera que presenta México es muy extensa, por lo que hasta ahora resulta insuficiente la información referente a los ambientes marinos, específicamente de estudios oceanográficos (Cano, *op. cit.*).

En Bahía Colonet, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) pretende desarrollar un megaproyecto marítimo con una inversión estimada entre los 9 mil y 12 mil millones de dólares. Este proyecto, considerado como el proyecto portuario más vanguardista en México, incluye la construcción de entre 10 y 20 muelles de 400 metros de longitud cada uno, los cuales albergarán a embarcaciones de gran calado para el transporte de contenedores tipo postpanamax. El área de este mega puerto abarcará una superficie total de litoral de 46 km<sup>2</sup>, siendo el más grande de su tipo en todo México y sur de California, EUA (SCT, 2008). La puesta en operación se planea en el 2012 y en su quinto año de operación tendrá una capacidad de movilización de más de seis millones de contenedores anuales, aumentando así cuatro veces lo que actualmente moviliza el transporte marítimo en nuestro país. Con esta construcción se busca controlar el tráfico de carga contenerizada de la costa del Océano Pacífico, sacando provecho de la actual saturación de los puertos californianos (SCT, *op. cit.*).

Sin embargo para zonas tan aisladas como Bahía Colonet, la información del ambiente costero y su dinámica es aún más escasa, ocasionando una gran incertidumbre sobre los impactos ecológicos que una mala planeación de diseño, construcción y manejo podrían generar en la zona.

Para evitar los efectos negativos derivados de un posible mal diseño del proyecto, será necesario realizar diversos estudios socioeconómicos, ambientales, geológicos, meteorológicos y oceanográficos que permitan lograr un manejo integral y adecuado de la zona.

En el presente trabajo se analizan algunos aspectos oceanográficos para el diseño de la obra, tales como el levantamiento batimétrico, el análisis estadístico y el patrón de refracción del oleaje incidente en Bahía Colonet. La determinación y el análisis de los principales parámetros y fenómenos del oleaje permitirán realizar y calibrar modelos de predicción sobre la generación, propagación y disipación de la energía en la bahía. Estos aspectos oceanográficos son de suma importancia y deberán ser considerados en el desarrollo de este proyecto de gran magnitud, mismo que se prevé tendrá gran impacto en la economía y desarrollo social del estado y el país, siempre que se realice de manera organizada y tomando en cuenta los factores ambientales, hidrodinámicos, geológicos, económicos y sociales del lugar.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo general***

Medir, procesar e interpretar el régimen estadístico de oleaje en Bahía Colonet para su aplicación en futuros proyectos de ingeniería marítima en la zona.

### ***1.2.2. Objetivos particulares***

- ❖ Generar un levantamiento batimétrico de la zona costera de Bahía Colonet, B. C.

- ❖ Analizar el comportamiento de los parámetros estadísticos de altura, periodo y dirección del oleaje incidente. en Bahía Colonet.
- ❖ Determinar la distribución de la energía del oleaje incidente a partir del análisis de refracción.

### **1.3. Antecedentes**

Bahía Colonet no cuenta con antecedentes sobre la caracterización de su zona costera. Sin embargo, para este estudio se tomaron como referencia la metodología y las características generales de la línea de costa de regiones cercanas a la bahía tales como Bahía de Santa Rosalía (Cano, 2004), Punta Cabras y Eréndira (Oropeza, 1998), Rosarito (Padilla, 1989; Marichal, 2001) y otras porciones de la región oeste de la península (Rivas, 1992; Cruz, 1983). Además de la cercanía de estas zonas, específicamente la Bahía de Santa Rosalía y Rosarito, presentan una línea de costa similar en su forma y/u orientación geográfica.

#### ***1.3.1. Antecedentes Generales***

##### ***1.3.1.1. Costa Oeste de Baja California***

Rivas (1992) realizó una clasificación general del oleaje incidente en la costa oeste de Baja California. Rivas (*op. cit*) consideró como oleaje bajo aquellas alturas de ola menores a los 0.5 m; oleaje medio a las olas con alturas de 0.5 hasta 2.5 m; y oleaje alto a las que presentaron alturas mayores a los 2.5 m. Sin embargo el autor señaló que se pueden registrar alturas de hasta 7 m en condiciones de tormenta en invierno.

### *1.3.1.2. Punta Cabras y Eréndira, B. C.*

Oropeza (1998) realizó un procesamiento de datos de oleaje empleando el modelo propuesto por Longuet Higgins (1975) en dos regiones al sur de Bahía Colonet; Punta Cabras y Eréndira. En la primera se midieron datos en primavera, verano y otoño de 1990, verano de 1991 y todo el año de 1992; para la segunda zona se obtuvieron datos de otoño de 1993. El autor reportó los máximos valores de altura significativa (Hs) asociadas a la temporada de otoño-invierno, de 3.6 m y 1.1 m, y un comportamiento similar del periodo en las diferentes épocas del año con una variación de 1.8 hasta 91.8 s. El periodo de la mayoría de los datos de oleaje superó el rango de las ondas conocidas como ondas de gravedad (1-30 s), siendo este rango de periodo el comúnmente utilizado para proyectos de ingeniería marítima, sin embargo esta amplia variación es debido a que el autor no distinguió oleaje de las ondas de infragravedad.

### *1.3.1.3. Santa Rosalíta, B. C.*

Cano (2004) determinó y analizó los parámetros estadísticos del oleaje para la Bahía de Santa Rosalíta y reportó una dirección predominante promedio sur-suroeste (S-SW) en primavera, verano y otoño; en invierno tuvo el oleaje una modificación de  $22.5^\circ$  de azimut, incidiendo de sur franco. Cano (*op. cit*) reveló que el periodo del pico espectral ( $T_p$ ) no tiene un patrón establecido que rija estacional o mensualmente en la zona. Asimismo, mostró que el valor máximo de la altura significativa (Hs), durante el invierno alcanza un valor de 2.35 m, y reportó que las mayores alturas registradas, asociadas a la dirección predominante sur-suroeste, se presentan en los inicios del invierno.

#### *1.3.1.4. San Felipe, B. C.*

Cruz (1983) determinó el error del ángulo de aproximación del oleaje a través de la comparación del fenómeno de refracción a partir del método manual y el computacional en la playa “Los Amigos” al norte de San Felipe, Baja California. Cruz (1983) usó periodos de ola de 3 a 4 s, un ángulo  $> 20^\circ$ , y mediciones de mar abierto para obtener la dirección de propagación del oleaje y obtuvo a partir del método de Wilson (1966) el error promedio para el método manual y computacional de 3 y 8% respectivamente. El autor recomendó el uso del método computacional para reducir los tiempos de trabajo, sin embargo hizo énfasis en que es mayor la precisión del método manual, siempre y cuando se disminuyan los errores en la medición.

#### *1.3.1.5. Rosarito, B. C.*

Marichal (2001) analizó en función del tiempo la altura significativa ( $H_s$ ), el periodo de cruces por cero ( $T_z$ ) y la dirección del oleaje en las costas de Rosarito, B. C. La  $H_s$  presentó una variación estacional con valores extremos durante los inviernos de 1994-1995 y 1997-1998 de 5.15 y 5.71 m respectivamente. Las alturas más frecuentes fueron de 0.75 a 1.25 m. Los periodos de mayor ocurrencia fueron los de 11 a 12 s. Los valores extremos ocurrieron en primavera (18 s) y otoño (18.3 s). El autor encontró que la dirección predominante del oleaje proviene del suroeste y se asocia con la mayor altura de ola. Marichal (*op. cit*) determinó que para el periodo analizado, las mayores alturas de ola  $H_s$  y el  $T_z$  promedio se incrementaron año con año, y enfatizó que el periodo de muestreo de este estudio estuvo influenciado por eventos extremos como el fenómeno “El Niño” observado durante 1997 y 1998.

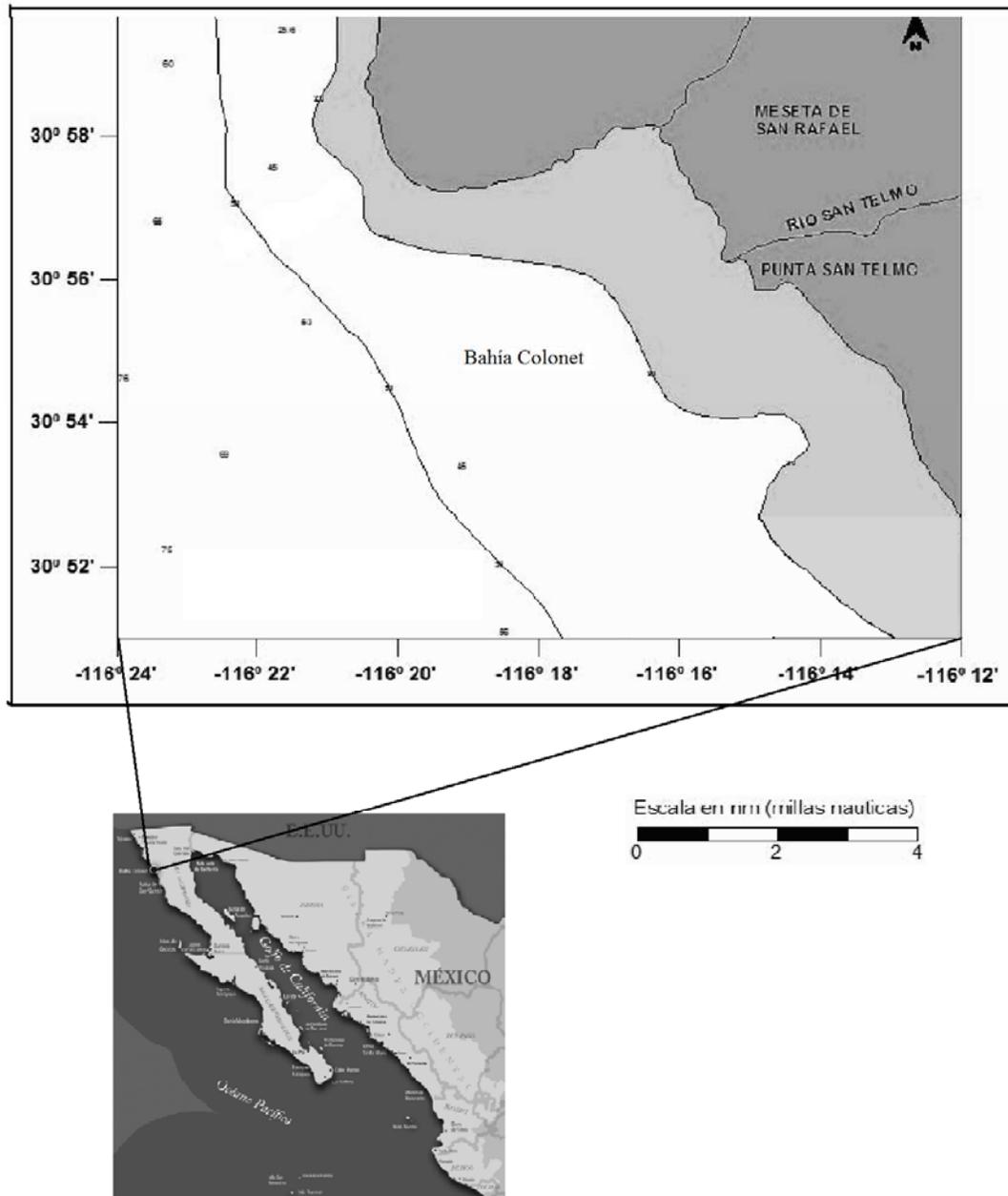
Padilla (1989) realizó una base de datos de oleaje para Rosarito, B. C. en la zona de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), calculando una altura significativa (Hs) de 2.5 m y una dirección predominante del suroeste principalmente, sin embargo, el autor señala que los eventos energéticos más importantes están asociados a la dirección noroeste.

#### **1.4 Descripción del Área de Estudio**

Punta Colonet es una bahía natural localizada a 130 km al sur de Ensenada, Baja California, y ubicada entre los 116°24' y 116°12' longitud Oeste, y los 31°00' y 30°52' latitud Norte (Figura 2). La geología de la región costera cercana a Punta Colonet (San Antonio del Mar) pertenece a la provincia fisiográfica de Sierras de Baja California, la cual está constituida por granitos, granodioritas, rocas metasedimentarias, gneises, calizas, andesitas y riolitas. Las sierras que conforman la región se caracterizan por presentar una pendiente suave al W y una abrupta hacia el E, así como la influencia de los ríos San Vicente, San Antonio del Mar, San Telmo y San Rafael que afectan estacionalmente a la región (Solleiro-Rebolledo, *et al*, 1998).

Geomorfológicamente, la bahía muestra una curvatura con más de 30 km de largo que inicia en Punta Colonet con un farallón o cantil de gran altura de aproximadamente 250 m y culmina más allá de Punta San Telmo. Seguido del cantil de Punta Colonet se presenta la zona de influencia del Arroyo San Rafael encontrándose una playa de cantos rodados, así como arenas finas de la desembocadura del arroyo en la región anterior a la berma de la playa. Al igual que la desembocadura del Arroyo San Rafael, en toda la zona de playa de la

bahía es posible observar la presencia de cantos rodados de diversas dimensiones, siendo esta evidencia de una playa altamente energética. Culminando la influencia del Arroyo San Rafael se observan cantiles de baja altura con variaciones de ~3 m, los cuales se extienden más allá de Punta San Telmo (~7 m) (Bravo, 2008).



**Figura 2.** Mapa de ubicación de la zona de estudio, Bahía Colonet, B.C.

### ***1.4.1. Clima***

El clima actual en la región oeste de Baja California se determinó en base a la clasificación de Köppen-Geiger-Pohl, en la cual se comparan los niveles de precipitación media anual respecto a la temperatura promedio de cada región del mundo, al igual que con el apoyo de registros históricos de diversas estaciones meteorológicas de la región para los años 1971-2000 disponibles en el Servicio Meteorológico Nacional, a través de la Comisión Nacional del Agua ([www.smn.cna.gob.mx](http://www.smn.cna.gob.mx)). Se tomaron en cuenta las cuatro estaciones meteorológicas más cercanas a Punta Colonet, con una elevación promedio de 322.5 msnm, cuya temperatura media anual ( $T_{ma}$ ) fluctúa entre 15.6 y 18.9°C, y su precipitación media anual ( $P_{ma}$ ) varía entre 242.1 y 329.9 mm, aproximadamente 86.7% de la precipitación media anual ocurre durante los meses de octubre a marzo con un promedio anual de días con lluvia entre 22.3 y 29.3 días (Tabla I). La temperatura normal de los meses más fríos (diciembre-enero) en la región promedia 4.75°C, mientras la temperatura normal de los meses más cálidos (julio-septiembre) promedia 29.7°C (Tabla I). Al referirnos a la clasificación de Köppen-Geiger-Pohl, la región oeste de Baja California presenta un clima del tipo árido continental o tipo estepario frío (BSh), pudiéndose conocerse como clima mediterráneo árido. Este último se presenta como transición entre el clima mediterráneo típico (Csa) y el desértico (BW), y se caracteriza por la aridez en la mayor parte del año. El clima mediterráneo árido tiene temperaturas invernales más cálidas que el clima mediterráneo típico y con menos lluvias, que oscilan entre los 200 y 400 mm concentradas principalmente en las estaciones frías, contrario a ello se presentan veranos secos y calurosos que alcanzan temperaturas medias superiores a los 25°C en las cercanías a la

**Tabla I.** Normales climáticas a lo largo de un intervalo de 30 años (1971-2000) en la región de Punta Colonet-San Telmo, B. C (Tomada y modificada de Spelz, 2008).

Estación Meteorológica <sup>a</sup> Nombre/Lugar	Localización		Elevación (msnm)	T <sub>ma</sub> <sup>b</sup> (°C)	Mes más frío	Temperatura promedio del mes más frío (°C)	Mes más caliente	Temperatura promedio del mes más caliente (°C)	P <sub>ma</sub> <sup>c</sup> (mm)	Precipitación (Oct-Mar) (%)	Precipitación (Abr-Sept) (%)	Promedio de días con lluvia ligera	Promedio de días con tormenta	Tipo de clima <sup>d</sup>
	Latitud(N)	Longitud(W)												
Ej. Eréndira/Ensenada	31°16'38"	116°23'38"	25	15.6	Diciembre	6.7	Septiembre	24.3	217.3	89.64	10.36	22.3	0.2	BSk
San Telmo/Ensenada	30°57'00"	116°06'00"	175	17.0	Diciembre	3.4	Agosto	30.2	242.1	86.32	13.67	28.4	0.4	BSk
San Vicente/Ensenada	31°19'45"	116°14'52"	110	17.7	Diciembre	3.5	Agosto	32.3	245.9	91.05	8.95	26.4	0.1	BSk
Santa Cruz/Ensenada	30°52'43"	115°37'40"	980	18.9	Enero	5.4	Julio	32.1	329.9	79.7	20.3	29.3	0.4	BSh
<b>Promedios</b>			<b>322.5</b>	<b>17.3</b>		<b>4.75</b>		<b>29.7</b>	<b>258.8</b>	<b>86.77</b>	<b>13.33</b>	<b>26.6</b>	<b>0.27</b>	

<sup>a</sup> Estaciones meteorológicas en México operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (<http://www.smn.cna.gob.mx/>).

<sup>b</sup> T<sub>ma</sub> = Temperatura Media Anual.

<sup>c</sup> P<sub>ma</sub> = Precipitación Media Anual.

<sup>d</sup> Esquema de clasificación de Köppen-Geiger-Pohl ([www.en.wikipedia.org/wiki/Köppen\\_climate\\_classification](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Köppen_climate_classification)). BSk = estepario frío (mediterráneo árido); BSh = estepario cálido (mediterráneo árido). Ver texto para mayor información.

costa, y mayores a los 45°C en zonas interiores con posibles olas de calor, ejemplificadas por el Valle de Guadalupe, Santo Tomas y San Antonio de las Minas (B.C.), entre otras ([www.en.wikipedia.org/wiki/Köppen\\_climate\\_classification](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Köppen_climate_classification)).

La clasificación o régimen que se le da a los vientos para las costas de Baja California es la de brisas, las cuales se presentan como vientos de mar a tierra durante el día y en sentido opuesto durante la noche. La dirección dominante presenta componentes del NW con intensidades de 4 m/s, seguido de las direcciones del N y W con intensidades similares durante el verano. De septiembre a febrero se presentan direcciones del E, NW y SW con intensidades moderadas de 8 a 10 m/s. Durante los meses de octubre a enero este régimen de brisas se ve suspendido esporádicamente y es entonces cuando se presenta el fenómeno conocido como “Condición Santana”, que consiste en la presencia de vientos de escasa humedad y alta intensidad (20 m/s) en dirección E, que persisten durante el día y la noche por un lapso de 2 a 3 días (Bermúdez, 1999). En la zona se presenta un sistema de tormentas zonales (Tormentas invernales) con dirección de W a E.

#### ***1.4.2. Oleaje***

El oleaje presenta una marcada variación espacial y temporal a lo largo de la Península de Baja California, en donde consistentemente se observa que las olas de mayor altura se presentan en invierno y al noroeste de la península, y las de menor altura durante el verano hacia el sur de la península (de Dios, 2002).

#### ***1.4.3. Régimen de mareas***

La marea que se presenta para esta zona es del tipo mixta semidiurna, presentándose dos pleamares y dos bajamares en periodos de 12 hrs aproximadamente en el transcurso de un

día. La Tabla II enlista los niveles hidrográficos de marea para el Puerto de Ensenada de enero 2003 a diciembre 2007, los cuales se consideran validos para toda la región NW del Pacífico Mexicano (SEMAR, 2009).

**Tabla II.** Niveles hidrográficos de marea (referidos al nivel de bajamar media inferior), para el Puerto de Ensenada (SEMAR, 2009).

<i>Ciclo de Marea</i>	<i>Altura (m)</i>
Nivel Pleamar máxima registrada	2.32
Nivel Pleamar media superior	1.619
Nivel Pleamar media	1.379
Nivel Medio del Mar	0.844
Nivel Bajamar media	0.276
Nivel Bajamar media inferior	0.00
Nivel Bajamar mínima registrada	-0.67

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

La obtención de datos para este estudio se llevó a cabo a través de cuatro campañas oceanográficas realizadas con la Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada (EIOE) perteneciente a la Secretaria de Marina (SEMAR), a bordo de los buques oceanográficos ALTAIR y ALEJANDRO HUMBOLDT. Éstos se llevaron a cabo durante los meses de abril, septiembre y noviembre del 2007; y febrero del 2008.

Para obtener una buena calidad en los datos procesados se tomaron en cuenta factores como el estado y calibración de los aparatos de medición, al igual que el tratamiento e interpretación de los mismos.

## 2.1. Batimetría

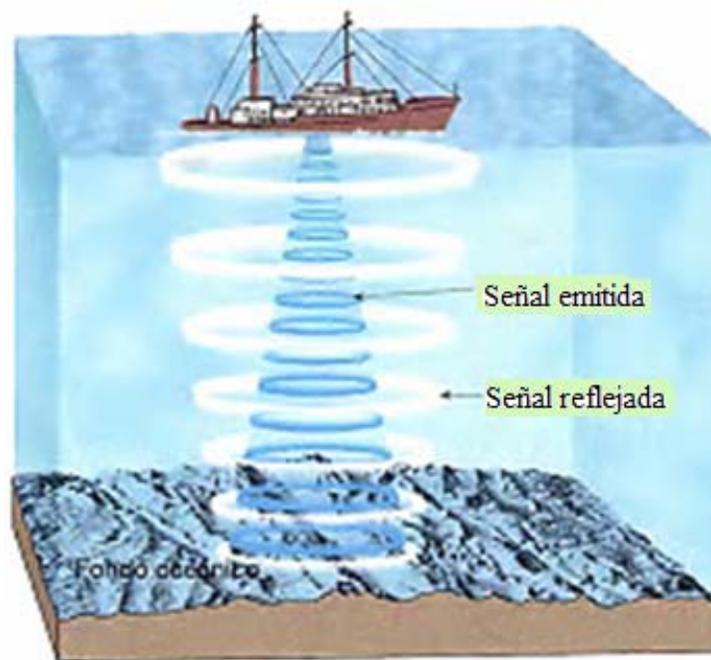
El levantamiento batimétrico se llevó a cabo durante dos campañas de campo (abril y noviembre 2007), sobre una embarcación menor con motor de fuera de borda perteneciente a la SEMAR, en la cual se montó un sistema de GPS *Simrad* modelo *Shipmate* CP30 y una Ecosonda *Raytheon* modelo DE719, mismos que se conectaron a una computadora portátil a fin de recabar en distintos archivos los datos de profundidad y posición geográfica. Durante el recorrido de sondeo se efectuaron registros continuos a lo largo de transectos perpendiculares a la línea de costa y equidistantes entre sí. El sondeo cubrió un área de 7,200 hectáreas aproximadamente. Toda la carta batimétrica está referida al *Datum* del Sistema Geodésico Mundial de 1984 y al Esferoide del sistema geodésico mundial. Las profundidades están referidas al Nivel de Bajamar Media Inferior; y debido a la densidad de los datos de profundidad, estos fueron diezmados para evitar la sobreposición; sin embargo, todos los datos recabados fueron utilizados para la interpolación y trazo de las isóbatas. Se utilizó una programación de manera automática para generar dos mediciones por segundo.

Como complemento del levantamiento batimétrico la SEMAR realizó un caminamiento a lo largo de toda la línea de costa desde el NW de Punta Colonet hasta el SE de Punta San Telmo, utilizando un GPS *Simrad* modelo *Shipmate* CP30 para registrar la posición a lo largo del transecto.

La ecosonda basa su técnica en la generación de una señal acústica (Figura 3) transmitida a través de un fluido, la cual es reflejada al incidir en un medio de diferente densidad (fondo

marino, partículas en suspensión y organismos entre otros). La señal reflejada es captada en el barco o unidad receptora. La ecosonda registra el tiempo (t) que demoran las ondas acústicas en regresar para posteriormente transformar la información en distancias verticales o profundidades (d), mediante la relación  $d= vt$ . Dado que la velocidad (v) del sonido en un fluido dependen de la temperatura, la salinidad y la presión del mismo, estas propiedades deben conocerse con exactitud a fin de poder interpretar los datos obtenidos del estudio (Turekian, 1979).

La información obtenida del sondeo batimétrico y el caminamiento fue procesada con los programas de cómputo *MATLAB 7.6.0.* y *Surfer 8* para generar una carta batimétrica, la cual representa la configuración topográfica del fondo marino. Las características de la carta batimétrica son representadas por medio de líneas de igual profundidad, conocidas como isóbatas.



**Figura 3.** Ejemplificación del funcionamiento de una ecosonda para la obtención de valores de profundidad de un cuerpo de agua ideal.

El control de calidad de los datos de profundidad se llevó a cabo en una hoja de cálculo *Excel 97-2003 Workbook*, mientras que el procesamiento y graficado de las isobatas en *Surfer 8*. Este mismo procedimiento se realizó a la línea de costa proporcionada por la SEMAR. Con el propósito de obtener una caracterización más detallada del fondo marino se utilizó un intervalo de clase de un metro entre isóbatas.

La determinación de la pendiente y la distancia real entre las isóbatas se realizó mediante el método manual y el método computacional. El método manual consiste en medir con ayuda de reglas graduadas (30 cm) la distancia entre las isóbatas; seguido de ello y contándose con la escala del mapa se realizó un cálculo matemático (regla de tres) para su determinación. La metodología computacional se obtuvo por medio del shareware *OziExplorer* para *GPS* s, el cual permite obtener distancias con el uso de mapas georeferenciados. Es importante mencionar que la relación existente entre la distancia y la pendiente es inversamente proporcional.

La presencia de mantos de algas (*Macrosystis pirifera*) en la región suroeste de Punta San Telmo dificultó la toma de datos de la ecosonda para la obtención de los rasgos batimétricos de la bahía, ya que no permitieron completar el transecto previamente establecido. Debido a esto, entre las isóbatas 9 y 11, en la región SW y NW de Punta San Telmo la batimetría presenta diversas anomalías. De la misma manera resulta importante mencionar que no fue posible obtener mayor detalle de las isóbatas menores a los 3 m, debido a las complicaciones que presenta la toma de datos en la zona de rompiente.

## 2.2. Oleaje

El oleaje se midió utilizando dos distintos equipos oceanográficos. Para la primera campaña oceanográfica (Abril-2007) se utilizó un Perfilador Acústico Doppler (ADP) marca *Sontek* modelo *Argonauta XR* Unidireccional. El equipo fue programado para obtener 1200 datos con un intervalo en tiempo entre dato y dato de 0.5 s por 10 min cada hora.

Para las tres campañas restantes (Junio y Noviembre 2007, y Febrero 2008) se utilizó un corrientímetro-olómetro marca *Interocean* modelo *S4A v 5.056*, con capacidad de medir al mismo tiempo corrientes y oleaje (modo dual) con registros bidireccionales. El equipo cuenta con una capacidad de memoria de 20 mb y 2 hz de frecuencia, fue programado para grabar 2160 datos con un intervalo de muestreo de 0.5 s a lo largo de un periodo de 18 min cada 6 hrs. Esta última programación es debida a que el oleaje en la costa oeste de Baja California presenta parámetros similares en un aproximado de 6 a 8 horas, registrándose así las variaciones significativas que sufre el oleaje a lo largo de un día.

Se encontraron diversas diferencias al registrar y reportar los datos para ambos aparatos. El *Argonauta* registra en su base de datos brutos únicamente valores de altura significativa ( $H_s$ ) y periodo del pico espectral ( $T_p$ ), sin embargo, su mayor desventaja radica en no poder registrar la dirección de arribo del oleaje. A diferencia del *S4A* que registra un número mayor de parámetros estadísticos, incluyéndose cuatro distintas alturas y cinco diferentes periodos (Tabla III), así como la desviación estándar de cada uno. Al tener características de modo dual, el instrumento puede registrar la dirección de arribo del oleaje

( $\theta$ ). En ambos casos sólo fueron tomadas en consideración la altura significativa ( $H_s$ ) y periodo del pico espectral ( $T_p$ ) para su análisis, y sólo para el *S4A* se trabajó con direcciones de arribo del oleaje.

**Tabla III.** Parámetros oceanográficos del oleaje obtenidos de los registros del *S4A*, para Bahía Colonet, B.C.

	<i>Parámetro</i>	<i>Definición</i>
<b>Altura de ola</b>	$H_s$	Altura significativa: promedio de la tercera parte de las olas más altas.
	$H_{av}$	Altura promedio de todos los registros.
	$H_{10}$	Altura un décimo: se utiliza el último décimo de las alturas de ola máximas.
	$H_{max}$	Registro de las alturas máximas.
<b>Periodo de ola</b>	$T_p$	Periodo del pico espectral*.
	$T_s$	Periodo significativo: promedio de la tercera parte de los periodos de ola más altos.
	$T_z$	Periodo de cruces por cero.
	$T_c$	Periodo promedio de crestas.
	$T_{max}$	Registro de los periodos máximos.

Los datos de oleaje obtenidos con el *S4A* y el *Argonauta* fueron procesados con el software *MATLAB v 7.6.0.*; este procedimiento consiste en eliminar los datos incompletos o erróneos (o NAN's, No Datos) y colocar los datos restantes en orden cronológico. Para definir la distribución de frecuencias del oleaje se construyeron histogramas de frecuencia e histogramas de porcentaje de ocurrencia para  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ . Para observar el comportamiento

de cada variable en función del tiempo se realizaron series de tiempo para las tres variables durante las cuatro campañas de muestreo. Las series de tiempo permiten observar la variación de cualquier parámetro en función del tiempo, y son de utilidad para la localización temporal de eventos puntuales y la relación existente con otros fenómenos ocurridos durante el mismo lapso de tiempo.

Se realizaron dos tipos de comparaciones usando series de tiempo. La primera comparación consistió en colocar los cuatro registros de altura en una misma gráfica, así como los cinco registros de periodo, con la finalidad de observar el comportamiento y las diferencias existentes entre las distintas frecuencias registradas de un mismo parámetro. Este procedimiento sólo se realizó en el caso de datos del *S4A*, debido a la capacidad del equipo de registrar diversas frecuencias del oleaje. La segunda comparación se realizó con los tres parámetros más importantes del oleaje en este trabajo ( $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ ). Este método de comparación se llevó a cabo colocando la serie de tiempo de cada variable en una misma figura. Para los datos del *Argonauta* sólo fue posible comparar las gráficas de  $T_p$  y  $H_s$ , debido a la falta de registros de dirección del oleaje por ser unidireccional el equipo. Dicho método de comparación, permite observar el comportamiento de las distintas variables del oleaje durante un mismo periodo de muestreo y analizar si existe cualquier relación entre ellas.

La dirección de arribo del oleaje se determinó mediante la generación de diagramas de rosa utilizando el programa *MATLAB v 7.6.0*. Los diagramas de rosas se generaron para mostrar la frecuencia de dirección con respecto al norte, así como histogramas de porcentaje de ocurrencia y series de tiempo. Esto sólo se realizó en las campañas en las cuales se contó con datos de dirección de oleaje (*S4A*).

Los parámetros estadísticos de los registros de oleaje se calcularon por medio de hojas de cálculo de *Excel 97-2003 Workbook* y *MATLAB v 7.6.0*. La información estadística incluye los valores máximos y mínimos, la media y la desviación estándar de todos los parámetros para todo el periodo de muestreo. Una vez obtenida la estadística se analizaron los datos de manera conjunta para establecer las principales características y comportamiento del oleaje en Bahía Colonet, B. C.

### **2.3. Refracción**

Es necesario reiterar que la refracción aunada al someramiento del oleaje (efecto producido en las ondas al reducirse notablemente la profundidad del fondo marino) en la zona costera, determina la altura de onda en un determinado punto, con la finalidad de comprender un frente de ondas entrante y cuyas características se conocen en aguas profundas (dirección de propagación, altura y período). En otras palabras, el fenómeno de refracción es definido como el cambio de dirección, altura y velocidad del frente de onda cuando las ondas viajan de un medio a otro de profundidad diferente aunado a la fricción de éste con el fondo marino, de tal forma que tiende a quedar paralelo a la línea de playa (Cruz, 1983). Por esto la determinación de la refracción resulta indispensable en la ingeniería marítima. La velocidad de una onda resulta directamente proporcional a la profundidad del medio donde ésta se propaga, esto es, la velocidad de la onda decrece al disminuir la profundidad.

La dirección de propagación de una ola puede señalarse por una línea perpendicular a la cresta de la onda. Esta línea llamada ortogonal puede trazarse empleando una metodología

manual (USACE, 1984) o una técnica numérica por medio del uso de programas computacionales (Ulloa, 1989), por lo tanto resulta indispensable conocer la dirección en que se aproxima el oleaje a la zona de interés para la determinación del fenómeno de refracción. Como se mencionó anteriormente, este fenómeno tiene una influencia significativa sobre la altura de onda y el cambio en la dirección de propagación de la onda en diferentes segmentos de la misma, esta variación tiene como resultado la convergencia o divergencia de la energía de la onda y materialmente determina la fuerza que ejercerán las olas sobre la línea de costa y/u obras marítimas (Figura 4). Este fenómeno contribuye de manera considerable en la modificación de la batimetría debido a la erosión y/o depositación de los sedimentos en la playa.

La refracción se analizó a lo largo de la línea de costa por medio de la aplicación de los principios de la Ley de Snell y del uso de contornos paralelos de mar profundo, empleándose la siguiente fórmula:

$$\text{sen } \alpha = \left( \frac{C}{C_0} \right) \text{sen } \alpha_0$$

Donde:

$C_0$  y  $C$  = velocidad del oleaje en aguas profundas y someras respectivamente.

$\alpha$  = ángulo entre la cresta y la línea de costa.

$\alpha_0$  = ángulo entre la profundidad en la cresta de la onda y la línea de costa.

Se calculó la longitud de onda y la profundidad a la que empieza a refractarse el oleaje seleccionado, por medio de las siguientes fórmulas:

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi}$$

$$d = \frac{Lo}{2}$$

Donde:

Lo = longitud de onda en aguas profundas [m].

g = gravedad [m/s].

T = periodo [s].

d = profundidad [m].

Trazadas las ortogonales se analizó la dirección de aproximación del oleaje además de calcular los coeficientes de refracción ( $K_r$ ) utilizados para determinar la concentración o disipación de la energía del oleaje en la zona.

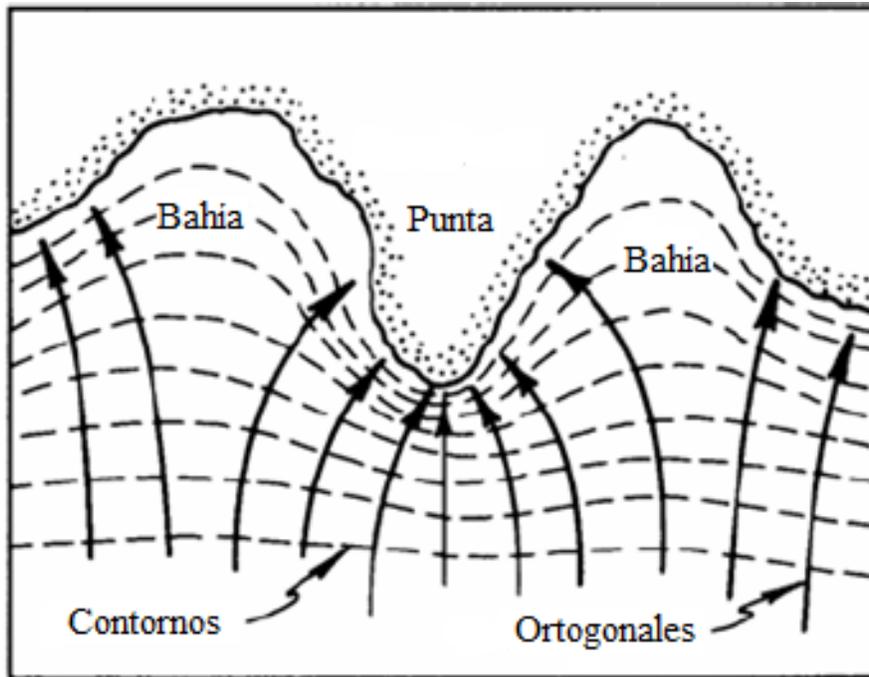
$$Kr = \sqrt{\frac{b_0}{b}}$$

Donde:

$b_0$  y  $b$  = distancia media entre dos ortogonales consecutivas en aguas profundas y someras respectivamente.

Para poder determinar la refracción, se generó con anterioridad el levantamiento batimétrico y el análisis estadístico del oleaje.

El método manual de refracción del oleaje utilizado en el presente trabajo es conocido como “refracción por batimetría” de O’Brien (1942, citado por *USACE*, 1984). Esta metodología hace uso de una plantilla de refracción apoyada con información de un mapa batimétrico de la zona de estudio. Sobre el mapa se trazan las ortogonales que determinarán el patrón de refracción, basadas en información obtenida del análisis estadístico del oleaje.



**Figura 4.** Comportamiento de un tren de ondas al acercarse a la línea de costa y ser modificado por su batimetría (líneas segmentadas) produciéndose el fenómeno de refracción. Las flechas (ortogonales), muestran que al reducirse la distancia entre ellas se presentará la convergencia (parte central) y al alejarse una de la otra se obtendrá la divergencia de las ortogonales (parte interna de las bahías), determinando así la distribución de la energía (Tomada y modificada de *USACE*, 1984).

La determinación del fenómeno de refracción por medio de la metodología manual se realizó usando los siguientes casos: caso 1 (suroeste) oleaje con dirección  $210^\circ$ , periodo 13.5 s y altura de 3.07 m; caso 2 (noroeste) oleaje con dirección  $300^\circ$ , periodo 14 s y altura de 3.07. El trazo de las ortogonales para ambos casos fue equidistante con una separación entre ortogonales de 4 cm (597 m) con dirección SW y 2 cm (298.5 m) para la dirección NW, para el trazo de éstas se utilizó un juego de escuadras graduadas. En la determinación de ambos casos se utilizó la altura de ola máxima registrada en todo el estudio (3.07 m), siendo esto en base al criterio para determinar la altura de ola de diseño del rompeolas en el cual se hace uso del mayor registro de altura con el fin de proporcionar información que sirva como apoyo en el desarrollo del puerto que se pretende construir en Bahía Colonet. El

criterio en la elección de la dirección de arribo para el caso 1, fue basado en la dirección de arribo más recurrente de ese cuadrante.

A través de la estadística general del oleaje (Tabla IV) no fue posible obtener registros frecuentes con dirección del NW, por tanto la elección de la dirección de arribo para el caso 2 se basó en lo reportado por Téllez (2003) y Rendón (2006). Ambos autores hacen uso de direcciones predominantes del NW ( $300^\circ$ ) aplicadas en la obtención de la refracción para el diseño de rompeolas en la Bahía de Todos Santos.

Alternativa a la refracción manual, se realizó un procedimiento que combinó la metodología manual y computacional, siguiéndose los principios de la “refracción por batimetría”. El uso de la plantilla fue sustituido por un transportador graduado ( $180^\circ$ ) para el trazo de los ángulos de aproximación del oleaje sobre el mapa de Bahía Colonet (1:15,000). La estadística de la refracción del oleaje se trabajó por medio de una metodología computacional, con el software *Waves v1.0*. Este programa utiliza el principio de la Ley de Snell para la determinación y el cálculo de la refracción. A partir del software *Waves v1.0* se generó una extensa base de datos del cambio paulatino de las características generales de una ola (altura de ola, ángulo de la cresta, longitud de onda, celeridad, velocidad de grupo, energía y fuerza de la ola), al disminuir la profundidad y acercarse a la zona de playa. Esta metodología será mencionada a lo largo de este trabajo como “metodología combinada”.

La refracción obtenida por medio de la metodología combinada (manual-computacional) fue incluida en el texto regular para realizar una comparación entre los dos mapas del patrón de refracción generados.

Para ambas metodologías se utilizó un intervalo de clase o separación entre ortogonales con una medida o número entero evitándose las fracciones, esto con la finalidad de disminuir el posible error en las mediciones y trazos de las ortogonales o rayos. La refracción del oleaje en aguas profundas se realizó con el apoyo de la carta náutica San Diego - Cabo Colnett, proporcionada por la SEMAR.

Al término de la construcción de los patrones de refracción (metodología manual y combinada) se realizó un escaneo de ambos mapas (escala 1:15,000), con la finalidad de obtener imágenes digitales sobre el comportamiento de la refracción del oleaje a lo largo de Bahía Colonet.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Batimetría**

La batimetría de la bahía muestra una configuración morfológica muy irregular debido a los constantes cambios en los contornos batimétricos (Figura 5). Gracias a la cambiante separación entre las isóbatas, fue posible definir tres zonas en el mapa batimétrico con las mayores pendientes entre éstas; la primera comprendió toda la zona NE de Punta Colonet (PC) cercano a la línea de playa entre las isóbatas 3 y 12 con una distancia de 0.55 km; la segunda se localizó al SW de Punta San Telmo ubicada entre las isobatas de 5 y 10 a una distancia de 0.4 km; en el NW de Punta San Telmo (PST) se localizó la tercera zona ubicada entre las isóbatas de 3 y 8 m con una distancia de 0.5 km. Las tres zonas resultaron

similares en sus valores, presentándose la pendiente más abrupta en la región SW de PST ( $\sim 57^\circ$ ), seguida por la región NE de Punta Colonet ( $\sim 56^\circ$ ) y por último la región NW de PST ( $\sim 49^\circ$ ).

Referente a pendientes suaves se observaron tres zonas de importancia, localizándose al NW de Punta San Telmo entre las isóbatas 9 y 10 ( $\sim 0.7$  km) la zona con menor pendiente de toda la bahía ( $\sim 4^\circ$ ). Al SE de Punta Colonet (entre las isóbatas 14 y 22) se muestra la zona con la pendiente suave más prolongada de toda la bahía (3.6 km), así como con una pendiente de  $\sim 7^\circ$ . La zona SW de PST presenta una pendiente menos pronunciada ( $\sim 6^\circ$ ), observándose una superficie con una menor distancia entre las isóbatas 10 y 11 ( $\sim 0.55$  km). En ambas zonas de PST se localizaron grandes mantos de algas, siendo la región SW la que mayor cobertura de algas presentó en la bahía. Es importante mencionar que la máxima profundidad registrada en este estudio se presentó en la región al S-SW de la bahía (28 m) a una distancia de  $\sim 4.95$  km de la línea costa de PST (Para pendientes consultar Anexo 1).

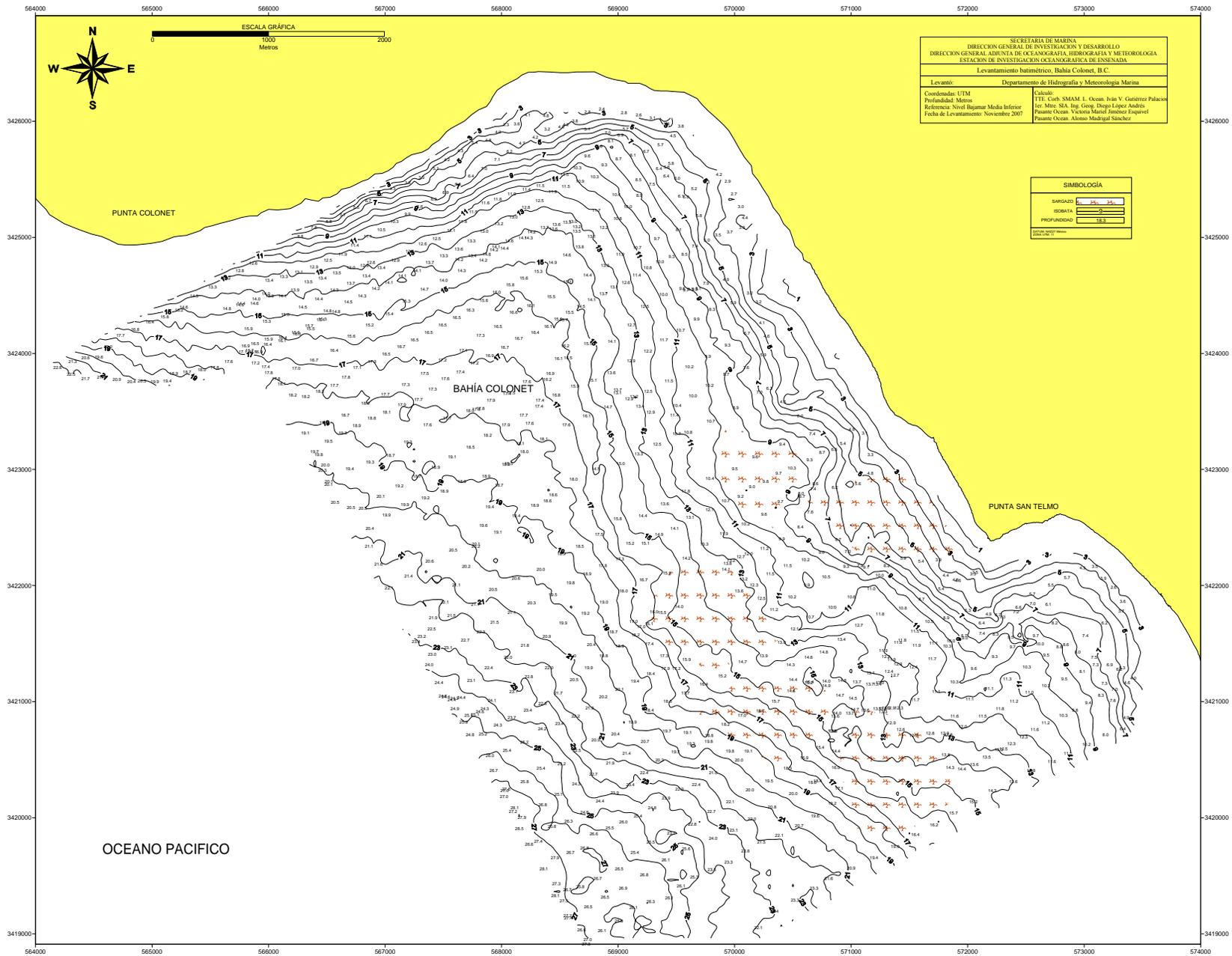


Figura 5. Levantamiento batimétrico de Bahía Colonet, realizado con una Ecosonda Raytheon modelo DE719 (generando 2 datos cada segundo).

## 3.2. Oleaje

### 3.2.1. Series de tiempo

Las series de tiempo de la altura significativa (Hs) durante las cuatro campañas mostraron grandes variaciones (Figura 6). En la primer campaña (Figura 6A) se presentaron dos incrementos por encima de los 2 m; el primero, con valores cercanos a los 2.4 m, el cual se presentó hacia finales del mes de abril; el segundo, a principios de mayo presentó valores ligeramente mayores a los 2 m. Antecediendo a cada incremento se presenta un decremento en la altura de ola por debajo de los 0.8 m.

El comportamiento de Hs en abril fue similar a septiembre 2007 (Figura 6B), observándose dos valores máximos (1.20 y 1.25 m) y un mínimo ( $\sim 0.7$  m). Las alturas de ola de esta campaña son de menor tamaño.

En noviembre se registraron valores bajos de Hs los cuales varían entre 0.5 m y  $\sim 1.2$ m (Figura 6C). En contraste el rango de Hs a principios del mes de diciembre se incrementó abruptamente registrándose valores  $\sim 0.7$  m hasta  $>3$  m. En este lapso de muestreo se presentaron los valores mínimos ( $\sim 0.5$  m) al igual que el registro promedio más bajo de todo el muestreo ( $\sim 0.93$  m). Al tener los registros de altura más altos y más bajos, este muestreo presenta el mayor rango de distribución de todo el estudio  $\sim 2.5$  m.

En marzo-abril 2008 a diferencia de los tres muestreos anteriores, se presentaron cuatro valores máximos y cuatro mínimos (Figura 6D). Estos últimos con una variación entre 1.2 y  $\sim 0.8$  m; los máximos se observaron por encima de 1.6 m y hasta  $\sim 2.4$  m, al final del

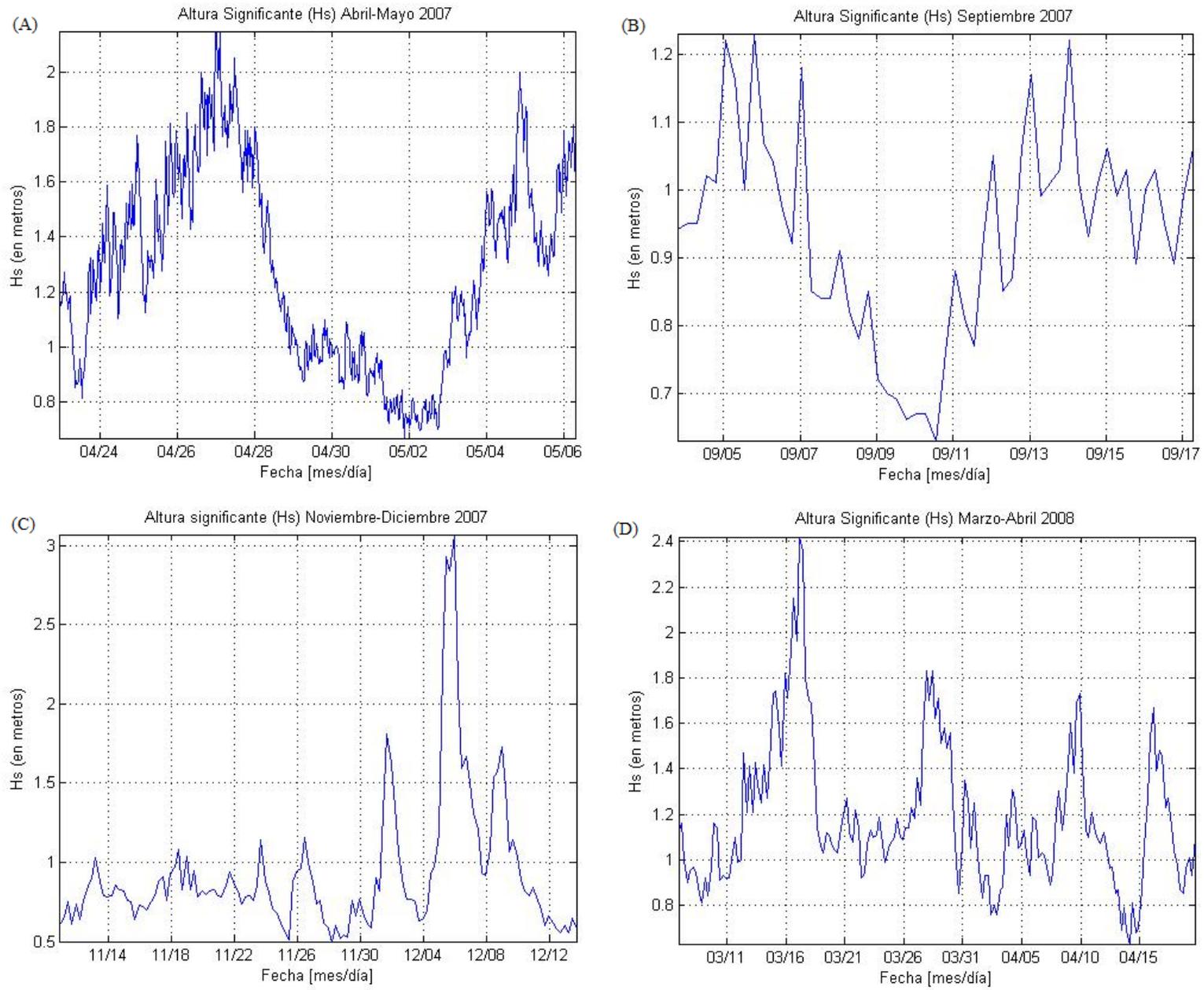
muestreo se presentó un decremento gradual en la Hs con los valores máximos al inicio de marzo y los mínimos hacia el final de abril. El máximo de Hs durante todo el periodo de muestreo (3.07 m) se presentó hacia finales del otoño en el mes de diciembre del 2007 (Figura 6C).

La figura 7 muestra las series de tiempo de los registros del periodo del pico espectral ( $T_p$ ), en las cuales se observa una distribución que va desde 4.3 s hasta ~22 s para las cuatro campañas de muestreo. En abril 2007 se registró en su mayoría oleaje por encima de los 10 s (Figura 7A), así como un periodo máximo de 22.7 s y un rango de distribución de sus valores máximos entre los 22 y 16 s. Existen tres valores mínimos, de los cuales dos presentaron valores por encima de los 12 s y el tercero presentó un valor por debajo de los 8 s (inicios de mayo).

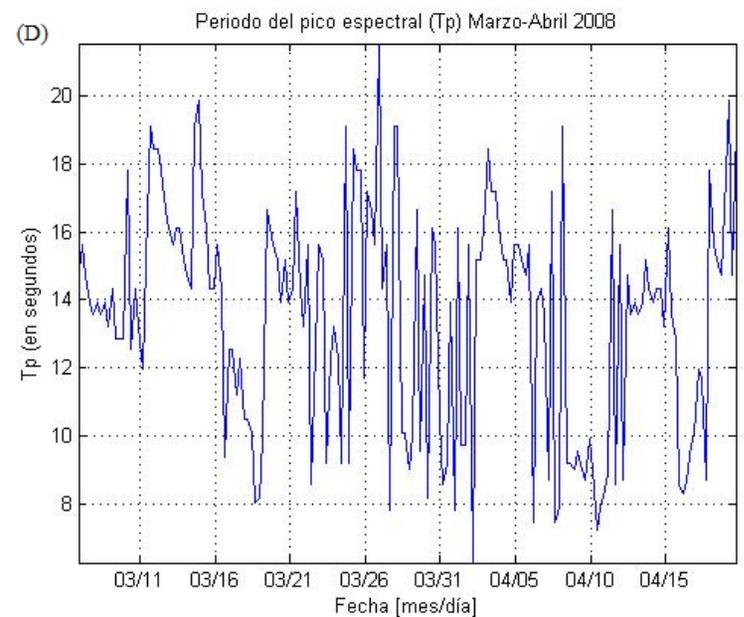
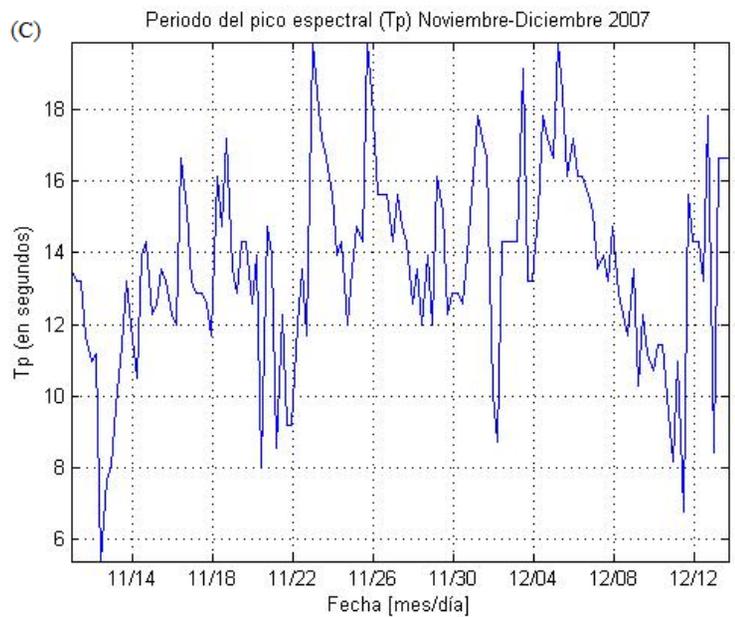
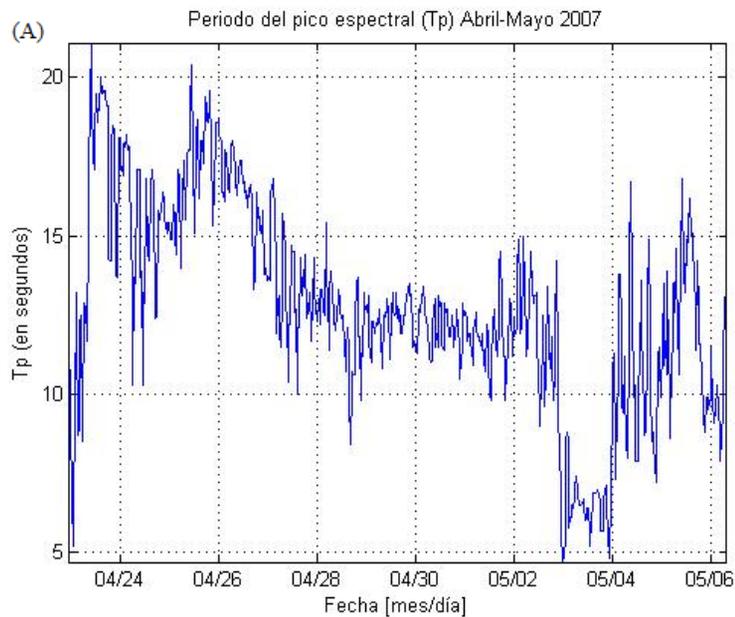
En el mes de septiembre los valores máximos de  $T_p$  se registraron entre 16.5 s y 19.14 s, y los mínimos entre los 6 y 8 s (Figura 7B). En noviembre se presentó una distribución más uniforme de periodos por encima de los 12 s, con tres valores máximos por encima de los 19 s y dos valores mínimos por debajo de los 8 s (Figura 7C).

En marzo-abril 2008 el rango de distribución del  $T_p$  fue entre los 8 y los 20 s, con sólo un valor máximo por encima de los 20 s (Figura 7D). Casi en su totalidad los valores mínimos muestran un rango entre los 10 y 8 s. Sólo fue posible observar un mínimo que superó los 12 s. El periodo máximo de todo el estudio se presentó en abril 2007 con un valor de 22.7 s.

Para conocer las frecuencias del oleaje se realizó una comparación de cuatro parámetros estadísticos del registro de altura de ola (Figura 8), así como de cinco parámetros de periodo del oleaje (Figura 9).



**Figura 6.** Series de tiempo de los registros de oleaje para la altura significativa (Hs) durante todo el año de muestreo (abril 2007- abril 2008).



**Figura 7.** Series de tiempo de los registros de oleaje para el periodo del pico espectral ( $T_p$ ) durante todo el año de muestreo (abril 2007- abril 2008).

En la figura 8 se muestran las gráficas de comparación de los cuatro parámetros de altura, en las cuales se observa de manera general que los parámetros presentan un perfil idéntico en forma en las tres gráficas, pero con diferencias notables en magnitud.

Los parámetros de altura para septiembre 2007 (Figura 8A) mostraron un rango de distribución menor entre 0.4 m y 1.9 m, siendo este muestreo el cual registró la Hmax más baja de todo el estudio (~1.96 m). En noviembre-diciembre 2007 (Figura 8B) se registró la Hmax mayor (~4.5 m), la Hav mínima (0.3 m) y el rango de distribución más extenso de todo el estudio entre 0.3 m y 4.5 m. Para marzo-abril 2008 (Figura 8C), se presentaron cuatro picos que sobrepasaron los 2.5 m, siendo el máximo de 3.7 m. En estas alturas máximas es posible observar un decremento desde un valor mayor a mediados de marzo 2008 hacia un mínimo a mediados de abril del mismo año.

Para el caso de las comparaciones de los cinco parámetros del periodo (Figura 9), en las tres gráficas se observan dos perfiles separados hacia los extremos; uno en la parte superior (Tp) y el otro en la parte inferior (Tc). Ambos parámetros presentan de manera general un perfil similar en su forma siendo Tc el parámetro de menor magnitud, contrario a ello Tp muestra el registro mayor. Los parámetros restantes (Tmax, Ts y Tz) presentaron valores muy cercanos, así como un perfil similar agrupándose éstos en la región central de las gráficas. Este patrón de distribución se observó en las tres graficas de comparación del periodo.

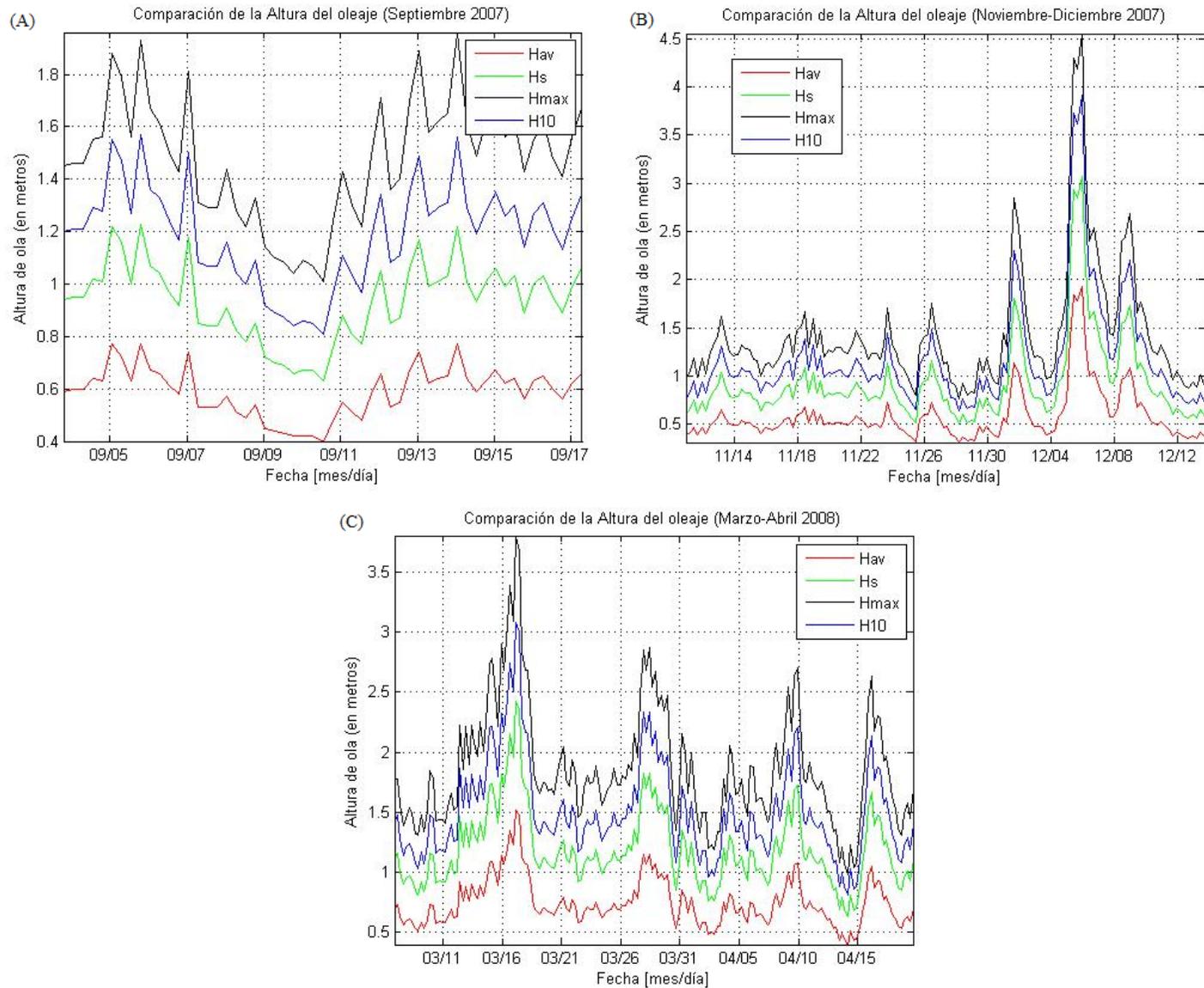
El rango de distribución del periodo osciló entre los 4 y 19 s para los muestreos de septiembre y noviembre-diciembre del 2007 (Figuras 9 A y B), y entre 4 y ~22 s para marzo-abril del 2008 (Figura 9C).

Los valores máximos de periodo se encuentran hacia finales de marzo 2008, con valores por encima de los 22 s (Figura 9C).

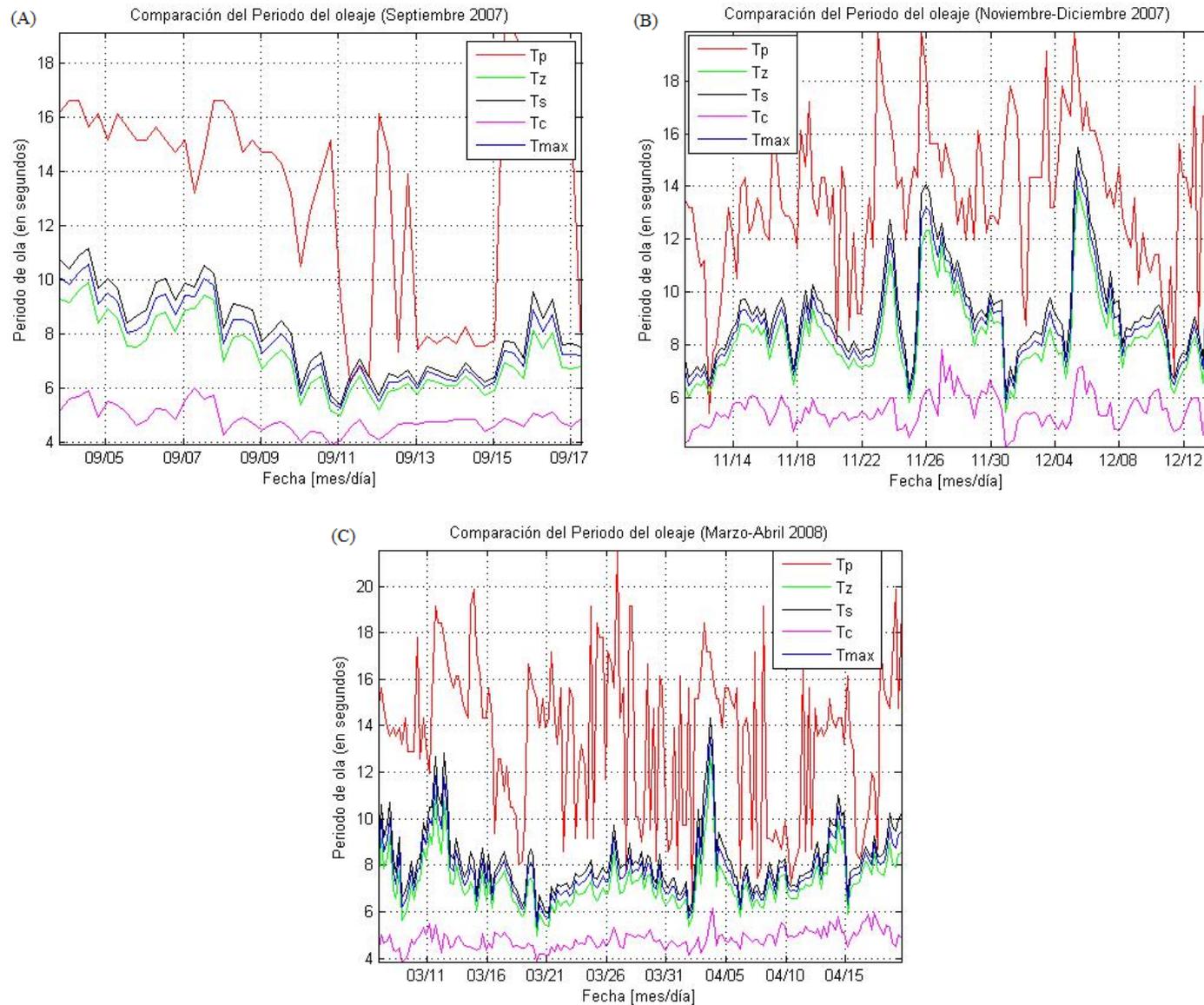
Este mismo procedimiento de comparación de las series de tiempo se llevó a cabo con los parámetros Hs, Tp y  $\theta$ , para las tres campañas con datos obtenidos del equipo *Interocean* modelo *S4A v 5.056* (Figura 11).

La comparación de las series de tiempo para el muestreo de abril-mayo del 2007 sólo fue posible realizarla para los parámetros Hs y Tp debido a las características del equipo Perfilador Acústico Doppler (ADP) marca *Sontek* modelo *Argonauta XR* con el cual fueron tomados los datos. En esta campaña sólo se pudo observar la relación existente entre las Hs alrededor de 1 m y por debajo del mismo, asociadas con Tp entre los 10 y 15 s (Figura 10). Los dos máximos de altura Hs por encima de 1.5 m (27 de abril y 5 de mayo) presentan una relación con los valores de Tp mayores de 12 s en esta campaña.

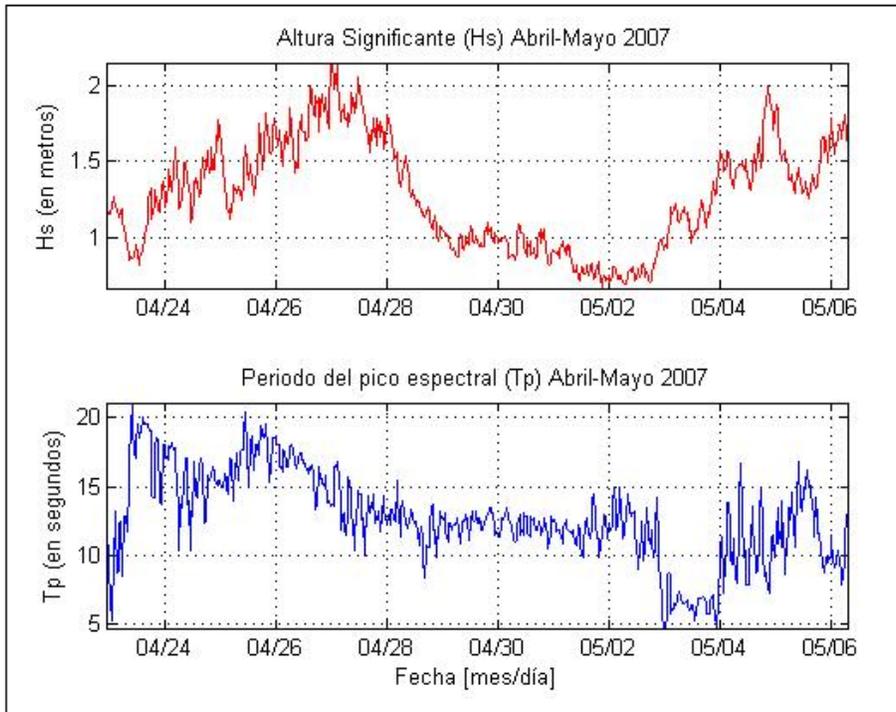
En la figura 11 se puede observar el menor valor de Hs por debajo de los 0.8 m asociada a un Tp entre 14 y 16 s, y a una dirección de arribo del NE cercana a los 50°; este evento fue registrado entre el día 10 y 11 de septiembre. El día 14 de septiembre presenta un valor máximo de Hs de 1.23 m, el cual está asociado con una dirección de arribo cercana a los 100° y a un Tp menor a los 8 s. Los perfiles del periodo y la dirección de arribo muestran una gran similitud en su forma principalmente después del día 9 de septiembre, en el que se observa que con cada valor menor a 8 s hay un valor de dirección de arribo menor a 100°; y cada valor de periodo mayor a 12 s concuerda con un valor de dirección de arribo mayor de 150°.



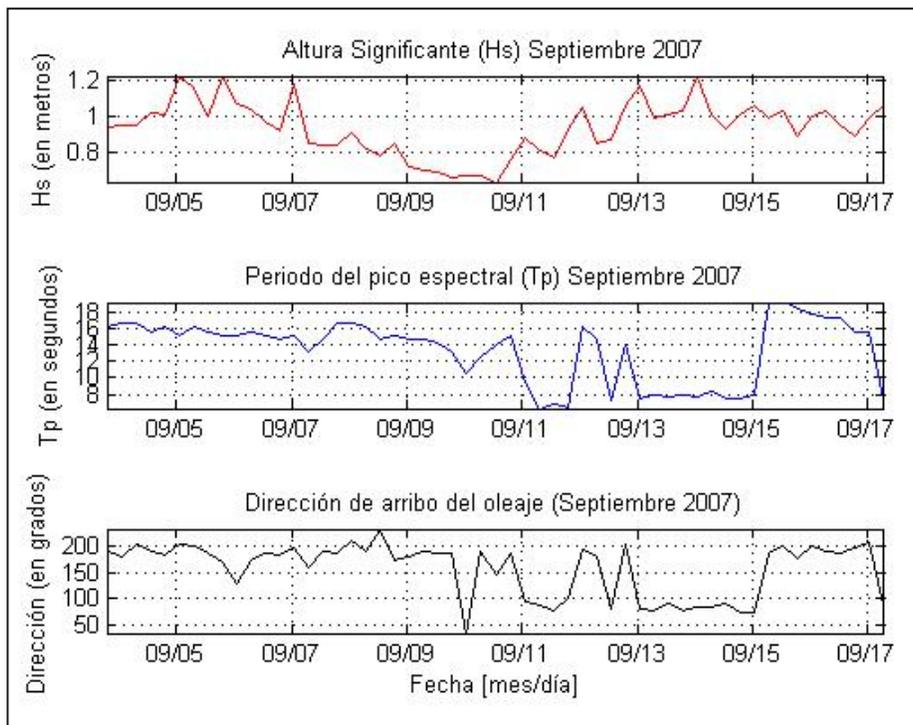
**Figura 8.** Comparación de las series de tiempo de los cuatro parámetros estadísticos del registro de altura de ola Hav, Hs, Hmax y  $H_{10}$ , obtenidos a partir del corrientímetro-olómetro *Interocean* modelo *S4A v 5.056*. (A) Gráfica de alturas de septiembre 2007. (B) Gráfica de alturas de noviembre-diciembre 2007. (C) Gráfica de alturas de marzo-abril 2008.



**Figura 9.** Comparación de las series de tiempo de los cinco parámetros estadísticos del registro de periodo de ola  $T_p$ ,  $T_z$ ,  $T_c$ ,  $T_s$  y  $T_{max}$ , obtenidos a partir del corrientímetro-olómetro *Interocean* modelo *S4A v 5.056*. (A) Gráfica de periodos de septiembre 2007. (B) Gráfica de periodos de noviembre-diciembre 2007. (C) Gráfica de periodos de marzo-abril 2008.

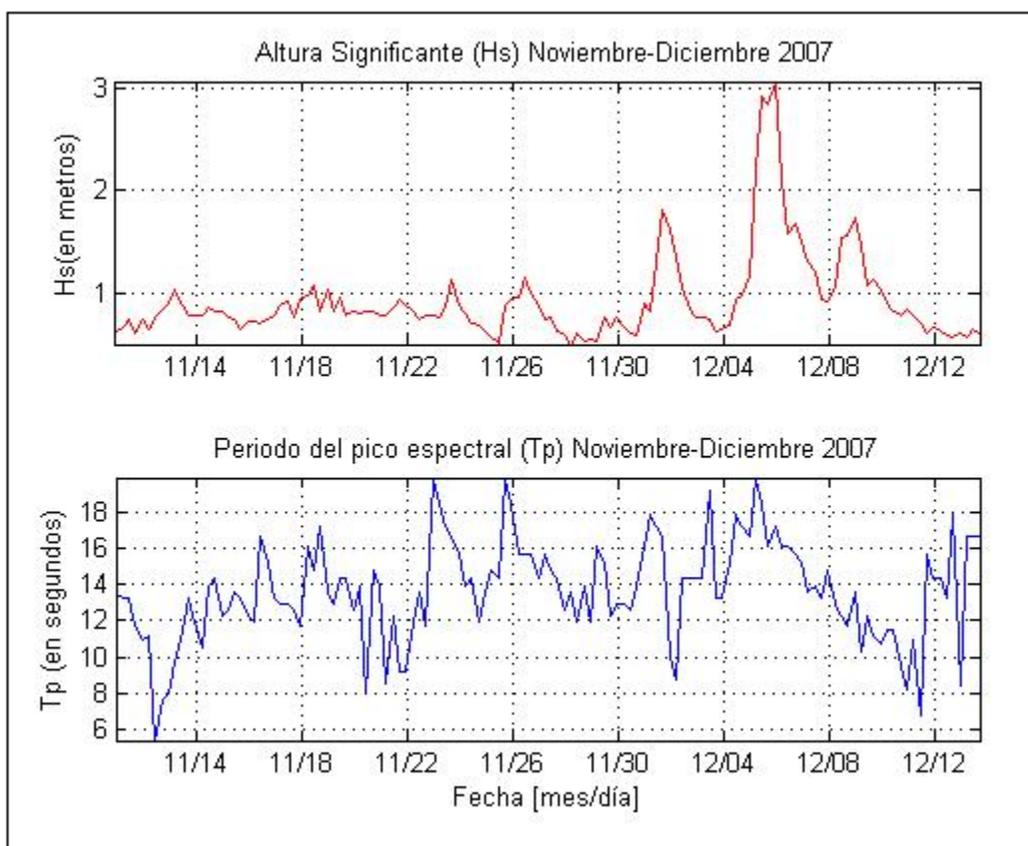


**Figura 10.** Comparación de series de tiempo de los parámetros Hs y Tp para abril-mayo 2007, usando datos del Perfilador Acústico Doppler (ADP) marca *Sontek* modelo *Argonauta XR*.



**Figura 11.** Comparación de series de tiempo de los parámetros Hs, Tp y  $\theta$  para septiembre 2007, usando datos del corrientímetro-olómetro *Interocean* modelo *S4A v 5.056*.

Los registros de Hs de noviembre-diciembre del 2007 presentan tres valores máximos (Figura 12). El primero y el tercero con alturas entre 1.5 y 2 m (2 y 9 de diciembre, respectivamente), asociadas con un Tp por debajo de los 12 s. El segundo grupo de valores de altura más sobresaliente (~3 m) se presentó entre el 5 y 6 de diciembre asociado con un periodo entre los 16 y 20 s. Contrario a los tres valores máximos, se observan tres eventos en los días 12 y 20 de noviembre, y 11 de diciembre, en los cuales se muestran valores de periodo ~8 s o menores asociados con valores de altura de ola menores a 0.84 m.

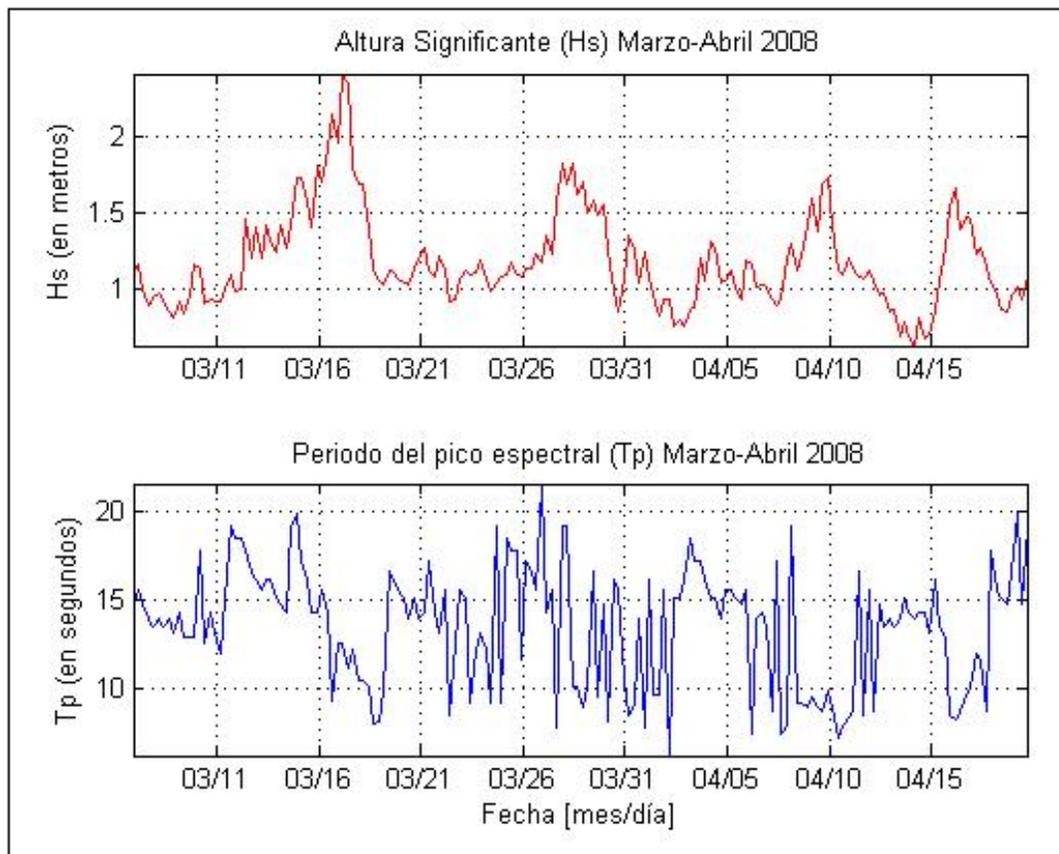


**Figura 12.** Comparación de series de tiempo de los parámetros Hs, Tp y  $\theta$  para noviembre-diciembre 2007, usando datos del corrientímetro-olómetro *Interocean* modelo S4A v 5.056.

En marzo-abril del 2008 se registraron cuatro valores máximos de Hs, los cuales son asociados con valores de Tp cercanos y/o menores a los 10 s (Figura 13). Antecediendo a

cada valor máximo de  $H_s$  se observan valores de  $H_s$  menores a  $\sim 1.3$  m, asociados con periodos ( $T_p$ ) entre 13 y 17 s.

Es importante mencionar que debido a la incongruencia en los datos, las gráficas de dirección de arribo de la campaña de noviembre-diciembre 2007 y marzo-abril 2008 fueron descartadas, analizándose únicamente la dirección de arribo de septiembre 2007.



**Figura 13.** Comparación de series de tiempo de los parámetros  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$  para marzo-abril 2008, usando datos del corrientímetro-olómetro *Interocean* modelo *S4A v 5.056*.

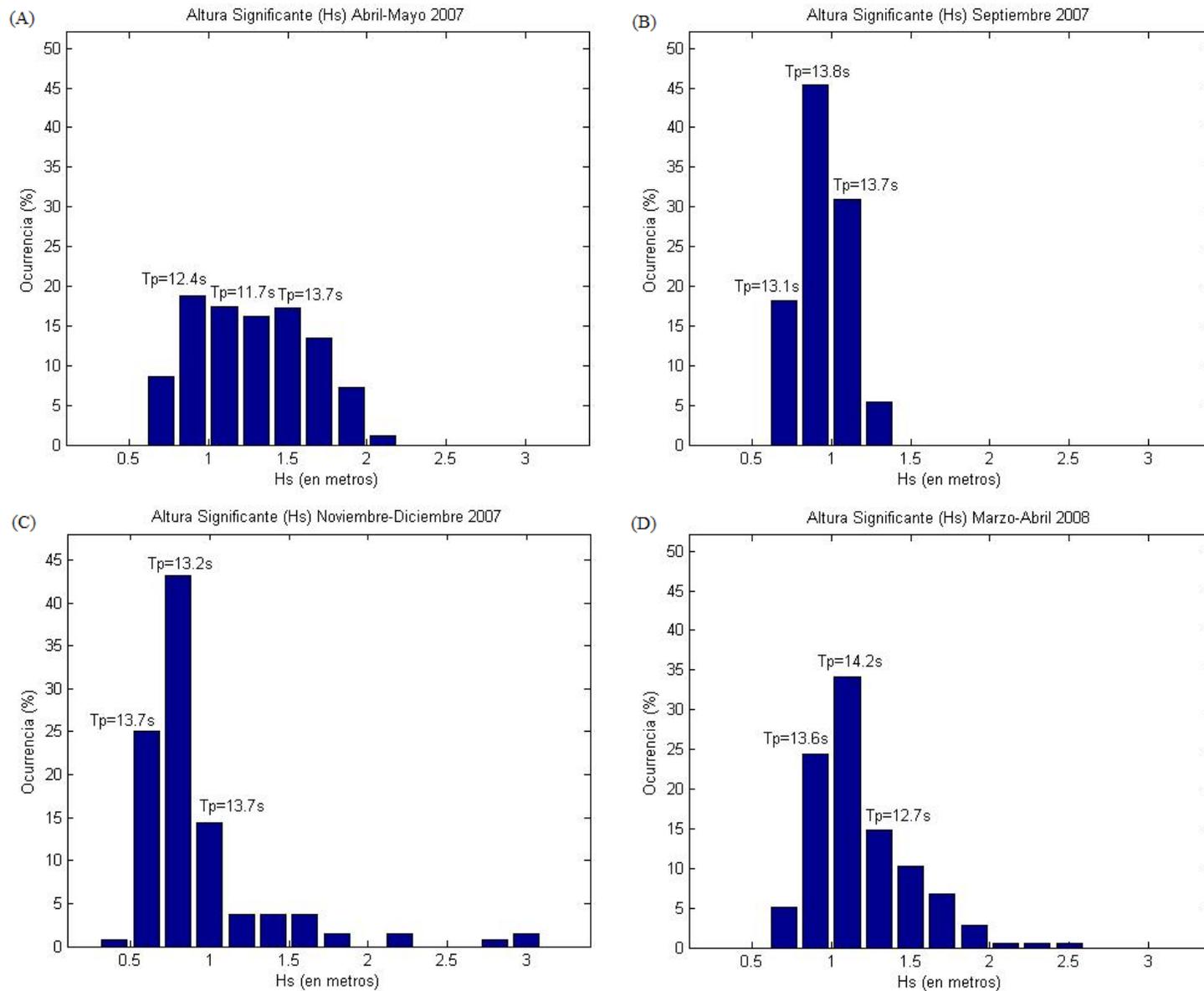
### **3.2.2. Histogramas de Hs y Tp**

Con la finalidad de determinar la distribución de los parámetros de altura significativa (Hs) y periodo del pico espectral (Tp), se construyeron los histogramas de frecuencia para cada parámetro de las cuatro campañas (Figuras 14 y 15 respectivamente).

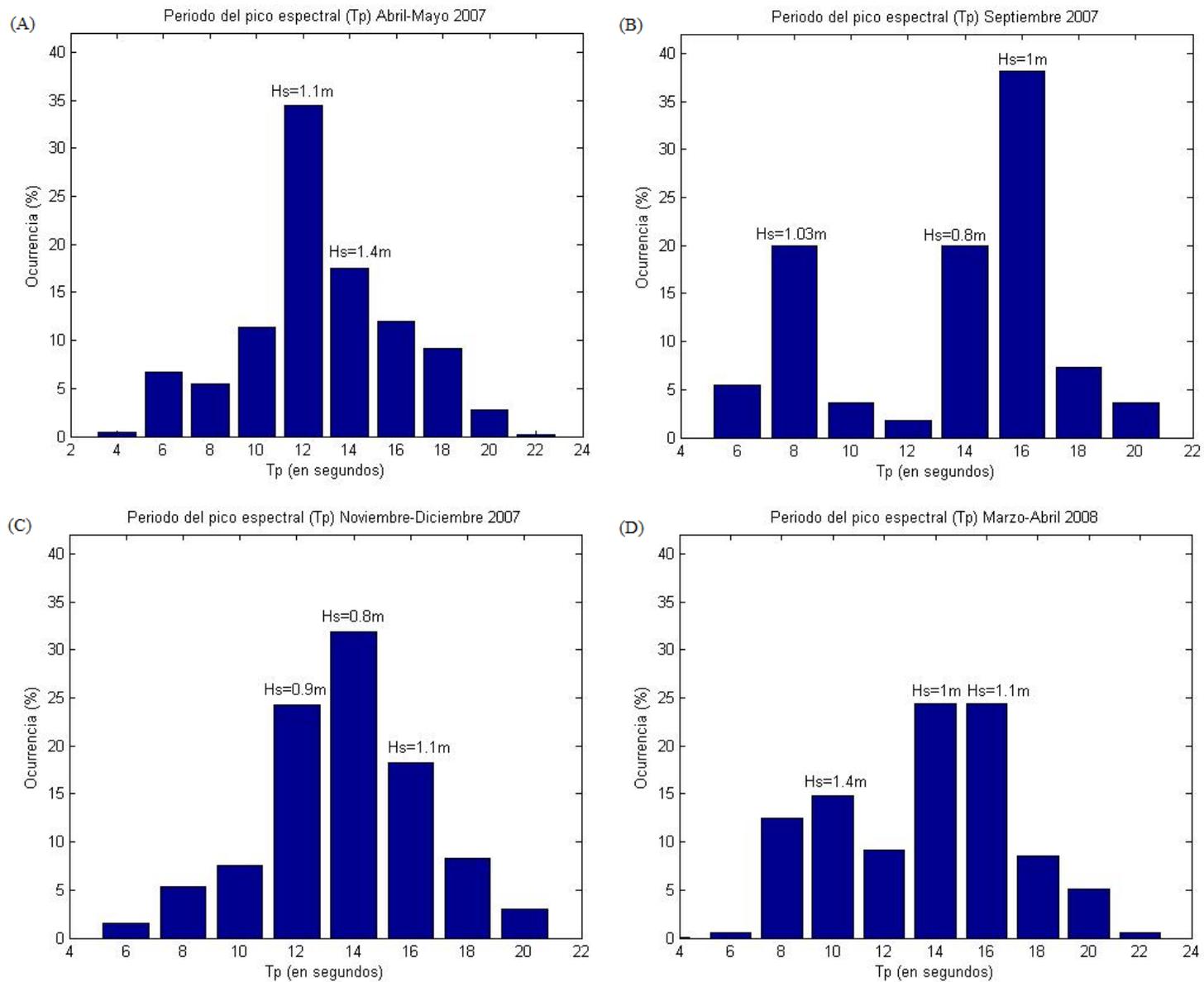
Los histogramas de frecuencia para Hs en abril-mayo 2007 muestran un máximo de 19% aproximadamente para el intervalo de clase 0.8-1.0 m, y de manera conjunta más del 60% de los datos se presentan desde el intervalo de clase 0.8-1.0 m hasta 1.4-1.6 m (Figura 14A). En septiembre 2007 se presenta cerca del 45% del total de los datos en el intervalo de clase 0.8-1 m, seguido por el intervalo de clase 1-1.2 m con alrededor del 30% (Figura 14B). Para finales de otoño 2007 se reportó cerca del 45% de los datos totales en el intervalo de clase 0.7-0.9 m, y un 25% en el intervalo de clase 0.5-0.7 m (Figura 14C). En el muestreo de marzo-abril 2008 se presentó un máximo alrededor del 35% para un intervalo de clase de 1-1.2 m, así como un valor menor a 25% en el intervalo de clase de 0.8 -1 m (Figura 14D).

La distribución de los registros de las alturas máximas y mínimas, presentan valores desde 0.6 m hasta 2.6 m para abril 2007 y marzo-abril 2008; septiembre presentó valores desde 0.6 m hasta 1.25 m; y en noviembre se registraron los valores más extremos desde 0.5 m hasta ~3 m. Los intervalos de clases utilizados para las gráficas de Hs fueron cada 0.2 m (Figura 14).

Los histogramas de periodo del pico espectral (Tp) se muestran en la figura 15. En abril-mayo 2007 se presenta su valor máximo en el intervalo de clase de 11-13 s con un 35% del



**Figura 14.** Histogramas de frecuencia por porcentaje de ocurrencia de la altura significativa (Hs). El número superior de cada barra corresponde al valor del periodo del pico espectral (Tp) promedio correspondiente a cada intervalo de clase. (A) Abril-mayo 2007. (B) Septiembre 2007. (C) Noviembre-diciembre 2007. (D) Marzo-abril 2008.



**Figura 15.** Histogramas de frecuencia por porcentaje de ocurrencia del periodo del pico espectral ( $T_p$ ). El número superior de cada barra corresponde al valor de altura significativa ( $H_s$ ) promedio correspondiente a cada intervalo de clase. (A) Abril-mayo 2007. (B) Septiembre 2007. (C) Noviembre-diciembre 2007. (D) Marzo-abril 2008.

total de los datos; menor al 20% se observa en el intervalo de clase de 13-15 s (Figura 15A). Septiembre 2007 presenta un 37% del total de los datos aproximadamente, en el intervalo de clase 15-17 s, también se observan dos barras con valores similares cercanos al 20% en los intervalos de clase 7-9 s y 13-15 s (Figura 15B). Para la campaña de noviembre-diciembre 2007 el intervalo de clase de 13-15 s representa aproximadamente un 32% del total de los datos (Figura 15C). Por debajo de este porcentaje observamos dos barras con valores de consideración; la primera con un valor menor al 25% en el intervalo de clase 11-13 s; y la segunda, menor al 20% del total en el intervalo de clase 15-17 s (Figura 15C). El 50% de los datos de marzo-abril 2008 muestran valores entre los intervalos de clase 13-15 s y 15-17 s; y el 25% para valores con intervalos de clase 9-11 s (Figura 15D).

Se utilizó un intervalo de clase de 2 s para las cuatro gráficas de  $T_p$ , en promedio el rango de distribución de los valores del  $T_p$  oscila entre los 3 y 23 s para todo el estudio.

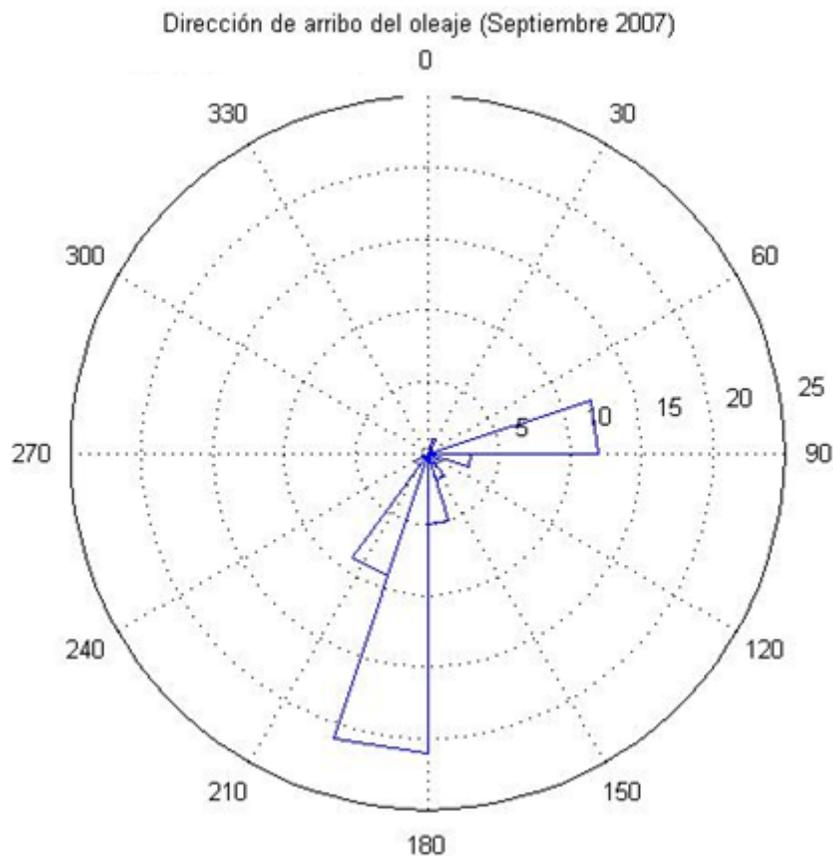
Cabe resaltar que los valores de  $H_s$  con el mayor porcentaje de ocurrencia son de  $\sim 1$  m (Figura 14), mientras que los valores de  $T_p$  presentan su mayor porcentaje de ocurrencia entre los 11 y 15 s (Figura 15). Corroborando lo anterior, los valores promedio de  $H_s$  y  $T_p$  colocados en la parte superior de las barras más representativas de ambas figuras (14 y 15), coinciden con el porcentaje máximo correspondiente de cada histograma.

### ***3.2.3. Dirección de arribo del oleaje***

No existen registros de dirección de arribo del oleaje que cubra el año completo de muestreo, por tanto, la finalidad del análisis de los datos arrojados en este apartado es proporcionar una estimación del arribo y comportamiento del oleaje.

### 3.2.3.1. Rosa de oleaje

Las gráficas en rosa permiten observar todos los componentes de dirección de un registro de oleaje, determinándose así la dirección de arribo predominante. La dirección de arribo del oleaje en Bahía Colonet se construyó por medio de histogramas de frecuencia de ocurrencia en forma de rosas de oleaje (Figura 16), este procedimiento sólo fue posible llevarlo a cabo para los tres registros de dirección del S4A.



**Figura 16.** Determinación de la dirección de arribo predominante del oleaje en Bahía Colonet, B. C. obtenidos a partir del corrientímetro-olómetro *Interocean* modelo S4A v 5.056, (Septiembre 2007).

Debido a la incongruencia en las direcciones de arribo sólo se trabajó con los datos de la campaña de septiembre 2007, descartándose las gráficas de las campañas de noviembre

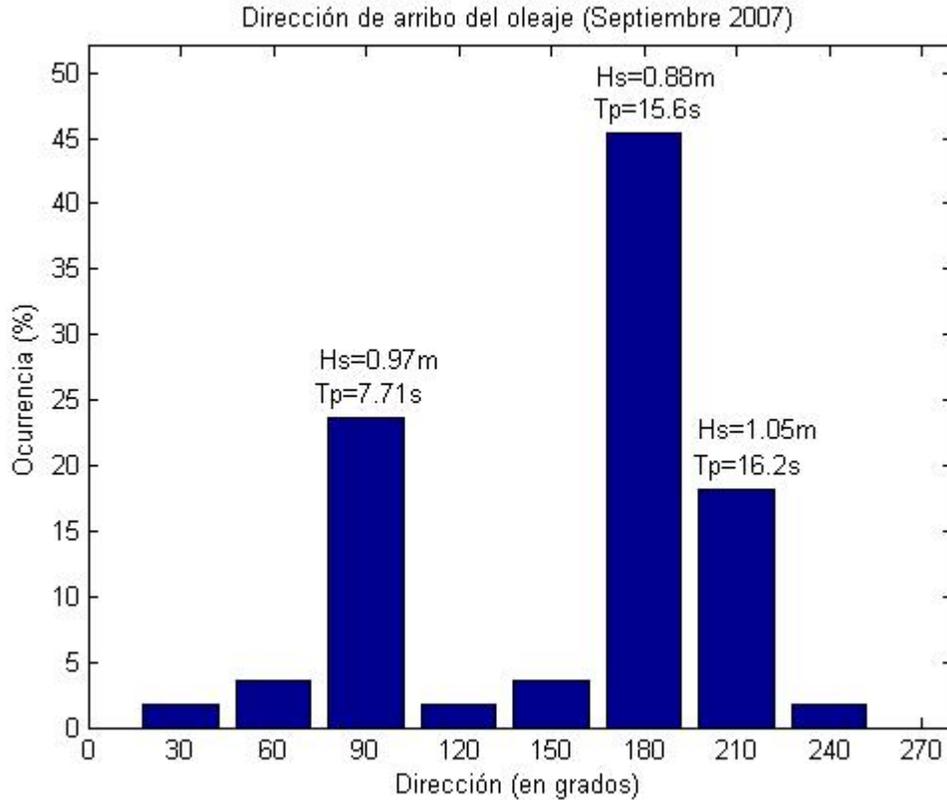
2007 y marzo 2008. El intervalo de clase de las rosas de oleaje que se utilizó fue de  $30^\circ$ . Estos intervalos de clase son representados por medio de líneas segmentadas, los círculos concéntricos representan frecuencia de ocurrencia de la dirección en número de datos (Figuras 16 y 18).

Los datos de septiembre del 2007 que se muestran en la figura 16, presentan la mayor frecuencia con dirección de arribo del S-SW en el intervalo de clase de  $180^\circ$ - $210^\circ$ , al igual que una pequeña presencia con dirección de arribo del NE entre el intervalo de clase  $60^\circ$ - $90^\circ$ , la cual debe ser tomada en cuenta.

### *3.2.3.2 Histograma de dirección de arribo*

El diagrama de rosas del oleaje al igual que el histograma, muestra que la dirección de arribo predominante presenta dos componentes principales, en el primer grupo se obtuvieron direcciones de arribo del E-NE y en el segundo grupo la dirección de arribo cambió hasta obtener componentes del S-SW (Figura 17). En este último, con el mayor porcentaje de ocurrencia se observa el intervalo de clase  $170^\circ$ - $190^\circ$  con un 47% aproximadamente, seguido por un  $\sim 17\%$  del intervalo de clase  $200^\circ$ - $220^\circ$ . Con las direcciones del E-NE, sobresale el intervalo de clase de  $70^\circ$ - $90^\circ$  con valores de ocurrencia por debajo del 25%.

En la figura 17 se obtuvieron valores promedio de Hs y Tp (datos colocados en la parte superior de las barras más representativas), correspondientes a cada grupo de datos de dirección sobresalientes, arrojando como resultado alturas de 0.97 m y periodos entre 10 y 12 s para la dirección del E-NE, así como alturas entre 0.88 y 1.05 m y periodos entre 15.6 y 16.2 s para direcciones de arribo del S-SW.

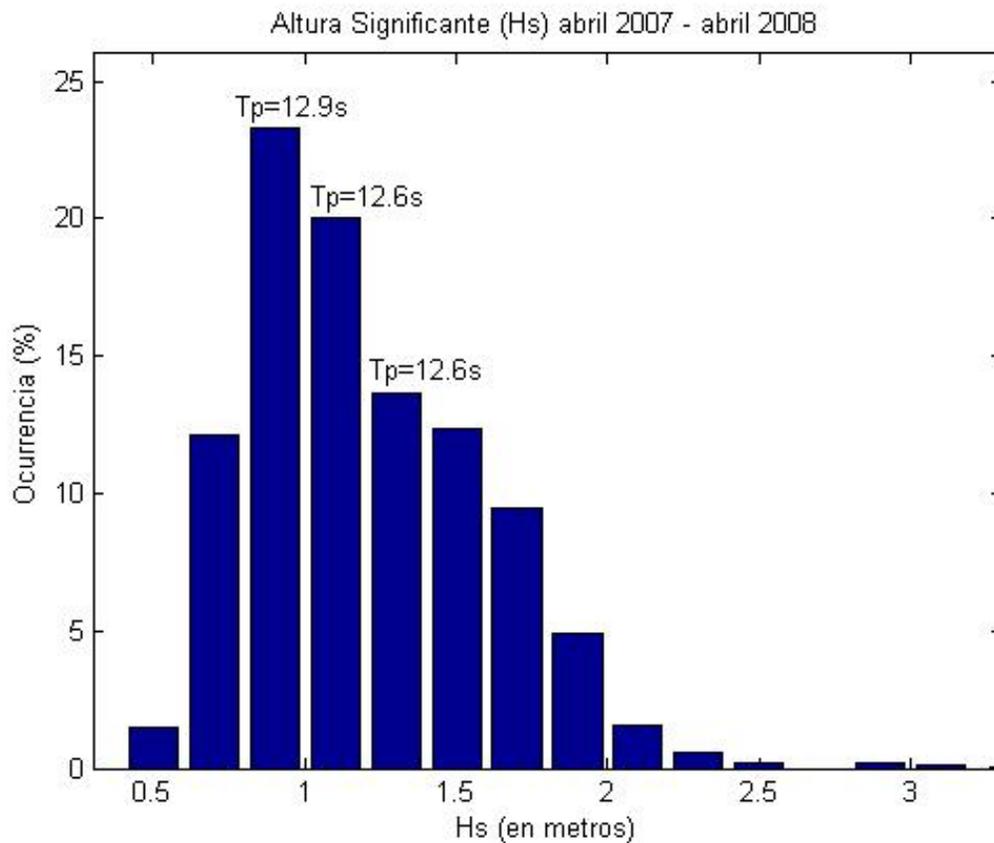


**Figura 17.** Determinación de la dirección de arribo predominante del oleaje en Bahía Colonet, B. C., por medio de histogramas de frecuencia en porcentaje (septiembre 2007), obtenidos a partir del equipo *Interocean* modelo S4A v 5.056.

### 3.2.4. Análisis de los parámetros ( $H_s$ y $T_p$ )

Se realizó un análisis conjunto de todos los datos registrados durante las cuatro campañas para determinar de manera general el comportamiento anual de la altura significativa ( $H_s$ ) y el periodo del pico espectral ( $T_p$ ) por medio de la construcción de histogramas de ocurrencia en porcentaje (Figuras 18 y 19). Es importante recalcar que la dirección de arribo no fue tomada en cuenta para este análisis anual debido a las complicaciones anteriormente mencionadas.

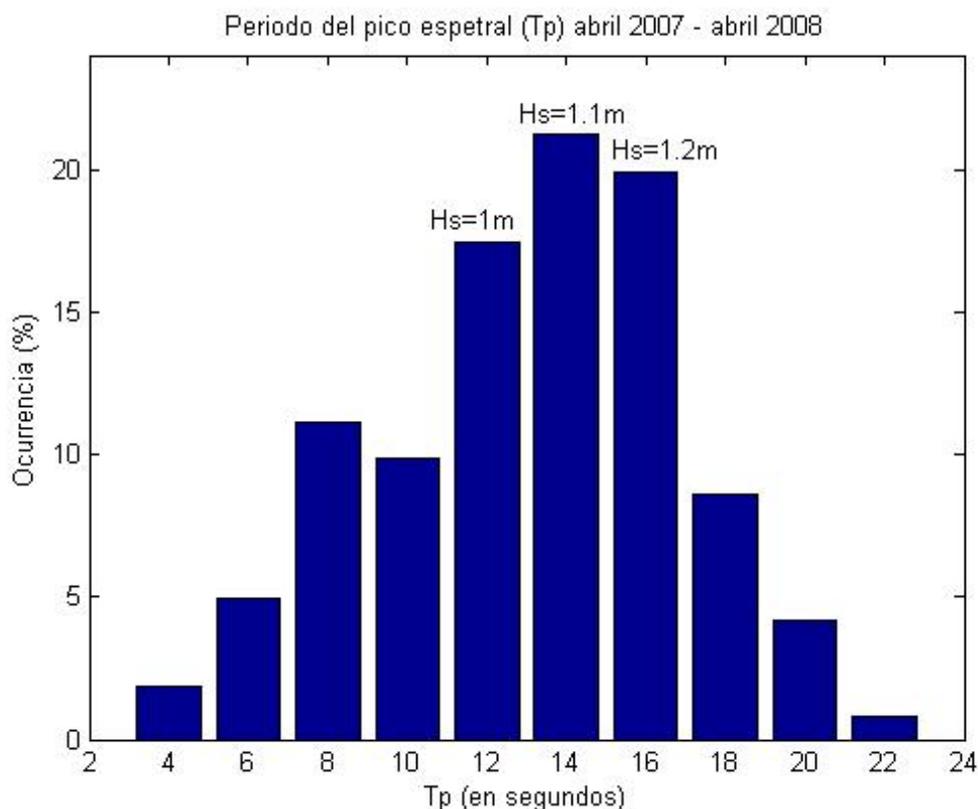
Los histogramas de ocurrencia de Hs muestran sus valores más recurrentes menores al 25% en el intervalo de clase de 0.8-1 m, seguido por el 20% del total de los datos en el intervalo de clase de 1-1.2m (Figura 18). Los valores promedio del periodo del pico espectral (número superior de cada barra) correspondientes a cada intervalo de clase de Hs presentan valores entre los 12.6 y 12.9 s (Figura 18).



**Figura 18.** Histograma de frecuencia por porcentaje de ocurrencia de la altura significativa (Hs) de abril 2007 a abril 2008. Los números superiores en cada barra son el valor promedio correspondiente a ese intervalo de clase.

Correspondiente al periodo del pico espectral ( $T_p$ ) se encuentra el máximo de ocurrencia en el intervalo de clase 13-15 s con ~22% del total de los datos (Figura 19); antecedendo a este máximo se observa un valor cercano al 17% en el intervalo de clase 11-13 s. La segunda concentración máxima de valores se presentan en el intervalo de clase 15-17 s con

menos del 20% de los datos. Los valores promedio de la altura significativa (número superior de cada barra) correspondiente a cada intervalo de clase de  $T_p$  se presentan entre 1 y 1.2 m (Figura 19).



**Figura 19.** Histograma de frecuencia por porcentaje de ocurrencia del periodo del pico espectral ( $T_p$ ), de abril 2007 a abril 2008. Los números superiores en cada barra son el valor promedio correspondiente a ese intervalo de clase.

En los valores máximos y mínimos de la altura significativa y el periodo del pico espectral, se observa una presencia muy baja al tomarse como referencia el porcentaje total del estudio. Para ambos parámetros su porcentaje de ocurrencia no sobrepasa el 2% del total de los datos.

### 3.2.5. Estadística general

El resumen de los parámetros estadísticos de las variables de altura significativa, periodo del pico espectral y dirección de arribo del oleaje se presentan en la Tabla IV. Para los tres parámetros se muestran los valores máximos, mínimos, la media y la desviación estándar.

La campaña de noviembre-diciembre 2007 resultó la más sobresaliente para las alturas de ola al registrar la Hs máxima (3.07 m), Hs mínima (0.50 m) y Hs media más bajas (0.93 m). Para Tp los valores más representativos fueron registrados en abril-mayo 2007, con los valores de media más bajos (12.79 s), al igual que el máximo (22.7 s) y el mínimo (4.3 s). En esta misma campaña se registró la media más altas de Hs (1.28 m). En septiembre 2007 los valores máximos de Hs registraron el valor más bajo de todo el estudio (1.23 m).

**Tabla IV.** Estadística general del oleaje para Bahía Colonet, en el periodo abril 2007- abril 2008.

<b>Periodo de muestreo</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Media</b>	<b>Dsv. Std.</b>
Abril-Mayo 2007	Hs (m)	0.60	2.40	1.28	0.37 ±
	Tp (s)	4.3	22.7	12.79	3.99 ±
Septiembre 2007	Hs (m)	0.63	1.23	0.94	0.15 ±
	Tp (s)	6.26	19.14	13.34	3.86 ±
	$\theta$ (°)	33.3	233.53	156.53	51.91 ±
Noviembre-Diciembre 2007	Hs (m)	0.50	3.07	0.93	0.43 ±
	Tp (s)	5.40	19.88	13.65	2.78 ±
Marzo-Abril 2008	Hs (m)	0.63	2.42	1.18	0.31 ±
	Tp (s)	6.26	21.56	13.51	3.36 ±

Como se ha mencionado la dirección de arribo muestra valores sólo en la campaña de septiembre 2007, presentándose un mínimo de  $33.3^\circ$ , un máximo de  $233.53^\circ$ , y una media de  $156.53^\circ$ .

### **3.3. Refracción**

Con el uso de la Carta Náutica de San Diego-Cabo Colnett proporcionada por la SEMAR, se obtuvo el patrón de refracción en aguas profundas, en el cual la dirección de arribo presenta modificaciones en la transición de aguas profundas a someras. Estas modificaciones presentan valores de  $3^\circ$  para la dirección SW (Caso 1), y  $2^\circ$  en la dirección NW (Caso 2), resultando en ángulos de  $213^\circ$  y  $302^\circ$  (con respecto al N), respectivamente.

En base a los valores obtenidos en la Tabla V se construyó el plano de refracción para el caso 1, con características de arribo del oleaje del S-SW (Figura 20). Este patrón de refracción está influenciado por la batimetría, principalmente en la zona S-SW de Punta San Telmo y E de Punta Colonet. En ambas puntas (San Telmo y Colonet) se observa una convergencia en sus ortogonales dando como resultado los coeficientes de refracción más altos (Tabla VII). Contrastantemente, la región central entre Punta San Telmo y Punta Colonet presenta los menores coeficientes de refracción ( $K_r$ ), lo cual se ve reflejado por la divergencia de las ortogonales (Tabla VII).

El análisis e interpretación del plano de refracción para el caso 2 con dirección de arribo del W-NW, fue descartado debiéndose ésto a que el patrón de distribución de las ortogonales muestra una tendencia bastante anómala.

En ambas metodologías (manual o combinada) los rayos u ortogonales fueron construidos de S a N, siendo el rayo 1 el más al S de Punta San Telmo y concluyéndose los rayos al W de Punta Colonet.

**Tabla V.** Información de apoyo para la construcción del patrón de refracción para el caso 1 (dirección S-SW), obtenida en base al apéndice C del *Shore Protection Manual* (1984).

1	2	3	4	5
<b>d (m)</b>	<b>d/Lo</b>	<b>Tanh 2πd/L</b>	<b>C1/C2</b>	<b>C2/C1</b>
1	0.003517	0.148	1.718919	0.581761
3	0.010552	0.2544	1.281447	0.780368
5	0.017586	0.326	1.17546	0.850731
7	0.024621	0.3832	1.125	0.888889
9	0.031656	0.4311	1.096961	0.911609
11	0.03869	0.4729	1.078875	0.926891
13	0.045725	0.5102	1.065661	0.938385
15	0.052759	0.5437	1.056465	0.946553
17	0.059794	0.5744	1.048747	0.953519
19	0.066828	0.6024	1.042995	0.958778
21	0.073863	0.6283	1.038039	0.963355
23	0.080898	0.6522	1.034192	0.966938

d= profundidad del fondo marino  
Lo= longitud de onda en aguas profundas  
Tanh= tangente hiperbólica  
L= longitud de onda en aguas someras  
C1= celeridad de la ola en aguas profundas  
C2= celeridad de la ola en aguas someras

**Tabla VI.** Información de apoyo utilizada en la elaboración del patrón de refracción para la metodología combinada (*Waves v1.0*).

<b>DATOS DE OLEAJE PROFUNDO</b>
<b>Ángulo de arribo del oleaje (con respecto al Norte): 31 °</b>
<b>Ángulo de la costa: 142°</b>
<b>Ángulo de la cresta: ángulo costa – ángulo arribo: 21°</b>
<b>Periodo del oleaje: 13.5 s</b>
<b>Altura de ola: 3.07 m</b>
<b>Profundidad: 200 m</b>

**Tabla VII.** Coeficientes de refracción ( $K_r$ ) obtenidos por el método de “refracción por batimetría”. (A) Metodología manual para el caso 1 con direcciones de arribo del S-SW. (B) Metodología combinada utilizando el *Waves v1.0.*, con dirección de arribo del S-SW.

(A)	<i>Ortogonales Comparadas</i>	$K_r$	(B)	<i>Ortogonales Comparadas</i>	$K_r$
	1 – 2	1.82		1 – 2	1.17
	2 – 3	1.82		2 – 3	1.15
	3 – 4	0.77		3 – 4	1.46
	4 – 5	0.92		4 – 5	1.06
	5 – 6	0.81		5 – 6	1.2
	6 – 7	0.89		6 – 7	1.12
	7 – 8	0.82		7 – 8	0.92
	8 – 9	0.98		8 – 9	0.92
	9 – 10	0.86		9 – 10	0.96
	10 – 11	1.43		10 – 11	0.98
	11 – 12	1.17		11 – 12	0.89
	12 – 13	2.23		12 – 13	0.91
				13 – 14	0.93
				14 – 15	0.92
				15 – 16	0.93
				16 – 17	0.98
				17 – 18	0.89
				18 – 19	0.92
				19 – 20	0.93
				20 – 21	1.12
				21 – 22	1.4

Al igual que en la metodología manual, la metodología combinada tomó como base los valores mostrados en la Tabla V, con los cuales se construyó el plano de refracción con dirección de arribo del S-SW (Figura 21). De la misma forma que en la figura 20, el patrón de refracción de la metodología combinada está influenciado por la batimetría, principalmente en la zona S-SW de Punta San Telmo y E de Punta Colonet. En ambas puntas (San Telmo y Colonet), se observa una convergencia en sus ortogonales dando como

resultado los coeficientes de refracción más altos (Tabla VII A y B). Contrastantemente, la región central entre Punta San Telmo y Punta Colonet presenta los menores coeficientes de refracción ( $K_r$ ), lo cual se ve reflejado por la divergencia de las ortogonales (Tabla VII A y B).

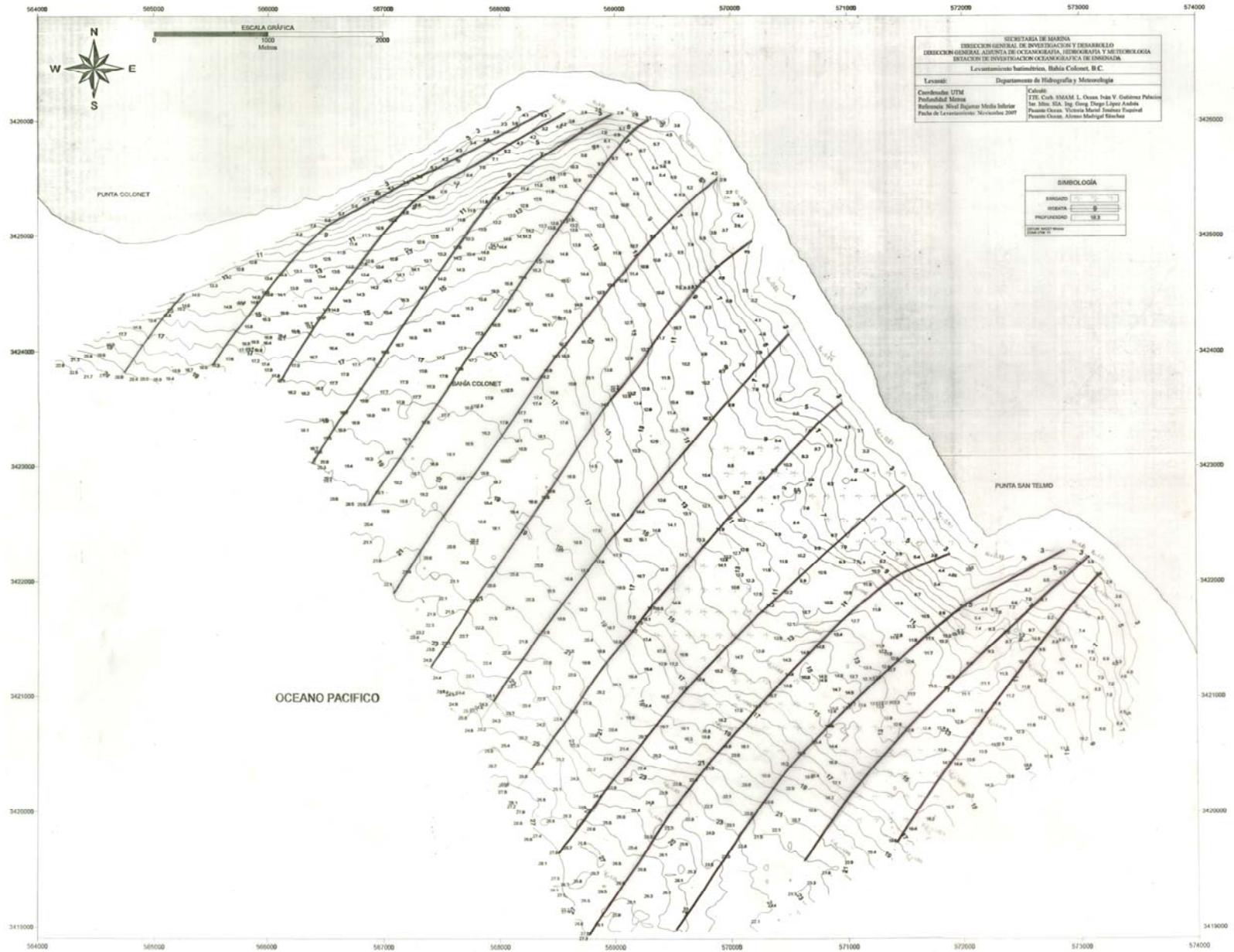


Figura 20. Distribución de la energía del oleaje para el caso 1 usando la metodología manual, en las costas de Bahía Colonet, B. C. (dirección SW).

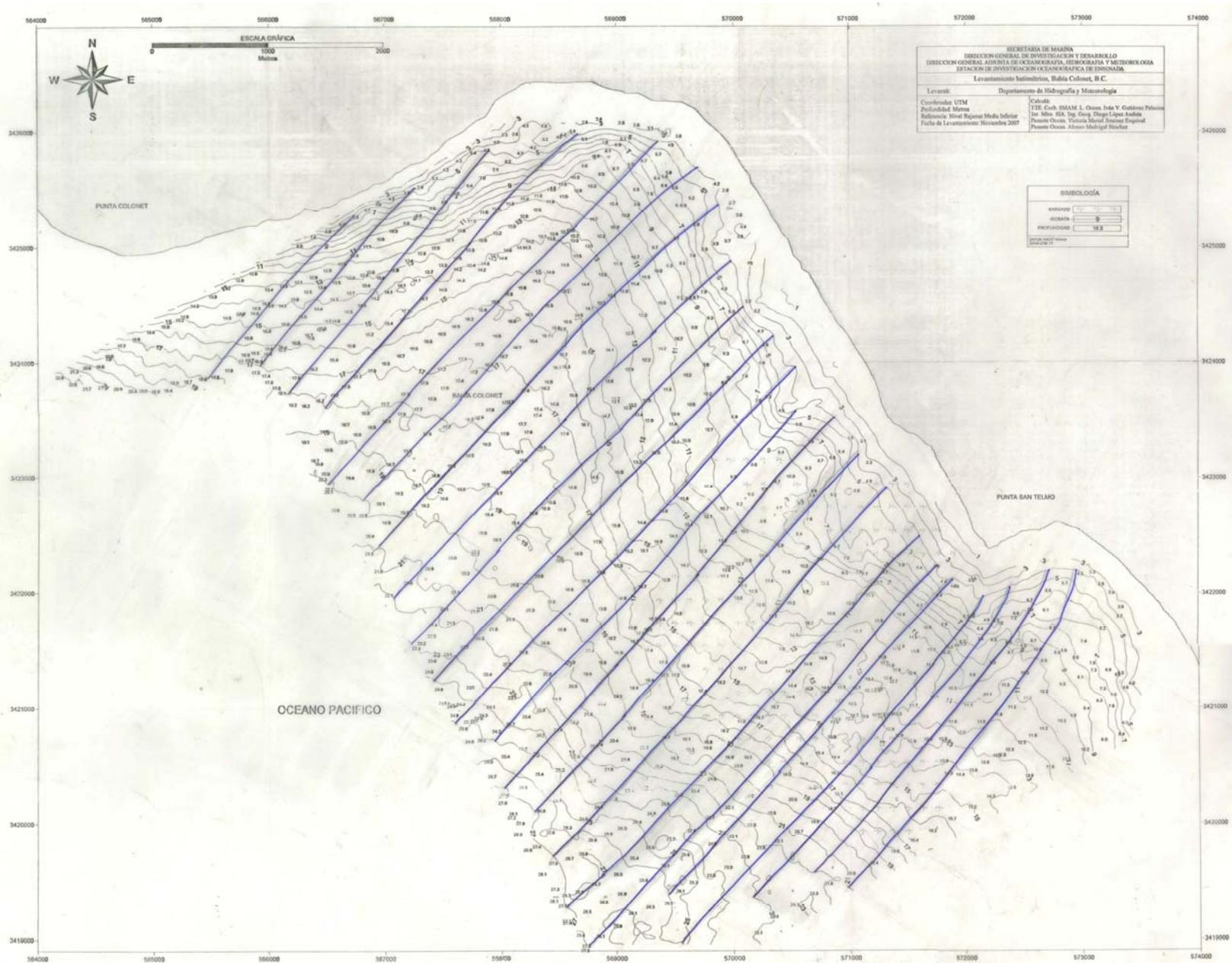


Figura 21. Distribución de la energía del oleaje para la metodología combinada por medio del uso de Waves v 1.0, en las costas de Bahía Colonet, B. C.

## **4. DISCUSIONES**

### **4.1. Batimetría**

La batimetría de Bahía Colonet muestra diversas variaciones en la morfología del fondo marino (Figura 5), que da como resultado una batimetría confinada a aguas someras (en comparación con la profundidad promedio del océano) o muy cercanas a la zona costera, e irregular. Estas irregularidades corresponden a lo esperado para la costa oeste de Baja California, siendo su principal característica la presencia de líneas de costa muy anómalas por el arribo de oleaje altamente energético, así como a la presencia de materiales que caracterizan la composición geológica de la península. La composición geológica de la región da como resultado la aparición de abrasiones, concavidades y socavamientos a lo largo de los cantiles conocida comúnmente como erosión diferencial. Este fenómeno es otra particularidad importante de este tipo de costas y provee las características necesarias para la generación de salientes rocosas, islas, islotes y cantiles marinos de distintas dimensiones. Las pendientes más abruptas (Punta San Telmo y Punta Colonet) están relacionadas principalmente con oleaje altamente energético y una gran remoción de material, así como las pendientes suaves se asocian a oleaje de menor energía (Consultar Anexo 1).

Las irregularidades ocasionadas por el oleaje en Bahía Colonet pueden ser explicadas con lo reportado por Duarte (2004). Este autor menciona que el oleaje de las islas del Pacífico norte específicamente Isla Guadalupe (oleaje típico de las costas de B. C.), proporciona

suficiente energía para obtener un constante cambio tanto de los perfiles de playa como de la batimetría, lo cual concuerda con las características que muestra el oleaje en Bahía Colonet (consultar apartado de resultados del oleaje). Las condiciones hidrodinámicas de la península propician la generación de perfiles de playa característicos para invierno (erosión de playas) y verano (acreción de playas), siendo los perfiles de invierno los más afectados por la alta energía en el oleaje incidente (oleaje de tormenta). Este mismo efecto pero en menor grado genera el oleaje sobre el fondo marino modificándose constantemente la batimetría, siendo la zona de rompiente y/o playa la principal región afectada.

Así como el oleaje tiene un efecto directo sobre la morfología de la bahía, las corrientes costeras generadas por el oleaje moldean el fondo marino (transporte litoral) por su flujo paralelo a la línea de costa, por lo que se favorece la generación de las características particulares para cada zona (Ahumada, 1993; Butterfield, 1985; y Galindo, 1997). La principal corriente estudiada y que rige las costas de California y el oeste del Pacífico mexicano (Península de Baja California), es la Corriente de California (CC). Este fenómeno físico se caracteriza por un flujo cercano a la zona costera de la península con dirección de N a S y una velocidad  $\sim 20$  cm/s; contrario a este flujo se ha localizado una corriente contraria denominada Contra Corriente de California (CCC) con un flujo de S a N. Ésta última resulta la menos conocida debido a que sólo ha sido posible observarla en ciertas temporadas del año, siendo intermitente su aparición (Vélez, 1981). Ambos flujos (CC y CCC) están localizados muy cercano a la zona costera, por lo que su influencia sobre el fondo marino deriva en una importante afectación que moldea continuamente la morfología marina.

Como se mencionó con anterioridad, la presencia de los grandes mantos de macro algas (*Macrosystis pirifera*) resultan en otra característica particular que presentan las costas de Baja California. Estas algas por sus características de adaptación requieren de sustratos rocosos para poder fijarse al fondo marino y resistir el paso de oleaje altamente energético. Por tanto, en las zonas aledañas a Punta San Telmo se encuentran principalmente sustratos bien consolidados asociados con la presencia de las tres zonas o mantos de algas presentes en la bahía. Según Bravo (2009) la región S de Punta San Telmo presenta playas reflectivas (costados de la punta) por la evidencia de la mayor tasa de erosión de los cantiles en bahía Colonet (cantiles activos). Ésto es resultado de la modificación en la dirección de arribo del oleaje por las características morfológicas que proporciona Punta San Telmo, concentrándose principalmente la energía del oleaje en esta zona.

## **4.2. Oleaje**

Los datos obtenidos para este estudio no fueron suficientes para realizar un análisis anual del oleaje, por lo cual se analizaron de forma general paquetes de datos para diversas estaciones del año, variando éstos para cada una de las campañas. Dichas variaciones dependerán de las características de cada una de las estaciones en la cual fueron registrados los datos.

### ***4.2.1. Series de tiempo***

La variación estacional de la altura significativa (Hs) para las costas de Baja California publicado por diversos autores (Martínez *et al*, 1989; Padilla, 1989; Coria, 1991; Oropeza,

1998; Marichal, 2001; de Dios, 2002; Cano, 2004; y Gajá, 2004) coincide con lo reportado en este trabajo, encontrándose un comportamiento bien definido con variaciones estacionales de Hs para las costas de Bahía Colonet; siendo el invierno, la estación en la cual el oleaje se presenta con mayor energía resultado de la formación de las tormentas extratropicales al oeste del Pacífico norte, generándose las alturas de ola máximas promedio del año. Contrastantemente, en el verano se presentan los valores más bajos de Hs.

A finales del verano (septiembre 2007) e inicios del otoño (noviembre-diciembre 2007) se presentan los valores más bajos de Hs (de manera general). Según diversos autores (de Dios, 2002; y Gajá, 2004), las estaciones de otoño y primavera son consideradas como estaciones de transición, ya que en primavera se puede observar un decremento en las alturas hasta alcanzar los mínimos en verano, y en otoño los valores de Hs se incrementan hasta alcanzar los máximos en invierno (en comparación con los valores observados en verano). El patrón de comportamiento de Hs en el invierno-primavera, reportado por estos autores, coincide con este estudio, observándose en la figura 6 una marcada diferencia del oleaje de invierno y primavera al obtenerse un descenso paulatino de Hs hacia final de marzo e inicio de abril 2008. Esta gráfica presenta cuatro máximos de Hs; seguido del primero y máximo valor (2.4 m), se presenta un cambio considerable en la altura reduciéndose ésta un poco más de medio metro hacia el segundo valor (1.8 m), entre los dos primeros valores es posible observar la transición de temporada entre el invierno y la primavera (21 de marzo 2008). Estos cambios entre las temporadas no pudieron observarse para las campañas restantes, debido a que sus lapsos de muestro resultan reducidos o no coinciden con las fechas de cambio de temporada.

Cano (2004) reporta que para bahías semi-protegidas como Santa Rosalía se presentan periodos prolongados de calma, contrastando con lo reportado en este estudio, ya que sólo fue posible observar un pequeño periodo de calma ( $\sim 1$  m) hacia mediados de noviembre 2007 (Figura 6). Este reducido grupo de datos con características propias de la temporada de otoño presenta oleaje de poca energía similar a lo observado en septiembre 2007 (verano), lo cual concuerda con lo esperado para la región en esta temporada (Cano 2004; Gaja, 2004; y Marichal, 2001).

Al realizar el análisis del comportamiento de  $T_p$  se observa que a lo largo del año no es posible encontrar una variación marcadamente estacional o anual en Bahía Colonet, lo que coincide con lo reportado por Cano (2004) para la bahía de Santa Rosalía y es lo esperado para las costas de Baja California. Bahía Colonet presenta datos de  $T_p$  de forma general con un rango de distribución entre los 3 y 23 s, estos valores concuerdan con lo esperado para las costas de Baja California (Marichal, 2001; Cano, 2004; y Gajá, 2004).

#### *4.2.1.1 Comparación de series de tiempo*

Se realizó el análisis comparativo de las series de tiempo, en la figura 10 sólo fue posible realizar la comparación entre  $H_s$  y  $T_p$  por la falta de registros de dirección de arribo ( $\theta$ ). En esta campaña sólo se observó la relación existente entre las  $H_s \sim 1$  m y menores, asociadas con  $T_p$  entre los 10 y 15 s. Los dos máximos de altura  $H_s$  por encima de 1.5 m (27 de abril y 5 de mayo) presentan una relación con los valores de  $T_p$  mayores de 12 s siendo clasificados como oleaje tipo *swell* o de tormenta.

En los tres muestreos restantes (figuras 11, 12 y 13) por las características del equipo de medición se obtuvieron datos de dirección de arribo, de los cuales sólo se trabajó con la

comparación de Hs, Tp y  $\theta$  de septiembre 2007 (Figura 11), debido a que los resultados obtenidos en las campañas de noviembre-diciembre 2007 y marzo-abril 2008 fueron descartados por presentar información incongruente con lo esperado para la región. De manera general no se percibieron indicios comparativos, debido a que cada campaña muestra datos de diferentes temporadas del año y por ende cada uno tendrá características muy particulares de acuerdo a cada temporada.

De los valores máximos presentes en las cuatro campañas, la mayor altura registrada (3.07 m) se presentó en noviembre-diciembre 2007 relacionada con valores de Tp (~16 s) correspondientes a oleaje de tormenta o tipo *swell*. Este valor máximo de altura es posible observarlo hacia finales del otoño cuando la energía en el oleaje comienza a aumentar por la generación de las tormentas del Pacífico norte y se da paso a la entrada de la temporada de invierno (Figura 12). Los dos máximos de altura significativa (Hs) por debajo de los 2 m en noviembre-diciembre 2007 exhiben una asociación con valores de Tp (~12 s) igualmente del tipo *swell* (Figura 12).

De los cuatro máximos de Hs presentes en la campaña de marzo-abril 2008 (Figura 13), el valor más alto (~2.5 m) al inicio de la campaña (17 de marzo, aproximadamente) se asoció a valores de Tp que corresponden a oleaje distante o tipo *swell* (~12 s). El pico máximo cercano al día 28 de marzo (2008) resulta el de mayor duración, lo cual propicia la presencia de ambos tipos de oleaje, siendo el tipo *swell* el primero en ser registrado seguido por el tipo *sea* hacia el día 30 de marzo del mismo año. Los últimos máximos registrados en esta campaña (10 y 16 de abril 2008) coinciden con valores de Tp menores o iguales a los 10 s, por tanto fueron clasificados como oleaje local o tipo *sea*.

La comparación de las series de tiempo de las dos últimas campañas (finales de noviembre-diciembre 2007 e inicios de marzo-abril 2008) proporcionan datos que permiten asociarlos con oleaje distante o tipo *swell*, relacionados con oleaje altamente energético correspondiente a tormentas de invierno del Pacífico norte. Contrastando con lo anterior, se observó que a finales de marzo-abril 2008 (21 de marzo) los valores de Hs descienden paulatinamente, siendo esto lo esperado para la primavera donde el oleaje disminuye su altura y con ello su energía (Marichal, 2001); esto corrobora el cambio entre las temporadas de invierno y primavera.

El muestreo de septiembre 2007 (Figura 11) muestra el comportamiento típico del verano caracterizado por valores de Hs bajos (~1.2 m), Tp muy variados (de 4 s hasta 22 s) pero con dominancia del oleaje tipo *swell*, así como direcciones de arribo cambiantes con predominancia de componentes SW (~180°-210°). Esto corrobora que el perfil de oleaje de verano mostrado en Bahía Colonet concuerda claramente con lo reportado por diversos autores en distintos lugares de la península (Martínez, *et al.*, 1989; Marichal, 2001; de Dios, 2002; Cano, 2004; y Gajá, 2004).

Es posible encontrar en verano periodos largos y mayores a las demás estaciones, siendo estos asociados a olas de tormenta del hemisferio sur (Martínez, *et al.*, 1989; y de Dios, 2002), cuyo oleaje lejano arriba a la costa W de la península de B. C. durante todo el año.

Es importante hacer hincapié en que las gráficas de Tp y  $\theta$  de la figura 11 muestran una gran similitud en su perfil, desde sus valores más altos hasta los más bajos y en las mismas fechas de registro. En estas mismas gráficas se observa que al inicio del muestreo (4 al 9 de septiembre del 2007, aproximadamente) existe un lapso donde el comportamiento de Tp

permanece constante generalmente alrededor de cinco días oscilando entre 13 y 16 s. Seguido de este comportamiento se presenta un segundo periodo de calma hacia el final del muestreo (13 al 15 de septiembre del 2007) con un lapso de tiempo menor pero con mayor constancia en sus valores, manteniéndose en 8 s alrededor de tres días. Para este último caso se observó que en un lapso corto de tiempo (~3 días), el oleaje de tormenta o tipo *swell* estuvo ausente, sobresaliendo únicamente el oleaje local o tipo *sea*; contrario a ello entre el 4 y 9 de septiembre se presentó la ausencia total de oleaje tipo *sea*, dando paso al arribo y registro de oleaje tipo *swell*.

Cerca (1995) señala que las modificaciones por refracción que pudiera sufrir el oleaje al arribar a aguas someras presumiblemente resulta despreciable para regiones como Rosarito con una costa abierta, pero contradiciendo esto Marichal (2001) reportó que las direcciones de arribo resultaron severamente modificadas por el fenómeno de refracción inducido por la presencia de las Islas Coronado, ya que se sabe que el régimen de direcciones de arribo en la península en invierno es del NW principalmente. Al igual que en las costas de Rosarito, en Bahía Colonet las condiciones de oleaje presentes son afectadas de manera similar por las características morfológicas (obstáculo físico, Punta Colonet). Esta alteración en el arribo del oleaje da como resultado que el oleaje con dirección de arribo del N-NW y NW no sea posible registrarlo o su porcentaje de ocurrencia sea muy bajo debido a los efectos que producen los fenómenos de refracción-difracción en la bahía. Por lo anterior, en la dirección de arribo se produce un cambio de tal manera que prevalecen los ángulos de arribo del S-SW y SW.

#### **4.2.2. Histogramas de Hs y Tp**

Es posible observar que los histogramas de Hs y Tp tienen como principal característica su forma de distribución del tipo unimodal (figuras 14 y 15, respectivamente), coincidiendo dicha información con lo reportado por Marichal (2001) y de Dios (2002) para diversas regiones de las costas de Baja California. Sólo dos histogramas de Tp (figuras 15 B y D) presentaron un distribución bimodal, acentuándose con ello que los datos de Tp tienen una marcada variación estacional y anual. También se observa en ambas figuras una distribución de probabilidad diferente en cada uno de los casos. En los histogramas de Hs (Figura 14), se observa una distribución del tipo *Rayleigh* (determinada en base a la forma estadística que obtuvo la campana, por la distribución de los valores concentrados hacia el extremo izquierdo de la gráfica), siendo congruente con lo reportado por dos autores que hacen mención de una distribución similar para la zona NW de la península (de Dios, 2002; y Gajá, 2004). En los histogramas de Tp (Figura 15), se presentó una distribución del tipo *Gaussiana* (distribución estadística concentrada en la parte central de la gráfica) semejante a la reportada por Gajá (2004). La distribución de ambas variables concuerda con lo que predice la teoría lineal del oleaje.

En base a la clasificación del oleaje (Rivas, 1992) y a la estacionalidad en los valores de Hs en las costas de Baja California (Martínez *et al*, 1989; Padilla, 1989; Coria, 1991; Oropeza, 1998; Marichal, 2001; de Dios, 2002; Cano, 2004; y Gajá, 2004), se observa que la altura significativa presente en este estudio conserva sus valores máximos en el invierno y mínimos en el verano, así como una clasificación con predominancia de oleaje tipo medio, siendo lo esperado para la región W de la península.

Con respecto al análisis de los histogramas de  $T_p$ , mostraron el mayor porcentaje de ocurrencia con valores por encima de los 11 s (Figura 15). Este rango de tiempo indica que el oleaje presente en Bahía Colonet fue generado por la energía de tormentas de zonas distantes y es conocido como *swell*, siendo este mismo tipo de oleaje el que predomina en la región W de la península de Baja California como lo mencionan diversos autores (Martínez *et al*, 1989; Padilla, 1989; Coria, 1991; Oropeza, 1998; Marichal, 2001; de Dios, 2002; Cano, 2004; y Gajá, 2004). El oleaje con periodo menor a los 10 s conocido como oleaje local o tipo *sea*, aunque presenta un menor porcentaje de ocurrencia debe tomarse en cuenta, ya que asociado a este tipo de oleaje se presenta un importante porcentaje de ocurrencia con dirección de arribo del NE, así como con Hs bajas ( $\sim 1.2$  m); la posible explicación de su generación se explica más a detalle en el apartado de dirección de arribo (Consultar Anexo 4 y 5).

Debido a la no estacionalidad del  $T_p$  y la presencia de ambos tipos de periodo (*swell* y *sea*), se puede observar la incidencia de oleaje de tormentas lejanas durante casi todo el año. Esto permite que sea enmascarado el oleaje local al grado de no poder distinguirlo o quedar cubierto en ciertas ocasiones, sobresaliendo principalmente el oleaje de tormenta. Es importante mencionar que sí es posible separar o extraer los datos de oleaje tipo *sea* del tipo *swell*, por medio del uso de filtros o espectros de frecuencia, sin embargo este procedimiento no fue contemplado para cumplir los objetivos de este estudio.

Existe una variación interanual en los valores de Hs reportada por Marichal (2001) para las costas de Rosarito, sin embargo este comportamiento no fue posible corroborarlo debido a las limitantes en la obtención de datos para este estudio.

Los valores promedio de Hs y Tp colocados en la parte superior de las barras con mayor porcentaje de ocurrencia, corroboran todas las asociaciones mencionadas con anterioridad existentes entre los dos parámetros. Dichas relaciones entre ambos parámetros muestran que con el mayor porcentaje de Hs entre ~1 y 1.4 m se observan valores promedios correspondiente de Tp entre ~11 y 15 s. Confirmando lo anterior, se observó que con el mayor porcentaje entre ~12 y 17 s en los histogramas de Tp, se encuentran valores promedios de Hs entre ~0.9 y 1.2 m (figuras 14 y 15).

#### ***4.2.3. Dirección de arribo del oleaje***

Con las gráficas de diagramas de rosa resulta más fácil observar el comportamiento de las direcciones de arribo del oleaje, a diferencia de la información plasmada en los histogramas.

Las direcciones predominantes en este estudio presentan componentes S-SW principalmente (figuras 16 y 17), siendo esto un resultado no esperado para la costa E del Pacífico, específicamente en invierno, temporada en la cual se esperaría encontrar mayormente direcciones predominantes del NW por la presencia de las tormentas del Pacífico N. La dirección S-SW predominante en este trabajo, coincide con lo reportado por Padilla (1986) y Marichal (2001) en Rosarito, y Cano (2004) para la Bahía de Santa Rosalíita. Las características morfológicas de las costas (Santa Rosalíita, Rosarito y Bahía Colonet) propician la modificación de la dirección de arribo del oleaje debido a la presencia de los fenómenos de refracción-difracción (Ulloa, 1989).

La ausencia o poca frecuencia de registros de oleaje con dirección de aproximación NW (270-315°) esperada para esta zona, es debido a que la punta proporciona una protección

natural a la bahía generándose una zona de sombra (costa semi-protegida), donde el oleaje presenta menor energía que en regiones más al S de la bahía (Punta San Telmo). Este patrón de cambio en las direcciones de aproximación debida a las características morfológicas de las costa de Baja California (puntas rocosas, islas, cantiles, entre otras), modifica en gran medida la dirección de arribo del oleaje con componentes W y NW (Ulloa, 1989). Corroborar esta teoría sobrepasa los alcances y objetivos del presente trabajo, debido a la escasa información con la que se cuenta.

Es importante mencionar la presencia de un grupo menor con componentes del E-NE, siendo estos valores un resultado incongruente debido a que la dirección de arribo según este grupo proviene del continente hacia el océano.

La incongruencia de un este pequeño grupo (figuras 16 y 17) en sus direcciones de arribo puede deberse a: 1) La colocación de los aparatos muy cercana a la línea de costa pudiera afectar el registro de los datos debido al fenómeno de la reflexión del oleaje, el cual es generado al reflejarse una porción de la energía contenida en una ola cuando ésta colapsa en la zona de rompiente (línea de playa), sin embargo esta opción se descartó ya que la reflexión no puede generar alturas de ola mayores de  $\sim 1.2$  m en esta zona, debido a que la distancia de los aparatos a la línea de costa no resulta suficiente para propiciar este fenómeno.; 2) El fenómeno meteorológico conocido como ‘Condición Santana’ presenta características contrarias a los vientos reinantes en las costas de la península con direcciones E-NE, duración de aproximadamente 2 a 3 días e intensidades cercanas a los 20 m/s (Bermúdez, 1999). Al obtenerse registros de oleaje en su mayoría menores a 2 días, sólo fue posible asociar que un grupo pequeño de datos (13 al 15 de septiembre 2007) pudiera haber sido generado por la “Condición Santana”, presentándose por ende

direcciones de arribo con componentes del E-NE. La superficie de influencia del viento entre la línea de costa y el aparato pudiera no permitir generar oleaje de tal magnitud. Por tanto, esta opción no se descarta totalmente para explicar el origen de los datos incongruentes; 3) El estudio de los vientos locales proporcionó información que pudiera servir como herramienta en la disipación de las dudas sobre la generación del oleaje registrado en este trabajo (Ver Anexo 4 y 5). Estos registros de viento muestran componentes principalmente N-NE (0-35°) y con una baja presencia de direcciones E-NE (75-90°), en septiembre 2007. El porcentaje de recurrencia de valores con dirección de arribo del NE (~0-50°) también es posible observarla en las gráficas de diciembre 2007 y febrero 2008. Esta opción no fue descartada, ya que sólo es posible explicar y asociar la procedencia de una pequeña parte de los datos con las direcciones anómalas del estudio: 4) Cuando se trabaja con equipo oceanográficos es necesario realizarles periódicamente mantenimiento y calibración, para así asegurar una mayor calidad en el registro de los datos. Un aparato descalibrado genera una base de datos que podría presentar diversas alteraciones que no reflejen las condiciones naturales de la zona estudiada, dichas modificaciones podrían presentarse en cualquiera de los sensores con los que cuenta el aparato. Es posible que los aparatos utilizados en este estudio hayan sufrido alguna alteración al momento de su uso, registro y/o colocación. Debido a la falta de antecedentes oceanográficos de la zona para la corroboración de los datos, las tres últimas opciones pudieran servir como apoyo para explicar porqué los datos de dirección de arribo obtenidos presentan tal incongruencia sólo en uno de sus porcentajes mayores.

Es importante mencionar que existe un estudio (Oropeza, 1998), que registró datos con dirección de arribo del SE para la costa W de la península. El autor reportó estudios de

diversas zonas del Pacífico, entre las que destaca la costa de Punta Cabras, en la cual se registraron los datos con dirección de arribo del SE que coinciden con lo reportado en este trabajo. Sin embargo, el autor no hace mención del registro anómalo, ignorando las direcciones del SE y enfocándose solo en las direcciones del SW.

Debido a la presencia de obstáculos como las islas, puntas rocosas y los bajos, es posible afirmar que no siempre es recomendable realizar la extrapolación de datos de oleaje medidos en regiones distintas a las de la zona de interés, ya que deben ser tomados en cuenta los efectos de la batimetría y los fenómenos del oleaje.

La zona elegida para la toma de datos de oleaje en conjunto con la presencia de Punta Colonet, permitió recabar información con valores que recaen fuera del esquema característico para la costa W de Baja California. Dicha característica morfológica proporciona una protección natural a la bahía, generándose zonas de sombra donde el oleaje no puede actuar, reportando anteriormente por Ulloa (1989).

### **4.3. Refracción**

La batimetría generada en este estudio resultó confinada a aguas someras o muy cercanas a la zona costera (profundidades ~30 m), limitando así la obtención del patrón de refracción, el cual ya presenta cambios notables en sus características antes de arribar a la bahía.

Con la finalidad de sustentar la información utilizada en la determinación del patrón de refracción se calculó la altura de ola para aguas profundas ( $H'_o$ ) apoyado en el “Apéndice C” del *Shore Protection Manual* (USACE, 1984), ésta se caracteriza por no presentar

modificaciones por efectos de la refracción. El cálculo de  $H'_o$  mostró un valor (2.97 m) muy cercano a la altura significativa usada en la determinación de la refracción (3.07 m). La comparación entre ambas alturas presenta una diferencia mínima (0.1 m), por lo que se decidió utilizar el mayor registro que proporcionará un mayor factor de seguridad en la determinación del patrón de refracción.

Ninguna de las dos metodologías empleadas en este estudio obtuvo un coeficiente de refracción de 1, esto se debe a que el oleaje a lo largo de toda la bahía sufre cambios en mayor o menor medida por las características batimétricas. Esta variación en la concentración o disipación de la energía da como resultado que la velocidad a la que viajan las ondas disminuya gradualmente al disminuir la profundidad debido a la fricción que ejerce el fondo marino sobre el oleaje. La disminución en la velocidad y la distribución de la energía en ambos casos (concentración-disipación) será distinta por las características particulares de cada punto por donde transita el oleaje.

La irregularidad batimétrica de la bahía asociada a Punta Colonet modifica severamente el arribo de los frentes de onda del oleaje, en consecuencia el patrón de refracción del caso 2 con dirección NW (metodología manual) no fue tomado en cuenta debido a que los resultados no presentaron un patrón de distribución útil para describir las características de la bahía con las condiciones previamente establecidas. Aunado a lo anterior, Grauzinis (1970, citado en Ulloa, 1989) menciona que las dimensiones de obstáculos físicos en las costas como lo son las islas, bajos y puntas rocosas, que causan irregularidad y cambios abruptos en la morfología del fondo marino, y que sean mayores a una longitud de onda, dificultan el estudio de la refracción del oleaje.

Resulta difícil obtener o calcular por medio de las metodologías utilizadas el efecto que genera en el oleaje los mantos de algas cercanos a Punta San Telmo. Estas macro algas de la zona W de la Península al estar asociadas con fondos rocosos y presentar un amplio porcentaje de cobertura sobre y debajo de la superficie del mar, darán como resultado la desestabilización del oleaje, lo cual propiciara diversos cambios en sus características percibiéndose principalmente una disminución de su energía, variación en su velocidad de aproximación y dirección de arribo, así como un posible aumento en la altura del oleaje.

Se sabe que la energía contenida en una ola resulta uniforme a lo largo de toda la onda, su modificación por las características batimétricas repercutirá en la cantidad de energía y la distribución de la misma en todos los puntos de la ola, obteniendo como resultado una concentración o disipación de energía a lo largo de la línea de costa, y en raros casos la conservación de la misma. De lo anterior, sólo la conservación de la energía no fue totalmente identificada, ésto debido a que para ambas metodologías se presenta el valor de 0.98 (Tabla VII) como el más cercano a 1 y donde el patrón de refracción es casi imperceptible. Por lo tanto las regiones entre las ortogonales 8-9 (Figura 20 y Tabla VII A) y las ortogonales 10-11 y 16-17 (Figura 21 y Tabla VII B), resultan las zonas con el menor índice de refracción para toda la bahía en ambas metodologías. Este resultado permite que la mayor parte de la energía contenida en determinado punto de la ola sea conservada hasta su colapso en la zona de rompiente, generándose como consecuencia una erosión media de la línea de costa comparativamente con zonas de convergencia o divergencia de energía.

En ambas metodologías con dirección del SW (figuras 20 y 21) fue posible observar que las zonas de Punta San Telmo y Punta Colonet presentan los coeficientes de refracción ( $K_r$ ) mayores a 1, los cuales muestran no sólo la mayor concentración de energía de la ola, si no,

que las características del oleaje (altura, velocidad y dirección) variarán considerablemente en estas zonas (Consultar Anexo 3). Contrario a ello con valores de  $K_r$  menores a 1, el oleaje presenta disipación de energía en la región comprendida entre Punta San Telmo y Punta Colonet; esta pérdida de energía denotará en una disminución apreciable en la altura de la ola (energía), y una variación en la dirección y velocidad.

La disminución de la energía del oleaje por la acción del fenómeno de refracción, coinciden con lo reportado por Bravo (2009), el cual observó que la región que comprende entre Cuatro Casas (NW de Punta San Telmo) y el Arroyo San Rafael, muestra la menor pendiente en sus playas y cantiles, así como los valores de  $K_r$  menores (Tabla VII). Éstas resultan características de una playa disipativa donde la energía contenida en una ola es distribuida a lo largo de un área mayor, por lo tanto se obtendrá una menor modificación e influencia sobre la playa. Esto se traduce en la reducción de la tasa de retroceso de los cantiles (erosión) y la disminución en la tasa de transporte sedimentario de la zona de playa. Sólo en condiciones extremas fue posible encontrar bloques caídos evidencia del efecto producido por el oleaje en la base de los cantiles de la región central de la bahía, ocasionados por oleaje de tormenta o tipo *swell* en marzo 2008 (Bravo, 2009). Esta clasificación del oleaje tipo *swell* muestra características de alta energía con alturas mayores a 1.5 m y periodos por encima de los 11 s (para mayor detalle consultar apartado de estadística del oleaje), el cual proporciona la suficiente energía para aumentar la erosión de la línea de costa y un posible cambio en el patrón de refracción.

La concentración de energía que suscitan Punta San Telmo y Punta Colonet, da como resultado una mayor altura del oleaje y la disminución en la longitud de onda. Con el aumento en la altura de ola, se espera que los efectos sobre la línea de costa sean mayores,

lo que propicia la generación de playas más erosionadas y afectadas por el aumento en el transporte sedimentario (erosión). Por otro lado, asociado a la concentración de energía se observa que la dirección de arribo es modificada en gran medida, exhibiéndose en algunos casos cambios hasta de decenas de grados. Estas zonas de concentración de energía son de gran importancia en la proyección de cualquier obra marítima para el cálculo e implementación de las estructuras.

De las dos zonas con concentración de energía, la zona S exhibe diversas evidencias de presencia de oleaje altamente energético, éstas pueden denotarse por los diversos bloques del cantil colapsados, grietas de erosión formadas en la parte superior del cantil conocidas como coronas de derrumbe, así como pendientes muy pronunciadas y la presencia de cantos rodados, gravas y arenas gruesas en sus playas (Bravo, 2009). Esto sirvió como apoyo para establecer que las playas de esta zona son del tipo reflectivas con características de media a alta energía (Bravo, 2009), esto coincide con la trayectoria y valores altos de  $K_r$  que muestran las tres primeras ortogonales de la metodología manual (Figura 20 y Tabla VII). Para la metodología combinada los resultados no reflejan una evidencia tan marcada como en el caso anterior, observándose un patrón similar que influencia principalmente las playas de ambas zonas de Punta San Telmo, este resultado puede deberse a que este método no se ha utilizado anteriormente y no ha podido comprobarse si sus resultados reflejan la realidad de la región.

Punta Colonet cuenta con cantiles de gran altura (~100 m promedio en su parte protegida) que no presentan evidencias de erosión marina, sobresaliendo principalmente la erosión subaérea relacionada a los escurrimientos en las laderas (Bravo, 2009). No obstante se esperaría que la acción del oleaje en esta región fuera menor por ser la zona de sombra

producto de las características morfológicas de la bahía (Punta Colonet), sin embargo los sedimentos generados de la erosión subaérea que se debería acumular en la base del cantil no existen. Aunado a la convergencia de las ortogonales usando el método manual, se concluye que la acción del oleaje resulta mayor que la esperada al obtenerse valores altos de  $K_r$  (Tabla VII A) en la región entre el E de Punta Colonet y la zona más N del Arroyo San Rafael (Figura 20). En esta región la pendiente de las playas resulta muy abrupta ( $\sim 56^\circ$ ).

En batimetrías suaves existe una relación unívoca entre las direcciones de propagación del oleaje tanto en aguas someras como en aguas profundas (Ulloa, 1989). Para batimetrías irregulares o abruptas, como es el caso de Bahía Colonet, tal relación no se cumple por que la dirección del oleaje presenta varios valores respecto a un solo valor de la dirección de propagación debido a la formación de salientes rocas causadas por la erosión diferencial (Ulloa, 1989). En el caso contrario, no es posible determinar de dónde proviene el oleaje que llega a una zona de aguas someras conociendo únicamente la dirección con la que arriba.

Al comparar las dos metodologías utilizadas para determinar el patrón de refracción se observó que el método manual resultó el más efectivo, lo cual coincide con lo reportado por Cruz (1983). Esto se debe a que el método computacional no ha sido utilizado anteriormente y se desconoce su porcentaje de error, por lo que resulta el método manual la mejor opción para mostrar las condiciones reales del fenómeno de refracción en Bahía Colonet.

## 5. CONCLUSIONES

1. La batimetría de Bahía Colonet presenta una morfología altamente irregular con grandes variaciones entre las isóbatas. El fondo rocoso cercano a Punta San Telmo propicia la aparición de mantos de macro algas que modifican la dirección de arribo del oleaje.
2. El oleaje estudiado en Bahía Colonet presenta la altura significativa máxima en invierno, y la mínima en verano; y un periodo del pico espectral con un comportamiento no estacional, ambos parámetros son consistentes con lo esperado para la costa W de Baja California. La dirección de arribo del oleaje proviene principalmente del S-SW, lo esperado para costas semiprotegidas como Bahía Colonet.
3. El patrón de refracción determinó que Punta San Telmo presenta la mayor evidencia de playas altamente energéticas; asimismo Punta Colonet es asociada a concentración de energía. La mayor evidencia de playas disipativas se encontró entre la zona de influencia del Arroyo San Rafael y la región de Cuatro Casas (Punta San Telmo).

## 5.1. Recomendaciones

1. Llevar a cabo la construcción del puerto en Bahía Colonet implicará la elección de una zona de registro del oleaje distinta (instalación de aparatos), por lo que se propone que en futuros estudios de oleaje de la bahía, sean colocados los instrumentos oceanográficos al W-SW de Punta Colonet o en zonas fuera de la bahía (W-NW), con la finalidad de obtener mayor información que describa la realidad del comportamiento del oleaje en la región.
2. Para obtener una mejor estimación de la características del oleaje en Bahía Colonet, las bases de datos de parámetros oceanográficos deberán constar con periodos de muestreo más largos que abarquen como mínimo doce meses consecutivos, considerando las cuatro estaciones del año y los cambios suscitados entre ellas, recalcando que los estudios históricos del oleaje dependerán de las características que presente la obra marítima en cuestión.
3. Se recomienda realizar estudios más detallados del oleaje proveniente del NW originado por las tormentas invernales del Pacífico N y su modificación consecuencia de Punta Colonet, para entender mejor su influencia sobre la costa y contar con más herramientas para una buena planeación portuaria.
4. Llevar a cabo estudios conjuntos de los fenómenos de refracción-difracción que incluyan la parte expuesta a mar abierto de Punta Colonet (N-NW) proporcionará un mayor detalle de las variaciones de éstos fenómenos del oleaje en la bahía. Así como la ampliación del estudio batimétrico de la bahía y las zonas colindantes.

## 6. LITERATURA CITADA

- Ahumada, S. M. A., (1993). Corrientes litorales inducidas por oleaje en la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 38 pp
- Álvarez, S. L. G., (1971). Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 54 pp.
- Bermúdez, Z. R. D., (1999). Diseño de un rompeolas separado de la costa como alternativa de protección en la zona de El Sauzal de Rodríguez, B.C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 62 pp.
- Bravo, C. L. M., (2009). Caracterización y descripción de los cantiles en Bahía Colonet, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 40 pp.
- Butterfield, F. G., (1985). Análisis de datos de olas y corrientes tomados en una playa al norte del Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 57 pp
- Cano-Cetina, R., (2004). Análisis estadístico del oleaje que arriba a la Bahía de Santa Rosaliita, B. C., México abril 2002-marzo 2003. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 72 pp.
- Cerca, M. L., (1995). Evaluación del potencial de extracción de energía eléctrica a partir del oleaje, como posible fuente alterna en Rosarito, B. C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 70 pp.
- Coria, M. P., (1991). Distribución de probabilidad de la altura significativa del oleaje y cálculo de periodos de retorno para el Puerto de Ensenada, B.C., México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 40 pp.

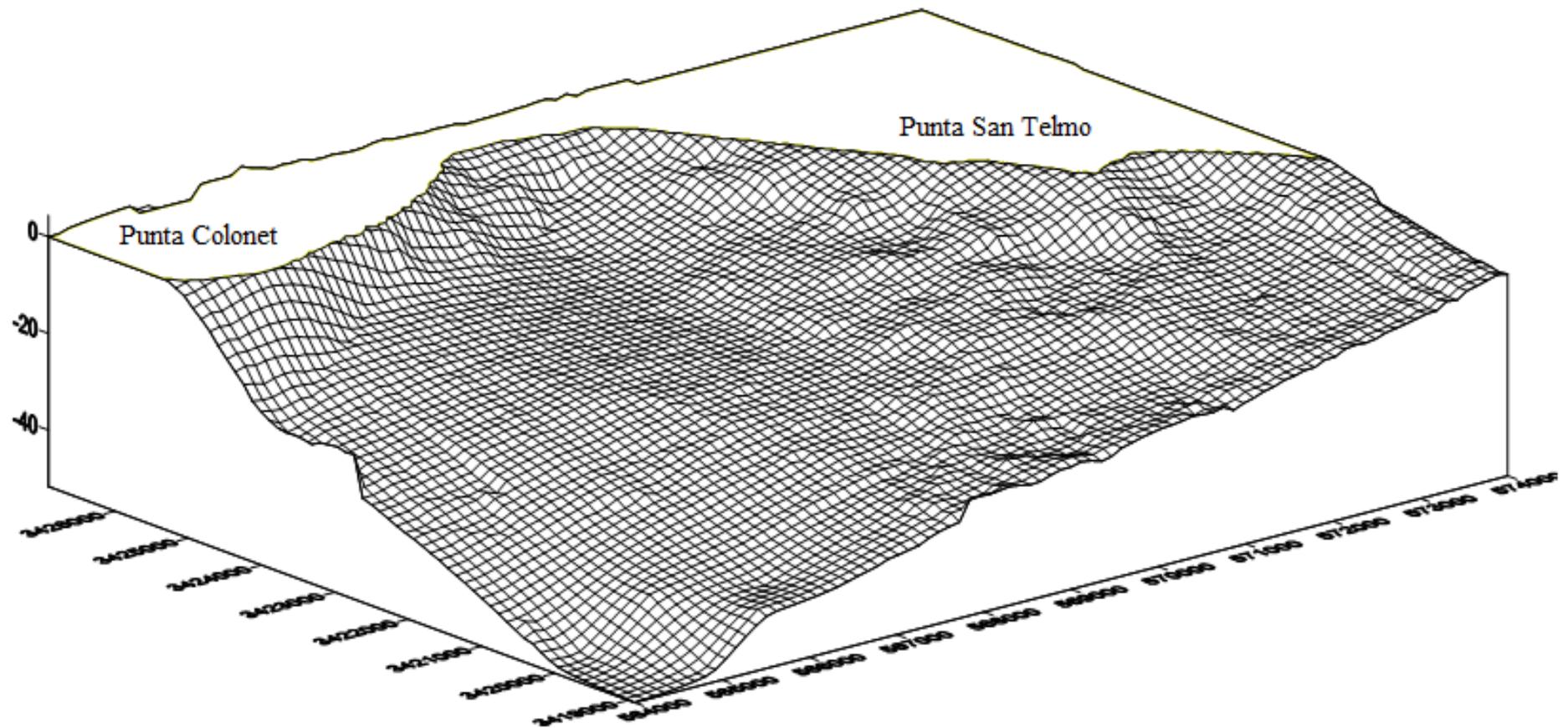
- Cruz, F. A., (1983). La refracción del oleaje y la determinación del error en el ángulo de aproximación. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 49 pp.
- de Dios, S. D., (2002). Climatología de la altura significativa del oleaje frente a la costa Pacífico de Baja California a partir de datos del Altimetro a bordo del Satélite ERS-2. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 66 pp.
- Duarte, Q. P., (2004). Evaluación de la energía del oleaje para islas del Pacífico mexicano. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 129 pp.
- Gajá, F. S., (2004). Estadística de oleaje de dos localidades dentro de la Bahía Todos Santos, B.C., y su uso para la extrapolación de datos de oleaje de aguas profundas al interior de la Bahía. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 63 pp.
- Galindo, A. K., (1997). Cambios en el patrón de corrientes litorales en una playa de bolsillo con la introducción de obras costeras. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 34 pp.
- García-Krasovsky, R., (1973). Determinación del acarreo litoral por medio de trazadores fluorescentes en la Laguna de Agua Brava, Nayarit. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 115 pp.
- Huerta T. L. 2002. Transporte de sedimento por tracción en la boca y en el canal principal del estero de Punta Banda, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 47 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. INEGI Home Page. Fecha de acceso: Abril 2008. [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- Marichal, G. A. E., (2001). Análisis estadístico del oleaje frente a las costas de Rosarito, B.C., de 1994 a 1998. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 70 pp.

- Martínez, D. A., Nava, B. C. y Ocampo, T. F., (1989). Estadística de oleaje en la Bahía de Todos Santos, BC. De septiembre de 1986 a agosto de 1987. *Ciencias Marinas*, 15 (3): 1-20.
- Oropeza, F. R., (1998). Descripción del clima del oleaje para las costas mexicanas del Océano Pacífico en los estados de Baja California, Colima, Michoacán y Guerrero. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 219 pp.
- Padilla, H. R., (1989). Potencia y dirección del oleaje en la costa noroeste de la Península de Baja California y su aprovechamiento. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 58 pp.
- Rendón, V. C. S., (2006). Diseño de un rompeolas para generación de un área recreativa en la costa de Ensenada, B.C., México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 65 pp.
- Requejo, L. M., (2005). Análisis y mejoras en la evaluación de diversos términos de modelos de evaluación de playas en escalas de medio plazo. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Sección 3, 141-220 pp.
- Rivas, C. H., (1992). Conservación de energía del oleaje; diseño, usos y aplicaciones. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 62 pp.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2008. Internet. SCT Home Page. Fecha de acceso: Mayo de 2008. [www.sct.gob.mx](http://www.sct.gob.mx).
- Secretaría de Marina, SEMAR (2009). Tablas numéricas de predicción de marea, Océano Pacífico 2009. Subsecretaría, Dirección General de investigación y desarrollo. Baja California, México. 308 pp
- Téllez, G. G. (2003). Diseño preliminar de un rompeolas sumergido separado de la costa y su impacto potencial frente a los cantiles marinos de Punta Morro, Ensenada, B. C., México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 72 pp.

- Turekian, K. K., (1979). Los océanos. Ediciones Omega, Barcelona España. 120 pp.
- Ulloa, T. M., (1989). Refracción lineal del oleaje en el Puerto de Ensenada. . Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 66 pp.
- USACE. (1984). Shore Protection Manual. Vols. 1 and 2. Coastal Engineering Research Center; U.S. Army Corps of Engineers; Washington, D.C.; 633pp.
- Vélez, M. H., (1981). Análisis cuantitativo de la variabilidad estacional y espacial de las masas de agua de 0 a 500 m en la región de la Corriente de California. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. 54 pp.
- Wikipedia (2009). Home Page. Internet. Fecha de acceso 22 de febrero del 2009. [www.en.wikipedia.org/wiki/Köppen\\_climate\\_classification](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Köppen_climate_classification)

## 7. ANEXOS

### Anexo 1



**Figura.** Batimetría en tres dimensiones para evidenciar con mayor detalle las características del fondo marino en Bahía Colonet (obtenido por medio de Surfer8).

## Anexo 2

Estadística general del oleaje de los parámetros de altura y periodo, obtenidos por medio del S4A. Bahía Colonet, abril 2007- abril 2008.

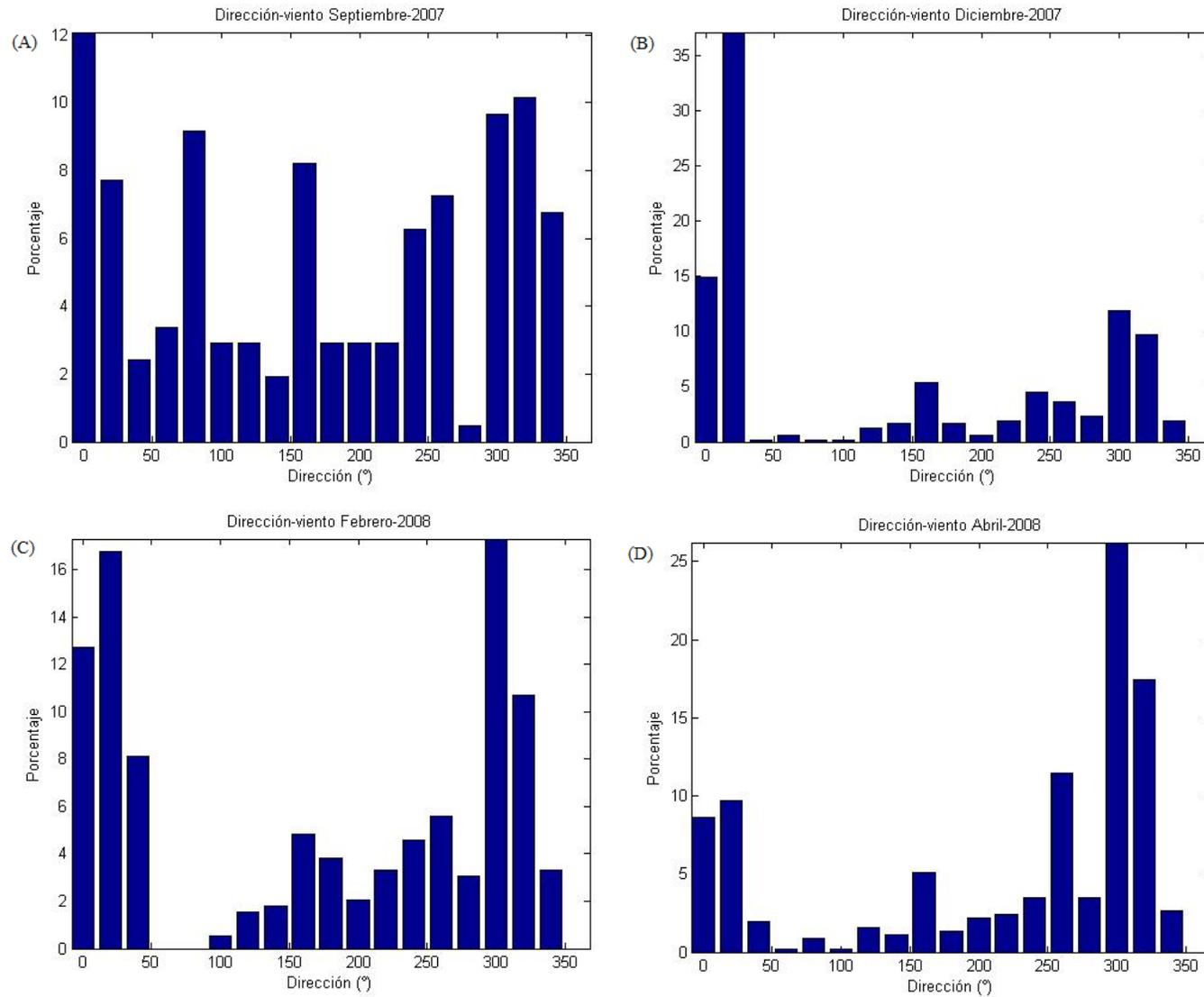
<b>Periodo de muestreo</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Media</b>
Septiembre 2007	Hav (m)	0.40	0.77	0.59
	H <sub>1/10</sub> (m)	0.81	1.57	1.19
	Hmax (m)	1.01	1.96	1.47
	Tc (s)	3.94	6	4.84
	Tz (s)	4.98	9.91	7.19
	Ts (s)	5.39	11.16	8.07
	Tmax (s)	5.23	10.58	7.68
Noviembre-Diciembre 2007	Hav (m)	0.31	1.93	0.58
	H <sub>1/10</sub> (m)	0.64	3.91	1.18
	Hmax (m)	0.76	4.55	1.44
	Tc (s)	4.15	7.80	5.51
	Tz (s)	5.46	13.94	8.35
	Ts (s)	6.08	15.46	9.23
	Tmax (s)	5.83	14.71	8.83
Marzo-Abril 2008	Hav (m)	0.40	1.52	0.74
	H <sub>1/10</sub> (m)	0.81	3.08	1.51
	Hmax (m)	0.98	3.8	1.86
	Tc (s)	3.85	6.15	4.81
	Tz (s)	4.96	12.63	7.29
	Ts (s)	5.54	14.35	8.22
	Tmax (s)	5.30	13.51	7.81

### Anexo 3

Base de datos promedio del cambio paulatino de las características de una onda al pasar entre dos isobatas en Bahía Colonet, obtenida a partir del programa *Waves v 1. 0.*

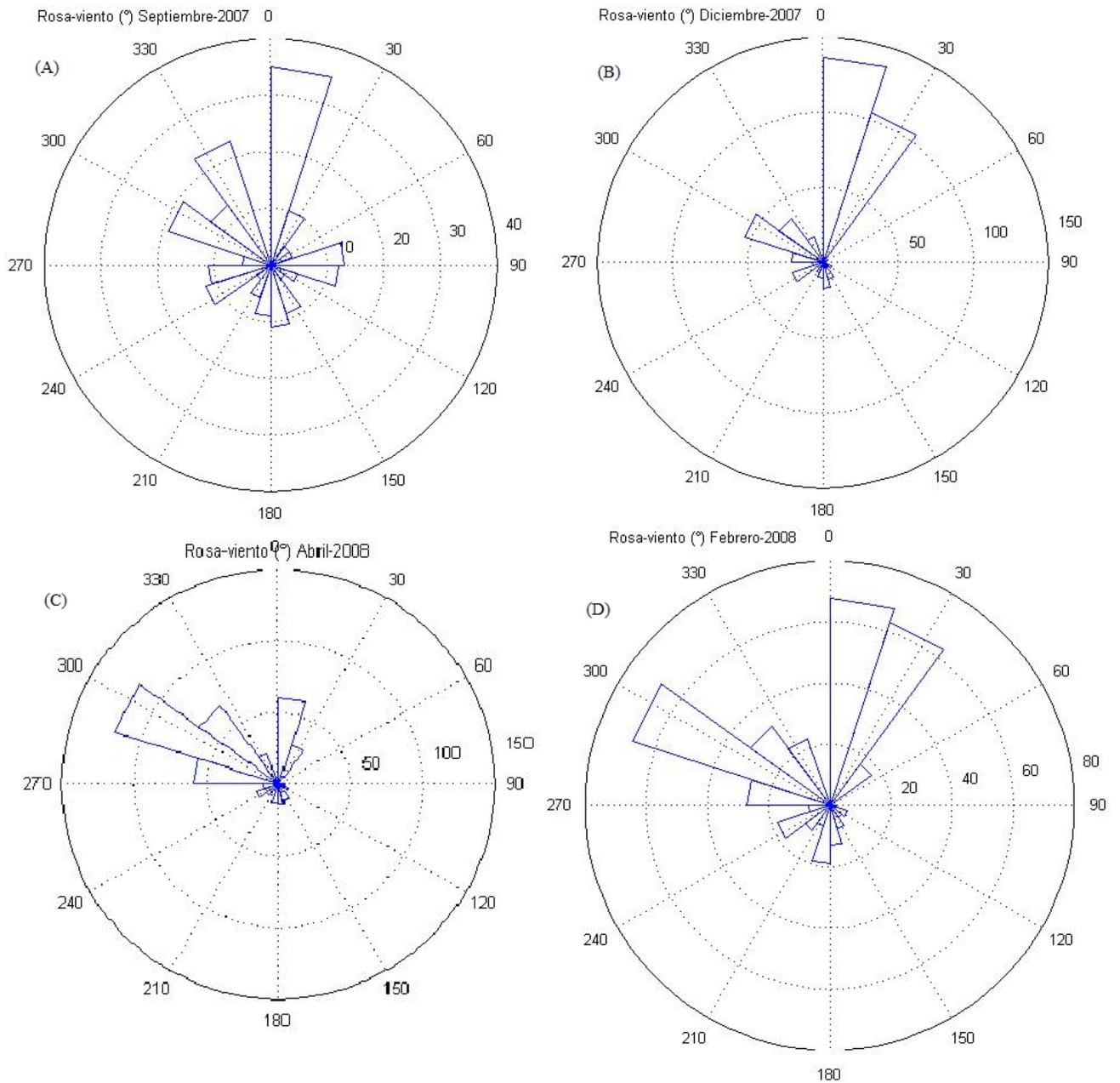
<b>ISÓBATA</b>	<b>DIST. ISÓBATA (m)</b>	<b>COTANGENTE</b>	<b>ALTURA OLA (m)</b>	<b>ANG. CRESTA (grados)</b>	<b>LONG. OLA (m)</b>	<b>CELERIDAD (m/s)</b>	<b>VELOC. GRUPO (m/s)</b>	<b>ENERGIA (Nm/m<sup>2</sup>)</b>	<b>FUERZA OLA (Nm/m)</b>
<b>200</b>	---	---	3.07	21.00	284.55	21.08	10.54	1207.57	12729.79
<b>200 27</b>	350.71	350.71	2.82	14.43	197.79	14.65	12	1072.81	12370.51
<b>27 26</b>	348.21	348.21	2.82	14.22	194.88	14.44	11.91	1020.97	12159.74
<b>26 25</b>	224.38	224.38	2.83	13.99	191.88	14.21	11.81	1050.64	12216.56
<b>25 24</b>	247.50	247.50	2.85	13.75	188.77	13.98	11.7	1057.63	12225.30
<b>24 23</b>	217.75	217.75	2.86	13.51	185.54	13.74	11.59	1063.25	12202.28
<b>23 22</b>	232.50	232.50	2.87	13.27	182.2	13.5	11.47	1080.73	12214.03
<b>22 21</b>	198.75	198.75	2.89	13.00	178.73	13.24	11.33	1143.96	12963.80
<b>21 20</b>	231.54	231.54	2.91	12.74	175.12	12.97	11.18	1012.39	12191.66
<b>20 19</b>	210.18	210.18	2.93	12.43	171.36	12.69	11.02	1109.25	12185.05
<b>19 18</b>	192.19	192.19	2.96	12.13	167.46	12.4	10.85	1125.07	12185.11
<b>18 17</b>	163.59	163.59	2.98	11.83	163.39	12.1	10.67	1135.43	12116.51
<b>17 16</b>	178.44	178.44	3.01	11.54	159.13	11.79	10.47	1158.44	12129.55
<b>16 15</b>	224.06	224.06	3.04	11.21	154.69	11.46	10.25	1181.66	12112.80
<b>15 14</b>	278.44	278.44	3.07	10.86	150.03	11.11	10.02	1205.13	12076.15
<b>14 13</b>	239.53	239.53	3.11	10.50	145.13	10.75	9.76	1236.27	12067.53
<b>13 12</b>	227.34	227.34	3.15	10.14	139.98	10.37	9.49	1268.82	12041.90
<b>12 11</b>	202.50	202.50	3.20	9.73	134.54	9.97	9.19	1308.95	12030.05
<b>11 10</b>	189.84	189.84	3.26	9.30	128.78	9.54	8.86	1358.55	12037.60
<b>10 9</b>	161.25	161.25	3.32	8.85	122.64	9.08	8.5	1409.73	11982.57
<b>9 8</b>	104.53	104.53	3.40	8.37	116.06	8.6	8.11	1477.86	11985.63
<b>8 7</b>	105.94	105.94	3.49	7.85	108.98	8.07	7.66	1564.52	11980.84
<b>7 6</b>	90.94	90.94	3.61	7.29	101.28	7.5	7.17	1666.87	11952.50
<b>6 5</b>	155.16	155.16	3.76	6.68	92.81	6.87	6.62	1772.85	11960.81
<b>5 4</b>	91.41	91.41	3.94	5.98	83.32	6.17	5.99	1982.34	11940.81

## Anexo 4



Porcentajes de ocurrencia de la dirección del viento obtenidos de una estación meteorológica en la localidad de Punta San Telmo. (A) septiembre 2007. (B) diciembre 2007. (C) febrero 2008. (D) abril 2008.

## Anexo 5



Diagramas en rosa del viento dominante en la región de Bahía Colonet, obtenidos a partir de una estación meteorológica en Punta San Telmo.

