

030969

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ciencias Marinas



**ANALISIS ESTADISTICO DEL OLEAJE MEDIDO FRENTE A LAS
COSTAS DE ROSARITO, B.C., DE 1994 A 1998.**

T E S I S

**Que para obtener el título de
OCEANOLOGO
presenta:**

Ana Esperanza Marichal González

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

Octubre del 2001

#030969

**COORD. DEL SISTEMA DE INFORMACION
ACADEMICA U.A.B.C.**

030969

**“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE MEDIDO
FRENTE A LAS COSTAS DE ROSARITO, B.C.,
DE 1994 A 1998”**

TESIS

Que presenta:

Ana Esperanza Marichal González

Aprobada por:



Presidente del Jurado
Dr. Asdrubal Martínez Díaz de León



Sinodal Propietario
M.C. Rafael Hernández Walls



Sinodal Propietario
M.C. Román Lizárraga Arciniega

RESUMEN

Se describen y analizan en función del tiempo la altura significativa, el período de cruces por cero y la dirección promedio del oleaje registrado por un sensor de presión ubicado frente a la planta Termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad ubicada en Rosarito B.C., de junio de 1994 a diciembre de 1998. Se presentan las distribuciones de frecuencia de ocurrencia tanto de alturas como de períodos, y su distribución conjunta. De igual manera se presenta en forma de rosas de oleaje, la distribución conjunta de altura y dirección. Por último, se analiza el comportamiento de los promedios estacionales de la altura, el período y la dirección.

Los principales parámetros del oleaje que prevalecen en la zona de estudio, son variables y alternan tanto estacionalmente como interanualmente. La variabilidad estacional está asociada a la variabilidad climática estacional y la variabilidad interanual pudiera estar asociada a fenómenos de mayor escala como lo es el fenómeno del Niño.

La altura significativa describió una variación estacional, presentando valores extremos durante los inviernos de 1995-1996 y 1997-1998, de 5.15 y 5.71m respectivamente. Las alturas más frecuentes resultaron ser las de 0.75 a 1.25m. Los períodos de mayor frecuencia de ocurrencia fueron los de 11 a 12 s. Los valores extremos ocurrieron en primavera, cuando el máximo fué de 18 s, y en otoño, cuando el máximo fué de 18.3 s.

La distribución conjunta de las alturas y los períodos presentó una relación muy similar durante las diferentes épocas del año consideradas. La distribución conjunta de alturas y direcciones indicó que la dirección preferencial de arribo del oleaje, la SO, está asociada a las mayores alturas de ola.

Se observó un cambio gradual en el período de mediciones durante el cual tanto Hs promedio como Tz promedio aumentaron año con año con una razón de 0.0624 m/año en el caso de Hs y 0.1764 s/año, en el caso de Tz. Por otro lado, la dirección promedio se trasladó 0.6756° hacia el norte.

*A mi familia:
Carlos mi papá,
Soledad mi mamá y
Andrea mi hermana,
por su apoyo y amor.*

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas, en especial a la sección de Oceanología Física por todo el apoyo brindado para el desarrollo y realización de este trabajo.

Al Dr. Asdrubal Martínez Díaz de León por su dirección, sus enseñanzas y explicaciones, su tiempo y su apoyo en todo momento.

A mis sinodales M.C. Román Lizarrárraga Arciniega y M.C. Rafael Hernández Walls, por revisar y corregir este trabajo.

Al Oc. Mario Marmolejo Lara, Jefe de la Residencia de Oceanología de la CFE-Rosarito, por facilitar los datos que se utilizaron en este trabajo, por su ayuda y amabilidad, por sus explicaciones y figuras.

Al Oc. Eduardo Gil por acompañarme a Rosarito, y tanto a él como al M.C. Sergio Larios y los compañeros que están en el área de Oc. Física por ayudarme a resolver dudas y por su amistad.

A la Facultad de Ciencias Marinas por las enseñanzas brindadas.

Al M.C. Rafael Hernández Walls por sus enseñanzas, su motivación e impulso para desarrollar trabajos y por su amistad.

Al Dr. Rodolfo Silva y a todo el grupo de Ingeniería de Costas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, porque con ellos inició la idea de trabajar el tema.

DEDICATORIA

A mis abuelas y abuelos, porque me han heredado la vida, amor y muchas enseñanzas que siempre voy a llevar conmigo.

A Eliseo Estudillo Zamora, por toda su ayuda y apoyo, pero sobretodo porque lo quiero mucho.

A Alejandra Chávez por sus clases que me alegraron los días, y a ella y a Moisés Castro por su amistad y cariño, que atesoro.

A mis amigas, Yuriria Badillo, Andrea Pozas, Karina Rodriguez y Valeria Jádiar, por todo su cariño y amistad, y por hacerme saber que en la amistad no importa la distancia espacial.

A mis amigas de la carrera, Gaby García, Gloria Padilla y Gaby Medellín, por las experiencias compartidas aquí, por las pláticas y por su amistad especial.

A todas las personas que me han apoyado o que me han brindado su amistad.

INDICE

	Página
Lista de símbolos	i
Lista de Figuras	ii
Lista de Tablas	iv
1. INTRODUCCION	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación del trabajo	3
2. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo General	5
2.2 Objetivos Particulares	5
3. ANTECEDENTES	6
4. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	13
5. METODOLOGIA	17
5.1 Base de datos	17
5.2 Pre-Análisis	18
5.3 Análisis estadístico	20
6. RESULTADOS	25
6.1 Variación temporal de los parámetros estadísticos	25
6.2 Frecuencias de ocurrencia de Hs y Tz	27
6.3 Frecuencia de ocurrencia conjunta de Hs-Tz	34
6.4 Frecuencia de ocurrencia conjunta de Hs- θ	41
6.5 Climatología general	48
7. DISCUSIONES	56
7.1 Variación temporal de los parámetros estadísticos	56
7.2 Frecuencia de ocurrencia de Hs y Tz	56
7.3 Frecuencia de ocurrencia conjunta de Hs -Tz	58
7.4 Frecuencia de ocurrencia conjunta de Hs - θ	59
7.5 Climatología general	61
8. CONCLUSIONES	65
9. BIBLIOGRAFIA	68

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descripción
θ	Dirección promedio
H	Altura de ola
H _s	Altura significativa
H _{1/3}	Altura significativa
H _{mo}	Altura de ola significativa estimada a partir del espectro
m ₀	momento de orden cero de la función de densidad espectral
T _z	Período de cruces por cero
T _{1/3}	Período significativa
T _p	Período del pico espectral
η	Elevación de la superficie libre del mar
Δt	Intervalo de tiempo
L	Longitud de ola
Ps	Pendiente significativa
g	Aceleración de gravedad
x	Coordenada horizontal
y	Coordenada vertical

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Localización geográfica del medidor de oleaje y de la batimetría de la zona	14
2. Localización del área de estudio	15
3. Método de cruces por cero	19
4. Variación de la altura significativa (Hs), el período de cruces por cero (Tz) y la dirección promedio (θ), de junio de 1994 a enero de 1999	26
5. Porcentajes de ocurrencia de Hs durante las diferentes estaciones del año	28
6. Porcentajes de ocurrencia de Tz durante las diferentes estaciones del año	29
7. Histogramas anuales de Hs y Tz, de 1994, 1995 y 1996	30
8. Histogramas anuales de Hs y Tz, de 1997 y 1998	31
9. Porcentaje de ocurrencia de Hs y de Tz para el período comprendido entre junio de 1994 y enero de 1999	32
10. Histogramas de distribución conjunta de Hs-Tz de los inviernos y las primaveras	35
11. Histogramas de distribución conjunta de Hs-Tz de los veranos y los otoños	36
12. Histogramas de distribución conjunta de Hs-Tz de 1994 y 1995	37
13. Histogramas de distribución conjunta de Hs-Tz de 1996 y 1997	38
14. Histograma de distribución conjunta de Hs-Tz de 1998	39

15.	Rosa de oleaje de todos los datos	43
16.	Rosa de oleaje de los inviernos	44
17.	Rosa de oleaje de los otoños	45
18.	Rosa de oleaje de las primaveras	46
19.	Rosa de oleaje de los veranos	47
20.	Promedios estacionales de Hs, Tz y dirección	49
21.	Valores máximos y mínimos de Hs y Tz registrados durante cada una de las estaciones y valores máximos registrados durante los inviernos.	50

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
I. Meses considerados para definir las diferentes épocas del año	21
II. Valores extremos, promedios y de desviación estándar de las alturas de ola (Hs), registrados durante cada estación de 1994 a 1998.	54
III. Valores extremos, promedios y de desviación estándar de los períodos (Tz), registrados durante cada estación de 1994 a 1998.	54
IV. Valores extremos, promedios y de desviación estándar de las direcciones de arribo del oleaje, registrados durante cada estación de 1994 a 1998.	55

1. INTRODUCCIÓN

El oleaje es la forma de energía más sobresaliente de los océanos y una de las condiciones oceánicas más importantes que afectan las actividades del hombre en las regiones costeras (Padilla-Hernández, 1989). Su estudio es importante porque se relaciona directamente con la mayoría de actividades costeras como dragado, pesca, navegación, actividades recreacionales, maniobras de carga y descarga, y en general, es necesario para la planeación y explotación adecuada de los recursos costeros. Una lista más detallada de las aplicaciones de la información de oleaje, puede ser encontrada en Edmisten (1978).

Dentro del estudio de los procesos costeros, el oleaje está considerado como el principal agente de erosión y transporte de sedimentos en el medio costero (Longuet-Higgins, 1952), ya que induce el movimiento de sedimento perpendicular y paralelo a la costa, y la generación de corrientes litorales. Además, el oleaje es el fenómeno más importante que debe ser considerado en estudios y diseños de ingeniería marítima. Las fuerzas ejercidas debido a la acción del oleaje en estructuras costeras como un puerto, un espigón o una plataforma, son las más relevantes a considerar en su diseño (Pedrozo-Acuña, 2000).

Por otra parte, el estudio del oleaje nos permite calibrar y evaluar los modelos existentes de predicción del oleaje (Carter, 1987), y es de utilidad básica para efectuar análisis sobre su generación, propagación y disipación, ya que juega un papel

predominante en los procesos de transferencia de energía, tanto de la atmósfera al océano como entre las diferentes componentes de frecuencia del oleaje (Phillips, 1958). Por todo lo anterior, es fundamental conocer las principales características del oleaje, dentro de las que destacan su dirección de propagación, altura y período.

El fenómeno del oleaje se caracteriza por ser irregular y aleatorio, es decir, no se repite en el tiempo ni en el espacio. Debido a la gran variabilidad que presenta, su estudio es muy complejo. No existe ninguna teoría matemática que describa exactamente su movimiento (Uribe-Rojo, 1996). Sin embargo, una de las principales formas de estudiarlo es utilizando métodos estadísticos, lo cual nos permite describir de manera adecuada las principales características del fenómeno. Para entender la variabilidad temporal del oleaje es necesario registrarlo en forma continua durante largos períodos de tiempo, (Lambert-Arista, 1993). Generalmente, en la medida que se pueda contar con mayor cantidad de información del oleaje, los resultados que arrojen los análisis estadísticos serán más representativos de la realidad. Es por ello que países como Estados Unidos, Canadá e Inglaterra, -entre otros-, cuentan con programas para la continua medición de oleaje a lo largo de sus costas.

Desgraciadamente, en México no existen este tipo de programas, por lo que la descripción estadística del oleaje que arriba a sus costas se hace, la mejor de las veces, utilizando series temporales cortas de mediciones de oleaje. Tal es el caso de la costa Pacífico de Baja California, donde a pesar de que se encuentran localizadas ciudades

tan importantes como Tijuana, Rosarito y Ensenada, no existen programas permanentes dedicados a la medición del oleaje. En el caso del presente proyecto se cuenta con datos obtenidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en las costas de Rosarito, BC, durante un lapso de cuatro años y medio, lo cual representaría el registro más largo a ser analizado hasta el momento para el lugar, y quizás a lo largo de toda la costa Pacífico de Baja California.

1.1 Planteamiento del problema

Debido a que se cuenta con la serie temporal más larga de mediciones de oleaje obtenida frente a las costas de Rosarito, B.C., el problema central de este trabajo es el de determinar las características estadísticas de dicha serie de datos, con el fin de identificar su variabilidad entre las distintas estaciones del año, así como entre los diferentes años considerados. Esta descripción estadística debe permitirnos definir el comportamiento de los principales parámetros del oleaje: la altura, el período y la dirección de aproximación típica a las costas de Rosarito, lo cual, como ya se mencionó, es de enorme importancia para la planeación y diseño de construcciones costeras.

1.2 Justificación del trabajo

Es conveniente contar con información relacionada al oleaje que nos permita definir las características que éste presenta en zonas de cierta importancia como lo es Rosarito, BC., lugar en el que existen obras marítimas que son afectadas por la constante acción de las olas. En particular, la costa Oeste de la península de Baja California, -donde se

encuentra Rosarito-, está expuesta a oleaje que puede producir serios daños (Rivas-Cáceres, 1992). Por ello es necesario estudiar el oleaje que arriba a sus costas, con la finalidad de prever y prevenir futuros problemas, debido a que las obras marítimas de la zona y, en general, los diseños de ingeniería marina de un país, representan un impulso al crecimiento económico ya que aprovechan la enorme cantidad de recursos del litoral y además fomentan la actividad económica de la región (Pedrozo-Acuña, 2000),

Es importante señalar que en México se han realizado muy pocos estudios sobre el comportamiento del oleaje en las costas mexicanas y en consecuencia existe la necesidad en el país de contar con un banco de datos de oleaje que comprenda largos períodos de medición y estadísticas para diferentes sitios representativos de las costas de la República Mexicana (Oropeza-Rosales, 1998), como es el caso de Rosarito en BC.

Considerando que los trabajos existentes sobre el oleaje de las costas de Rosarito son escasos y no cuentan con información de varios años, puede decirse que este trabajo es el primer análisis de información puntual en el espacio, presentado de manera formal e integral y que puede ser utilizado para fines tales como el diseño y la planeación de obras costeras.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Describir la estadística general del oleaje que arriba a las costas de Rosarito, B.C., utilizando datos de oleaje medidos durante el período de 1994 a 1999.

2.2 Objetivos particulares

Identificar la variabilidad energética del oleaje, en términos de la altura significativa, a lo largo de las diferentes épocas del año y en diferentes años.

Describir el comportamiento del período de cruces por cero durante cada estación del año y a lo largo de los años que comprenden el período de estudio.

Identificar la dirección de aproximación típica del oleaje durante las diferentes épocas del año.

Determinar de manera cualitativa la relación conjunta típica entre diferentes características del oleaje, tales como altura - período y altura - dirección de ola.

3. ANTECEDENTES

Existen pocos trabajos sobre análisis estadístico del oleaje que arriba a las costas de Rosarito, B.C. Esto se debe, en parte, a que hasta hace poco la Comisión Federal de Electricidad (CFE) era la única institución que contaba con un ológrafo midiendo continuamente. Los datos obtenidos por dicha institución no eran fácilmente accesibles al público y la propia CFE no ha publicado ningún trabajo, únicamente ha generado informes internos. Actualmente el CICESE cuenta con un medidor de oleaje, pero la cantidad de información obtenida hasta el momento no es mucha y tampoco ha sido publicada.

Marmolejo-Lara (1985) fué el primero que realizó mediciones visuales del oleaje (período, altura y ángulo de incidencia) frente a la escollera de la CFE, durante el período de abril de 1981 a mayo de 1982. A partir de sus observaciones, calculó parámetros, -correspondientes a todo el período de mediciones-, como: altura significativa, resultando ser de 1.8 m; altura media, de 1.4 m; período promedio, de 13.7 s; la máxima altura registrada de 4 m; dirección de aproximación de las olas, que según sus observaciones cambia a lo largo del año entre el SSW y el WNW.

Godínez-Sandoval (1986), repasa en que casi todos los estudios y observaciones realizados en la zona costera entre Tijuana y Rosarito, están limitados a aguas profundas, lejos de la costa. Este autor realiza un estudio de dispersión en el que

encuentra que la corriente costera tiene una dirección sur durante marzo y en julio tiene dirección norte.

Padilla-Hernández (1989), lleva a cabo un trabajo sobre la potencia y dirección del oleaje en la zona de estudio, utilizando datos de un sensor de presión de la CFE, y concluye que las direcciones de arribo se alternan entre suroeste y noroeste de octubre a diciembre, mientras que durante el mes de enero la dirección es principalmente suroeste y que durante febrero-marzo el oleaje proviene del noroeste. En general, la dirección promedio resultó ser suroeste. Sin embargo, señala que este dato no puede utilizarse para fines prácticos pues los eventos energéticos importantes están asociados a eventos del noroeste como sucede en el mes de febrero. Es en este mes cuando encuentra niveles de potencia más grandes, y como la potencia es proporcional a la altura del oleaje, se puede decir entonces que es en este mes cuando se presentan las olas más grandes. Por otra parte, observa un predominio de frecuencias bajas en toda su serie de datos, por lo que dice, el principal aportador de energía es el *swell*.

Flick (1994), explica que debido a que el Océano Pacífico es el más grande en el mundo, las tormentas tienen suficiente espacio, o *fetch*, para generar olas altas y largas, y que a eso se debe la influencia predominante del *swell*. Por otra parte, advierte que la zona del Sur de California y la parte oeste de la Península de B.C., se caracterizan por la presencia de islas, bancos someros de arena, cañones costeros submarinos y una batimetría complicada. Estos factores aunados a la reflexión,

refracción, difracción y disipación de las olas incidentes, ocasionan que exista uno de los más complicados climas del oleaje del mundo.

Foo Kong-Foo Kong (1994) indica que para el área de estudio se ha logrado establecer que el flujo hacia el sureste de la corriente de California, se aproxima más a la costa durante abril y mayo, y hacia fines de verano tiende a alejarse. A partir de un informe de la CFE realizado con información de oleaje obtenida durante un año (1985-1986), nota que en los meses de verano (mayo-junio), el período y altura del oleaje se acortan. Como conclusión menciona que las condiciones oceanográficas que prevalecen en el área, la caracterizan como altamente dinámica.

Cerca-Martínez (1995), utiliza datos tomados durante 10 años, utilizando una boya localizada en aguas profundas en Mision Bay, California, publicados por los ingenieros de la armada de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers). Menciona que el oleaje de la zona presenta un comportamiento marcadamente estacional, correspondiendo los mayores valores de altura y período a los meses de invierno (diciembre-febrero), mientras que en los meses de verano (junio-agosto) se presentan condiciones menos energéticas o períodos de calma. Sin embargo, este autor señala que Rosarito presenta una costa abierta y que por lo tanto el oleaje no sufre refracción.

Rivas-Cáceres (1992), hace una clasificación general del oleaje que arriba a la costa oeste de B.C. dependiendo de las alturas de ola. Considera como oleaje bajo al de alturas hasta de 0.5 m ; oleaje medio, a las olas con alturas de 0.5 hasta 2.5 m y oleaje alto, a las olas con alturas mayores de 2.5 m, en condiciones de tormenta de invierno y alcanzando en casos extremos hasta 7 m de altura.

Appendini-Albrechtsen (1995 y 1998), señala que el oleaje que incide en las costas de Rosarito es del mismo origen que el oleaje que arriba a las costas del sur de California, aunque presenta condiciones un poco distintas principalmente debido a la presencia de las islas del sur de California. El oleaje de esta área puede agruparse en tres categorías según la zona de generación: a) oleaje originado en el hemisferio norte y que predomina en los meses de invierno; b) oleaje originado en el hemisferio sur que domina durante los meses de verano y que es de menor altura que el originado en el hemisferio norte ya que la zona de generación está más alejada; y finalmente c) oleaje local que se genera por tormentas que se desplazan en la región Rosarito, así como los fuertes gradientes de presión que inducen vientos fuertes y brisas diurnas. Este último oleaje puede ser energético aunque no es tan dominante en la climatología del oleaje.

Además de la variación estacional, Appendini-Albrechtsen advierte que se ha observado una variación de largo plazo, en la que se alternan períodos de menor y de mayor energía. De hecho, la década de los 70 presenta un clima del oleaje de baja

energía en comparación del oleaje que se ha presentado en años subsecuentes. En cuanto a los eventos extremos, como el sucedido en 1998, se aprecia que se presentan con cierta periodicidad y coinciden la mayoría de las veces con fenómenos como es el caso del Niño, que aparentemente es el factor dominante que determina el clima en la cuenca del Pacífico.

El fenómeno del Niño presenta gran correlación con eventos de oleaje severo en la costa este del Pacífico, específicamente en la región sur de California, como la ha demostrado Seymour (1984, 1996 y 1998). Estos eventos incluyen oleaje de gran altura, con alturas significantes a veces mayores a los 6 m, y períodos largos, con períodos pico de incluso más de 19 s. Seymour indica que la década de 1988 en adelante presenta una densidad inusual de eventos del Niño. Tanto en el invierno de 1994-1995 como en 1998 se presentó dicho fenómeno. Se considera que las tormentas generadas durante el invierno de 1994-1995 definen al evento del Niño como de moderado a intenso, y las tormentas del invierno 1997-1998 lo caracterizan en comparación como de carácter más severo. En general, explica el autor, aunque la mediana anual de las alturas de ola ha decrecido en los últimos 20 años (no hay muchas olas de más de 6 m), el número de eventos de tormenta largos se ha incrementado en gran medida (se presentan varias olas de más de 4 m). Es decir, que debido a la influencia del Niño no se ha demostrado una tendencia a incrementar la altura de ola, pero sí se han generado mayor cantidad de tormentas severas de invierno.

Oropeza-Rosales (1998), menciona que los fenómenos que afectan al Océano Pacífico pueden diferenciarse por la escala espacio-temporal en la que ocurren. Algunos se consideran fenómenos interanuales, con períodos de 3 a 7 años, como lo es el fenómeno El Niño. Otros se consideran fenómenos de escala estacional, y según este autor, constituyen por mucho la escala más energética en el Pacífico y deben su existencia a la variación anual de la radiación solar que llega a la Tierra y que a su vez influye a los vientos que soplan sobre la superficie del mar. En consecuencia, el comportamiento del Pacífico Mexicano está considerado como bimodal estacional, presentando dos regímenes: primavera-verano y otoño-invierno. La sucesión entre estos dos regímenes en el tiempo no es simétrica. Mientras la transición del patrón de primavera-verano al de otoño-invierno es un proceso suave, la transición contraria ocurre de manera abrupta.

Carrillo-Berumen (1998), realizó un estudio sobre la dinámica sedimentaria en las inmediaciones de la obra de toma de la CT, para el cual era necesario analizar datos de oleaje. La autora hizo una recopilación bibliográfica de los Resúmenes anuales de mediciones oceanográficas de 1985 y 1986, llevados a cabo por la Residencia de Estudios Oceanográficos del Pacífico (REO), de la CFE. A partir de esta recopilación encontró que las alturas y períodos de ola más frecuente son: 1.01 – 1.5 m y 12 – 14 s, respectivamente, con un ángulo de incidencia dominante del suroeste. También encontró que las alturas máximas se presentaron de octubre a febrero, es decir, en el período de otoño-invierno. Además, realizó tablas de

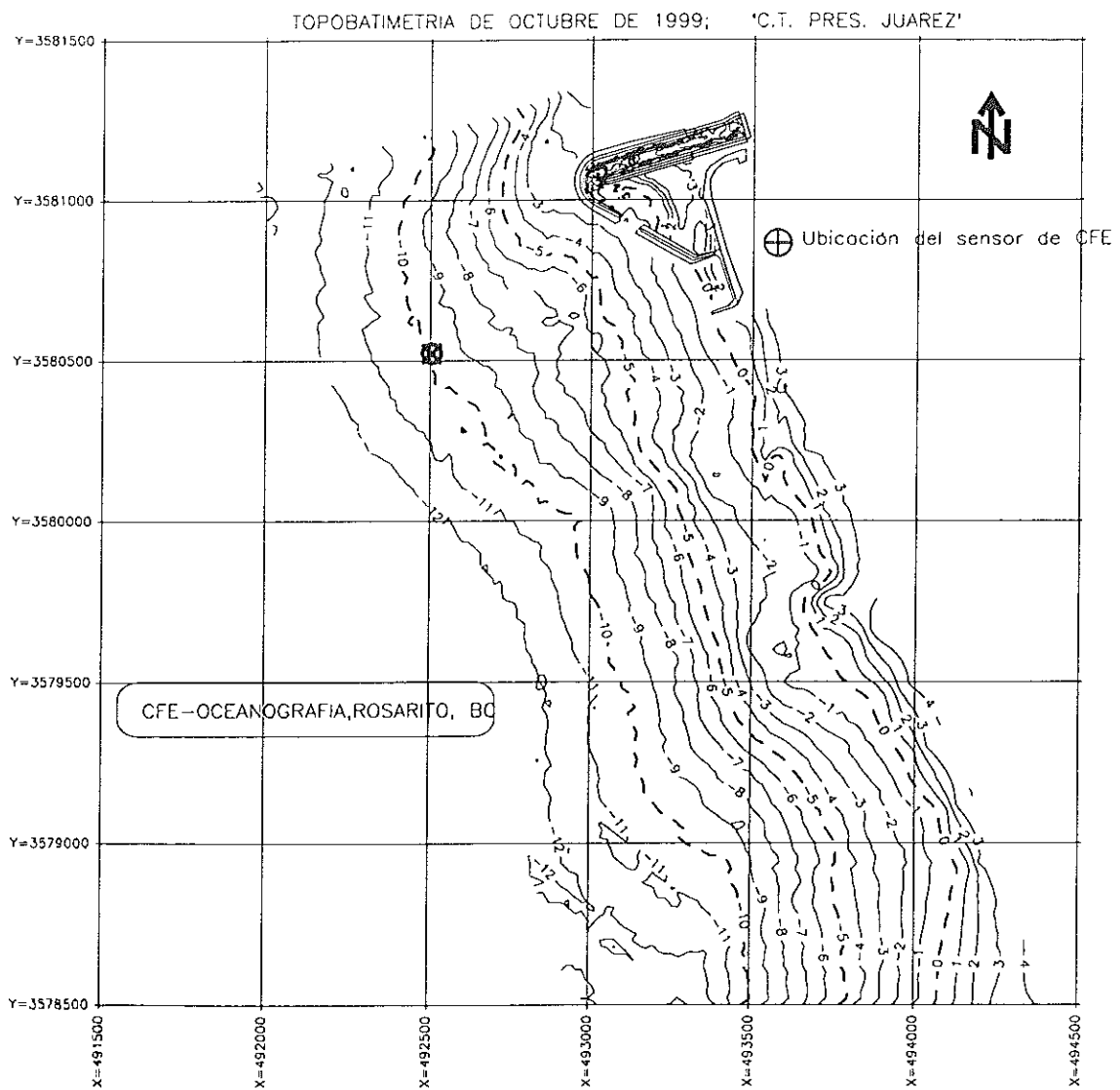


Fig. 1. Localización geográfica del medidor de oleaje y batimetría de la zona.

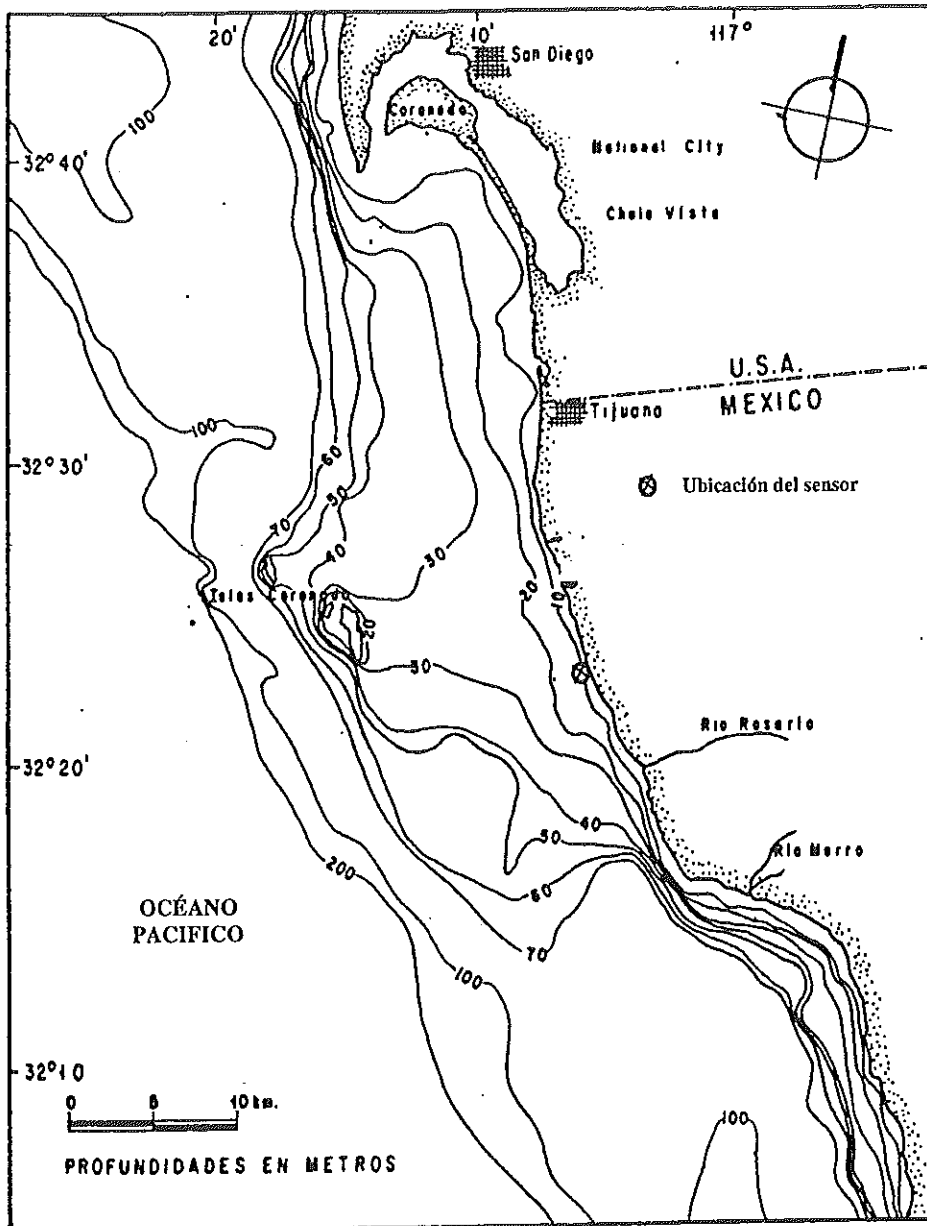


Fig. 2. Localización del área de estudio.

El medidor de oleaje con que se tomaron los datos se encontraba localizado a una profundidad de 10 metros, y a una distancia de aproximadamente 1 km de la costa, frente a las obras de acceso de agua, detención de sedimento y desagüe de la CT , que consisten en un par de escolleras y un par de espigones como se muestra en la fig. 1.

5. METODOLOGÍA

5.1 Base de datos

Con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos planteados, se adquirió información de oleaje generada por el Departamento de Oceanografía de Rosarito, de la Comisión Federal de Electricidad. La base de datos consta de 9,475 registros de oleaje correspondientes a un período de cerca de 5 años, del 15 de junio de 1994 al 7 de enero de 1999. Dichos registros fueron obtenidos utilizando un sensor de presión del tipo Pacer de la Compañía Sea-Data, el cual registra la variación de presión inducida por las fluctuaciones del nivel del mar debidas al oleaje, con una resolución de 0.1 cm para las alturas y 0.1 s para los períodos. Es importante mencionar que existen lapsos de tiempo durante los cuales no hay datos debido a que durante ellos hubo problemas de medición por parte del instrumento, como fallas en la batería o fallas en la estructura misma debido a la acción de agentes externos como puede ser el paso de un barco que la pudo haber tumbado.

El aparato se encontraba situado frente a la obra de toma de agua de la termoeléctrica, sobre la isóbata de los 10 m, (Fig. 1). Fue programado para grabar 1024 datos durante 17.06 minutos, con una frecuencia de muestreo de tres horas y con un intervalo de tiempo (Δt) entre dato y dato de 1 s. La información se almacenó en estado sólido para después ser transferida al disco duro de una computadora personal (PC).

5.2 Pre-Análisis (Obtención de parámetros estadísticos a partir de los archivos individuales)

Aunque la propia CFE realizó el procesamiento de los datos registrados por el ológrafo, aquí se presenta un breve esbozo del procedimiento comúnmente empleado.

Primeramente se corrigen manualmente los archivos incompletos, dañados o considerados de mala calidad. Posteriormente los datos crudos se transforman del sistema hexadecimal al c.g.s. La longitud de los archivos se corta hasta 1024 datos para poder ser procesados; se eliminan tanto el promedio, -para establecer un nivel de referencia igual a cero-, como la tendencia lineal, -para desechar cualquier frecuencia componente cuyo período sea mayor que la longitud del registro, como la marea-, (Padilla-Hernández, 1989). Además, es necesario amortiguar el efecto del truncamiento debido a que las series de tiempo registradas están delimitadas por su período de medición. Para ello, se suavizan los extremos multiplicándolos por una función, como por ejemplo la ventana coseno. Los principales parámetros estadísticos pueden calcularse de diferentes maneras, ya sea: a) directamente del perfil de elevaciones de la superficie, (dominio del tiempo) o b) del espectro de energía de los registros de oleaje, (dominio de la frecuencia).

El sensor genera series de tiempo de presiones que pueden ser relacionadas a las elevaciones de la superficie del nivel del mar por medio de la teoría lineal del oleaje. En el dominio del tiempo, la altura y el período significantes se calculan de las elevaciones,

$\eta(t)$, mediante el método de cruces por cero, (fig. 3). Dicho método consiste en establecer el nivel medio del mar y marcar e identificar cada punto donde los valores de $\eta(t)$ crucen ascendentemente dicho nivel. El tiempo entre puntos consecutivos define el período de la ola, conocido como período de cruces por cero (T_z), y la distancia vertical máxima entre cresta y valle define la altura (H). A partir de ello, se calculan la altura significativa ($H_{1/3}$) y el período significativo ($T_{1/3}$), como el promedio del tercio de las alturas más grandes de un registro y sus períodos asociados (Torres-Navarrete, 1986).

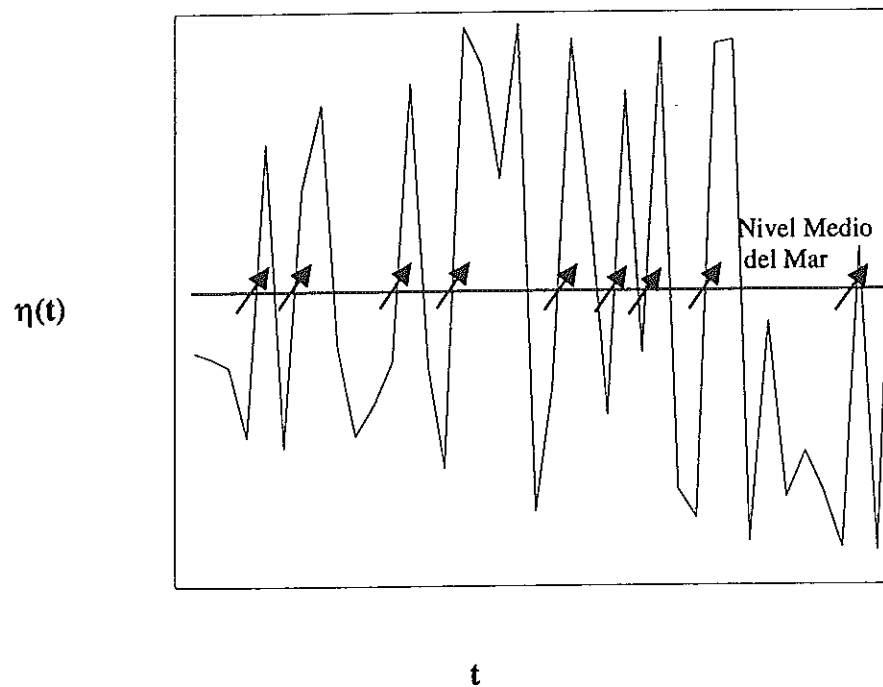


Fig. 3. Método de cruces por cero.

El uso de una corrección teórica, -que depende de la frecuencia-, para compensar la atenuación de la profundidad , permite estimar el espectro de energía de las olas a partir del espectro de presión (Torres-Navarrete, 1986). A partir del espectro de energía se obtiene la altura significativa, calculando el área bajo el espectro de la energía total y se representa por H_{mo} ; el período del pico espectral (T_p), que es el inverso de la frecuencia donde se localiza el máximo del espectro.

La dirección del oleaje se calcula a partir de las componentes de velocidad registradas por un correntímetro electromagnético que también forma parte del instrumento. Este correntímetro mide el flujo de agua en un plano normal a su eje longitudinal, presentándolo como las dos componentes ortogonales x y y , orientadas por medio de una brújula . De esta manera se obtiene la dirección promedio por registro.

5.3 Análisis estadístico (estacional y anual)

Para poder identificar posibles diferencias entre el comportamiento del oleaje de un año a otro, las diferencias entre distintas épocas de un mismo año, y las que se pudieran presentar entre las mismas épocas pero de diferentes años, el banco de datos de oleaje se analizó distinguiendo diversas situaciones. Tales situaciones son: todos los datos de cada año; los datos correspondientes a cada una de las estaciones (primavera, verano, otoño e invierno) de cada uno de los diferentes años, y todos los datos de todos los años correspondientes a las diferentes épocas del año antes mencionadas.

Los meses que se consideraron para definir cada una de las estaciones del año se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Meses considerados para definir las diferentes épocas del año.

Epoca	Meses considerados
Primavera	marzo – mayo
Verano	junio – agosto
Otoño	septiembre – noviembre
Invierno	diciembre - febrero

En todos los casos se realizaron primeramente gráficas en el dominio del tiempo con la finalidad de observar la calidad de los datos, es decir, si los valores y su variación se podían considerar aptos para ser analizados. En el caso de las direcciones, (θ), se observó una rotación de 180^0 que no concordaba con la realidad, ya que significaría que el oleaje provendría de la costa. Debido a ello, los valores de las direcciones fueron corregidos rotándolos 180^0 . El período pico (T_p) fué descartado como utilizable debido a que su variación era muy errática, por lo que se decidió utilizar el período de cruces por cero para los fines de este trabajo.

Una práctica común para realizar estimaciones del porcentaje de ocurrencia de cierta variable de importancia, como lo son H_s , T_z y θ , es hacer histogramas. Estos gráficos nos ilustran muy bien la distribución de los datos, nos permiten conocer el principal intervalo de valores que presenta nuestra variable y saber si su distribución es unimodal o polimodal, además de que la moda es fácilmente visualizada. En este trabajo se calculó el porcentaje de ocurrencia de la altura, el período y la dirección del oleaje, para poder realizar histogramas de una sola variable e histogramas conjuntos para parejas de valores de altura y período. Estos últimos, también conocidos como diagramas de dispersión, nos permiten obtener una idea de la relación entre la altura del oleaje y el período en diferentes épocas. Cada valor de porcentaje de ocurrencia representa una pareja de valores de H_s - T_z o H_s - θ . Los valores más grandes representan mayor ocurrencia de ciertas parejas de valores. A partir de estos diagramas se puede inferir si existe algún tipo de asociación entre las dos variables y se puede determinar su intervalo de asociación. La teoría del comportamiento conjunto de alturas-períodos propuesta por Longuet-Higgins (1975), predice una variación del período inversamente proporcional a una altura dada del oleaje (Martínez-Díaz de León, 1989).

Para efecto del presente trabajo, se consideraron intervalos de clase de 0.25 m –en los histogramas de una variable-, y de 0.5 m –en los histogramas conjuntos-, en el caso de las alturas significantes, e intervalos de 1 s en el caso de los períodos. También se realizaron histogramas conjuntos de altura y dirección, siendo estos últimos presentados en forma de rosas de oleaje, para facilitar la visualización de los resultados. Al

realizarlas se estableció un intervalo de clases de alturas de 0.5 m y un intervalo de direcciones de 22.5° , analizando los datos en su totalidad y después clasificándolos por estaciones.

En todos los casos se calculó el porcentaje normalizado, dividiendo la frecuencia de ocurrencia de las clases anteriormente mencionadas entre el número total de datos y multiplicando el resultado por 100, para presentar los resultados en forma de porcentajes. La única excepción fué la de los histogramas conjuntos de $H - Tz$, en los cuales las frecuencias de ocurrencia calculadas fueron divididas entre el número total de datos, multiplicadas luego por mil y redondeadas al número entero más cercano, para evitar gran cantidad de cifras y facilitar su presentación visual. En estos histogramas se calculó la pendiente significativa que delimita por debajo de ella a todos los datos de las distintas gráficas, definida como altura de la ola/ longitud de la ola, ($P_s = 2\pi H_s / g T_z^2$), donde π es igual a 3.14 y g es la aceleración de la gravedad igual a 9.81 m/s^2

Por otra parte, se calcularon los promedios, se identificaron los valores extremos de H_s , T_z y θ , para las estaciones de los cinco años (94-98), de manera que se pudiera comparar la magnitud –en cuanto a valores máximos- de los eventos extremos. Se calculó la regresión lineal tanto de los promedios como de los máximos, esto último con la finalidad de identificar algún tipo de tendencia general en el comportamiento del oleaje al paso de los años.

Para finalizar y como un resumen final, se calcularon los promedios, desviación estándar y valores máximos y mínimos de los datos, organizándolos por años y por estaciones, de manera que se tengan agrupadas la información y las características más sobresalientes de la totalidad de los datos, a partir de las cuales muchas veces se realizan cálculos tan importantes como lo es la estimación de la altura de ola de diseño de estructuras costeras.

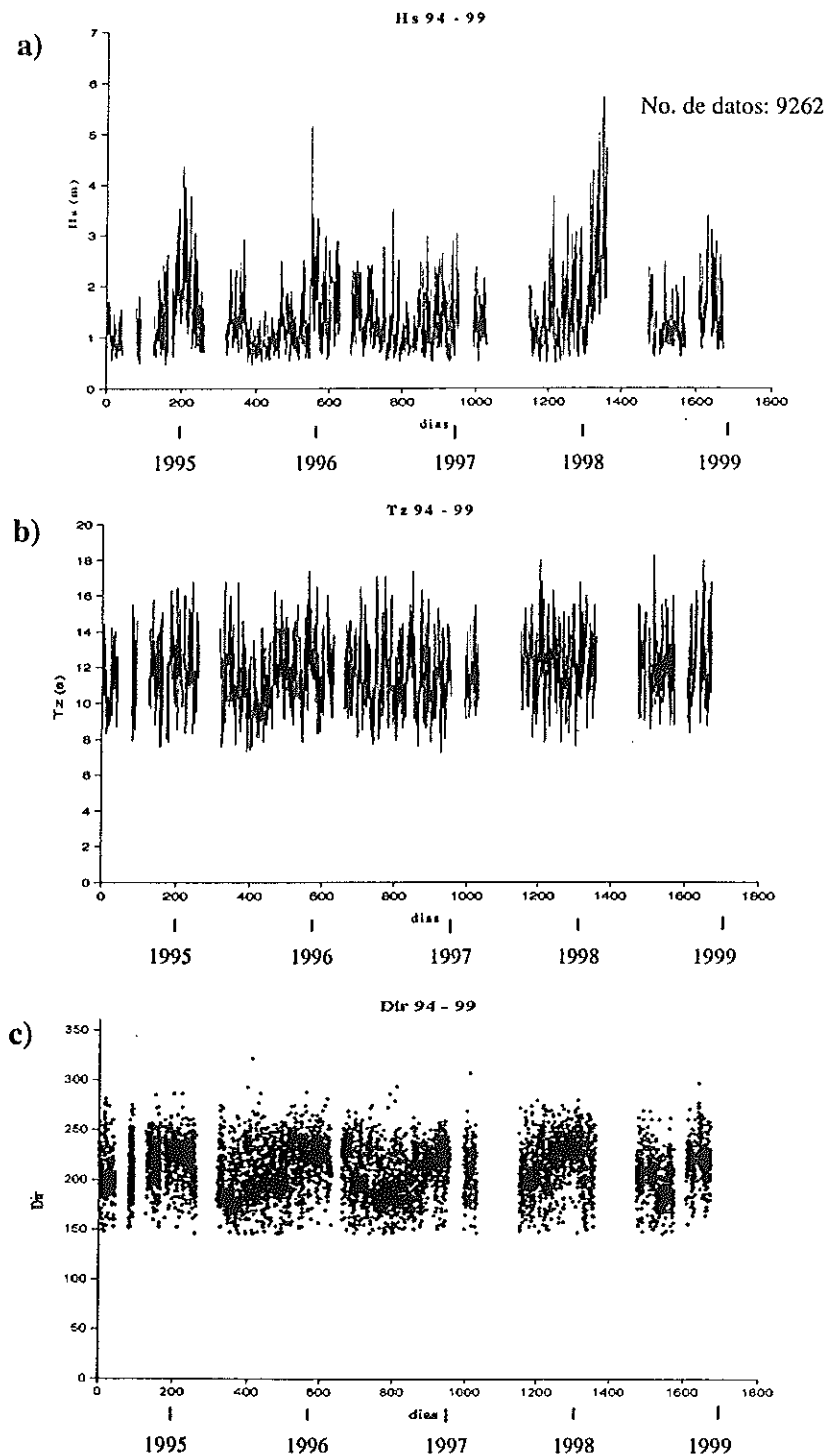


Fig. 4. Variación de la altura significativa (H_s), el período de cruces por cero (T_z) y la dirección promedio (θ), de junio de 1994 a enero de 1999.

que se forman al intensificarse los sistemas de baja presión en el Pacífico Norte. En general, las alturas variaron entre 0.5 y 5.8 m. Por otra parte, y a diferencia de las alturas, el período (fig.4b), presentó una variación bastante uniforme a lo largo de los 5 años, sin picos predominantes, y cuyos valores oscilaron entre 7.6 y 18.3 s. En cuanto a θ , (fig. 4c), se observó una variación de $\pm 50^\circ$ aproximadamente, alrededor de la dirección promedio que resultó ser de 213° , es decir SO. Este resultado es interesante debido a que en la mayor parte de los estudios previos que existen sobre la zona, se presentan direcciones con ángulos en promedio mayores a lo encontrado aquí.

6.2 Frecuencia de ocurrencia de Hs y Tz.

Para cada una de las estaciones del año, para cada año y para todos los datos, se calcularon histogramas de frecuencia de ocurrencia de Hs y Tz. En todos los casos se consideraron intervalos de clase de 0.25 m y de 1 s respectivamente. Los histogramas se muestran en las figuras 5 a 9.

En el análisis estacional (fig.5), como se puede observar de los histogramas, el porcentaje de ocurrencia de Hs en las cuatro épocas del año se asemeja visualmente a una función de distribución de probabilidad teórica del tipo Rayleigh. En general el oleaje de mayor altura se presentó en invierno, con una frecuencia de ocurrencia de 0.2 % para las olas que sobrepasan los 5.0 m. El oleaje alto, de más de 2.5 m de altura representa el 13 % del total del oleaje de invierno. Las alturas más pequeñas, consideradas de oleaje bajo, de entre 0.5 y 1.0 m, presentaron mayor frecuencia de ocurrencia en el verano,

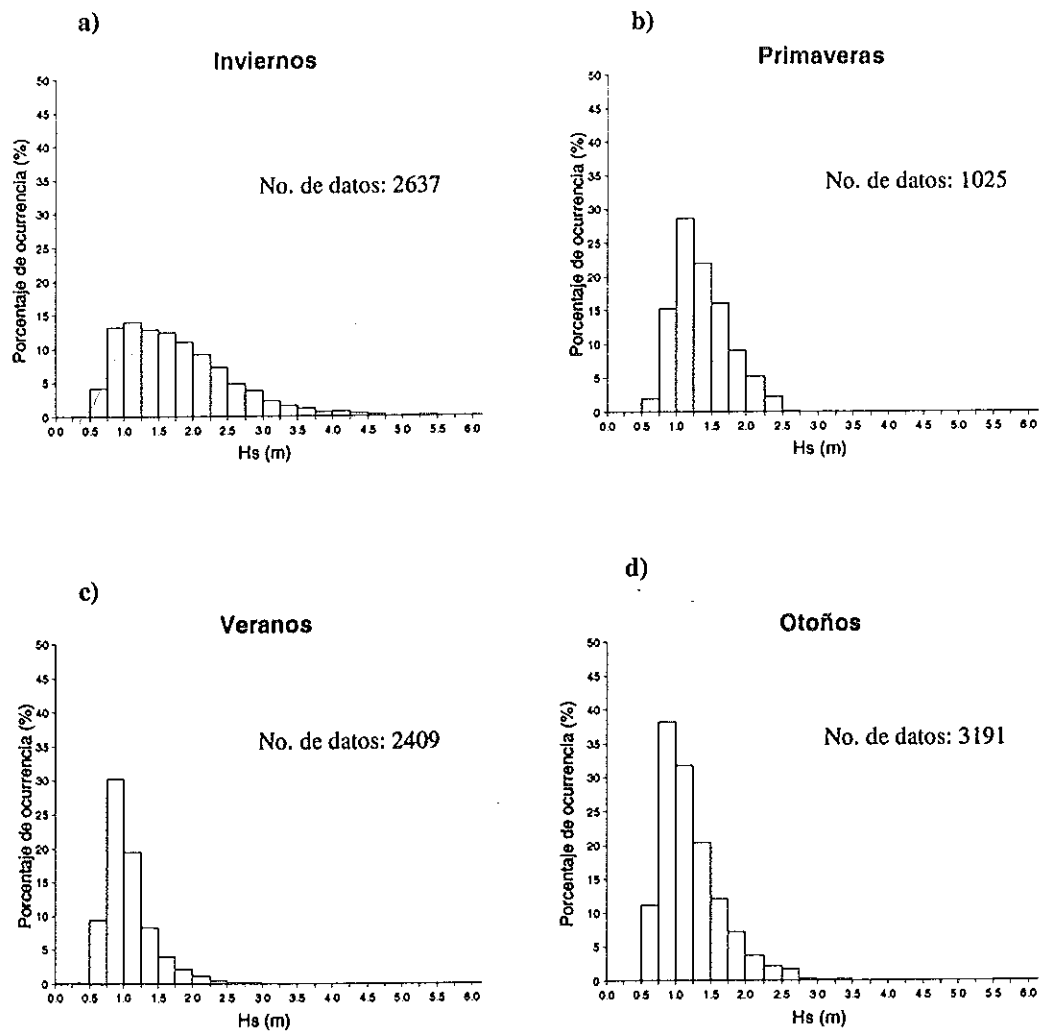


Fig. 5. Porcentajes de ocurrencia de Hs durante las diferentes estaciones del año.

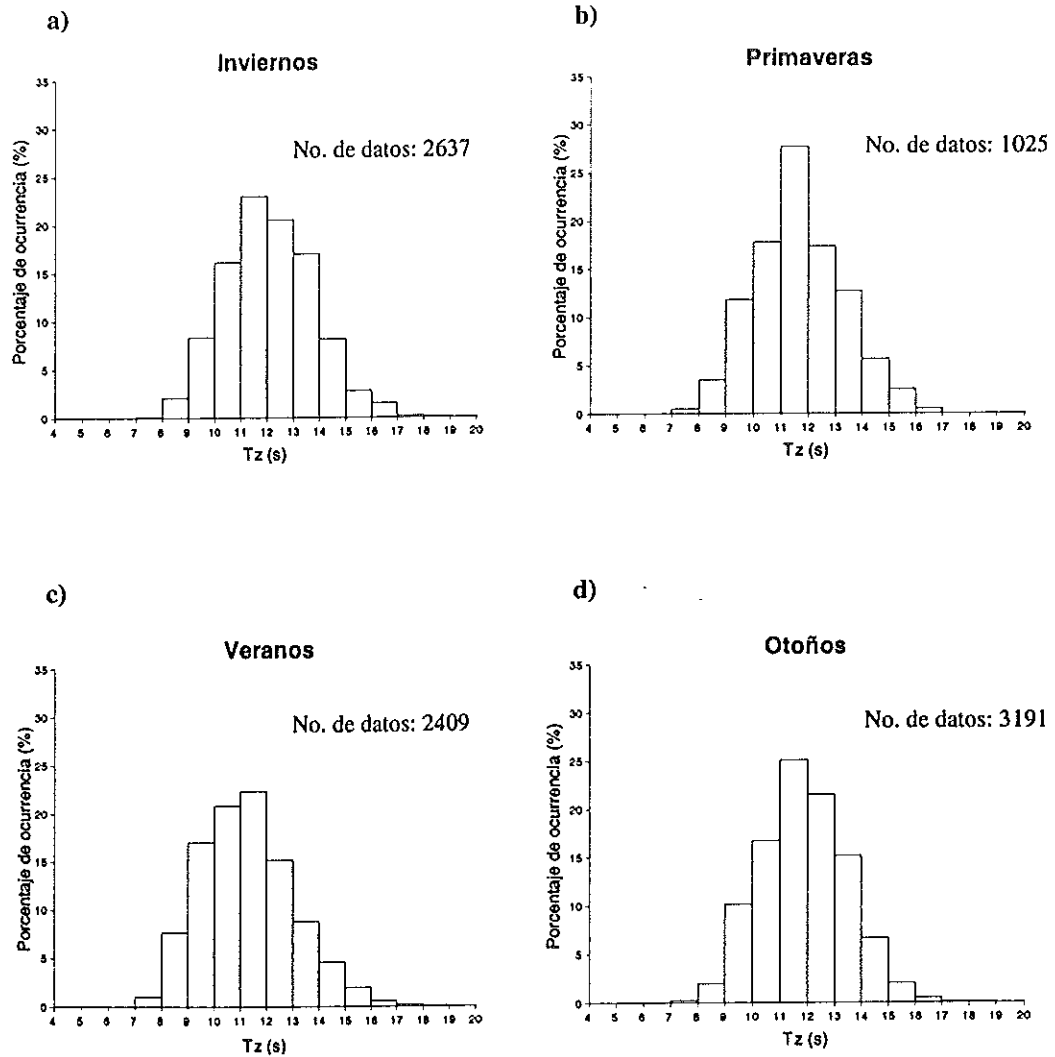


Fig. 6. Porcentajes de ocurrencia de Tz durante las diferentes estaciones del año.

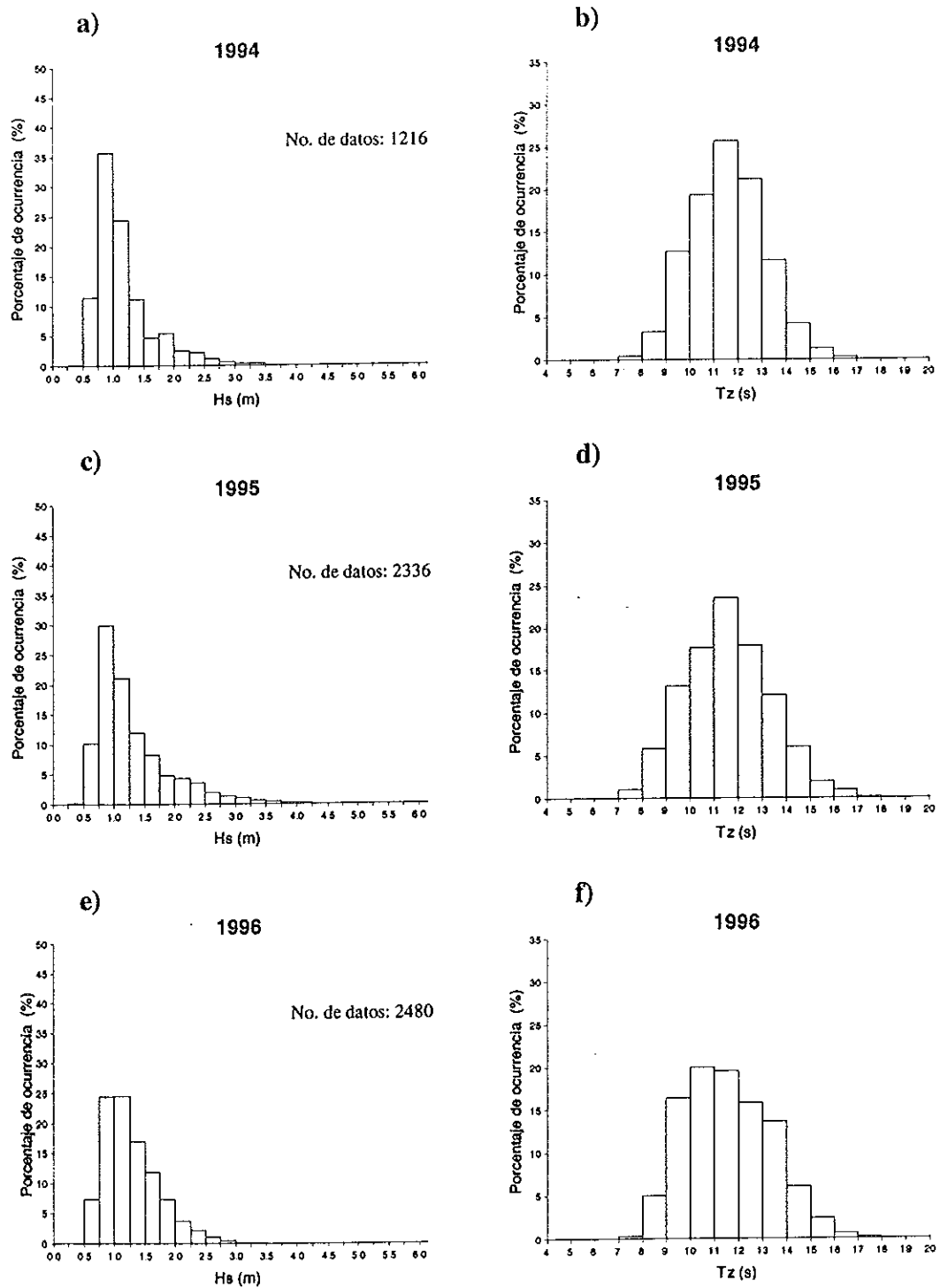


Fig. 7. Histogramas anuales de Hs y Tz, de 1994, 1995 y 1996.

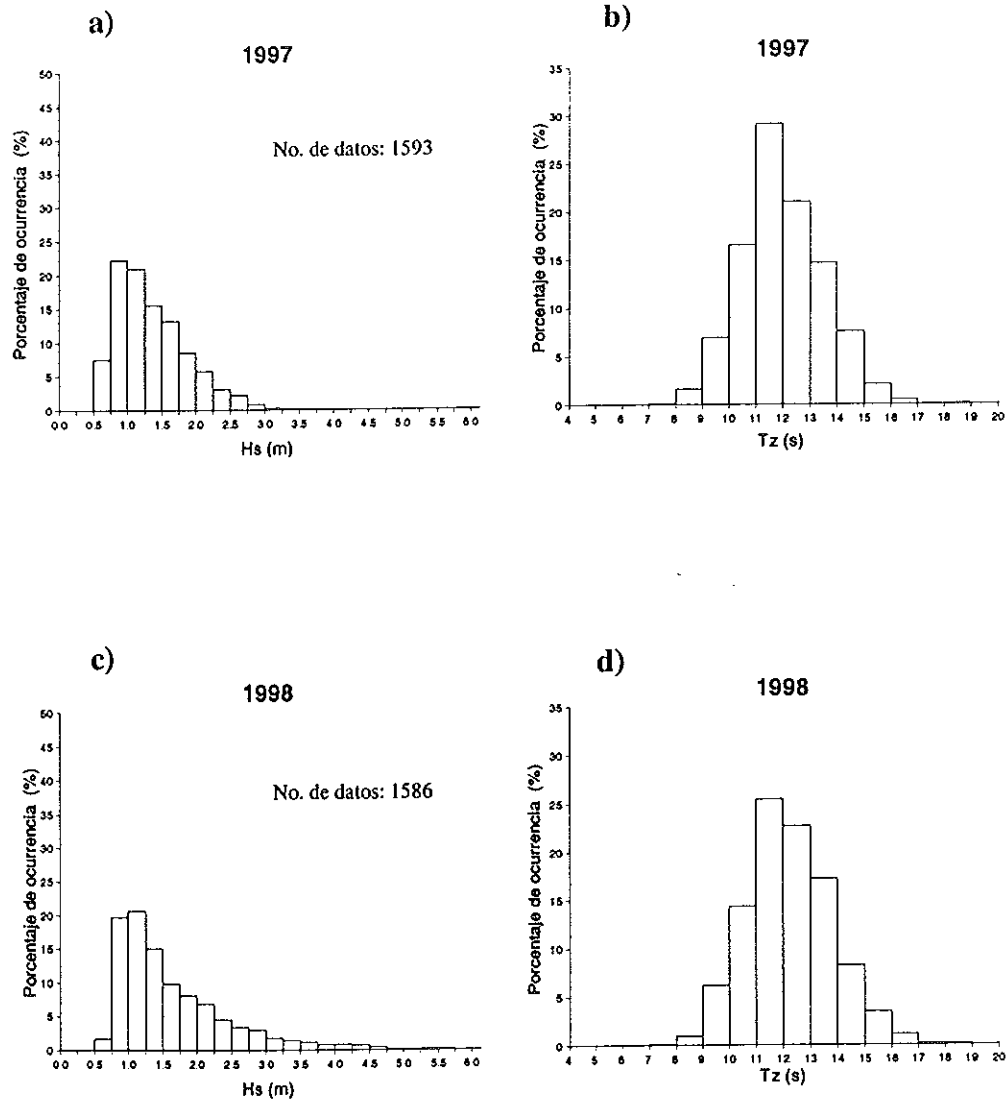


Fig. 8. Histogramas anuales de Hs y Tz, de 1997 y 1998.

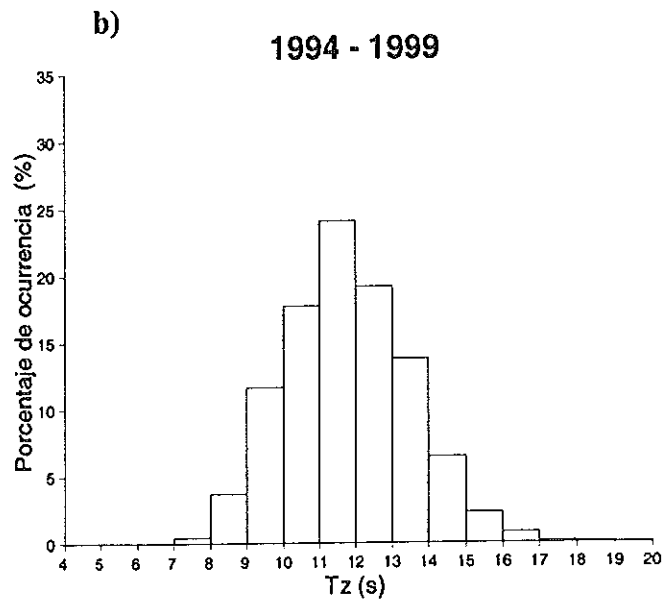
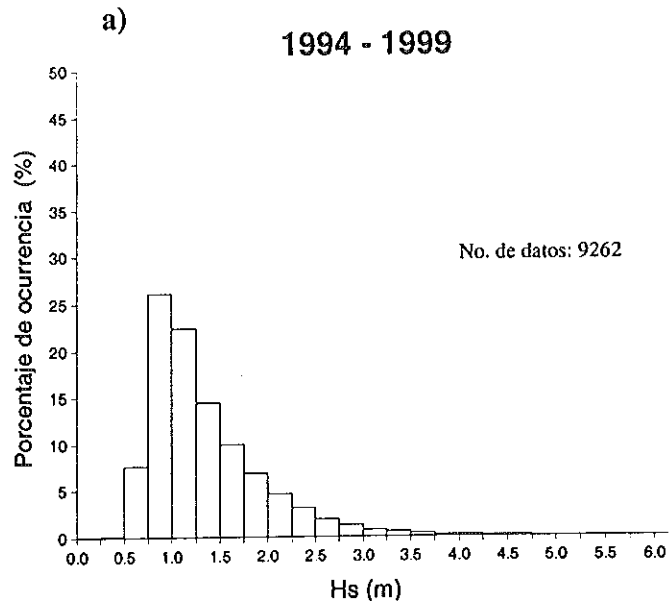


Fig. 9. Porcentaje de ocurrencia de Hs y de Tz para el período comprendido entre junio de 1994 y enero de 1999.

comparativamente al resto de estaciones. También se advierte que existe una etapa transicional entre el invierno-verano y el verano-invierno, siendo la primavera y el otoño etapas intermedias con una distribución bastante parecida entre ambas. En lo que respecta a la distribución de ocurrencia de alturas en los inviernos, se observa una forma aplanada, es decir, frecuencias de ocurrencia más similares para la gama de alturas presentes en esta época. En el resto de las estaciones existe un cierto intervalo de alturas predominante, con una frecuencia de ocurrencia de Hs visiblemente mayor que el resto, la cual oscila, en los casos de verano y otoño, entre 0.75 y 1.0 m, y en el caso de primavera entre 1.0 y 1.25 m.

En contraste con los histogramas de Hs, la distribución de los periodos en las diferentes épocas del año (fig. 6) parecieran estar mejor representadas por una distribución de probabilidad teórica del tipo Gaussiana. El intervalo de valores que presentan es de 7.0 a 19.0 s. La clase con mayor frecuencia de ocurrencia durante las 4 estaciones resulto ser la de periodos entre 11.0 y 12.0 s.

En el análisis estadístico por años, (figs.7 y 8), se observa una tendencia de la clase predominante de Hs, (la moda), de 0.75 a 1.0 m, a disminuir su porcentaje de ocurrencia conforme avanzan los años. De representar el 35 % del total del oleaje en el año 1994, baja progresivamente cerca de un 5 % cada año, desde 1994 hasta 1997, para finalmente representar solo el 20% en 1998. Este último año se distingue por presentar una distribución de frecuencias de ocurrencia más uniforme, tendiendo a ser más

aplanada y contando con las alturas más grandes de todo el período de mediciones. El año 1995 también presenta alturas grandes en comparación con los otros tres años, incluso con valores de alturas hasta de 5.0 metros. El resto de los años, presentan Hs máximas de entre 3.0 y 3.5 m.

El Tz presenta una distribución mucho más uniforme a lo largo de los 5 años de mediciones (figs.7 y 8). Cada clase muestra porcentajes de ocurrencias muy similares en los histogramas correspondientes a los diferentes años. Los períodos con mayor frecuencia de ocurrencia resultaron ser los de 11.0 y 12.0 s, excepto en 1996, año en el que las mayores ocurrencias fueron de entre 10.0 y 11.0 s. También se nota un ligero crecimiento de los valores máximos, ya que de 17.0 s que se observan en el año 1996 como máximo aumenta a 19.0 s en 1998. En general, es marcada la distribución tipo gaussiana de los Tz, mientras que las Hs presentan más una distribución tipo Rayleigh, como se aprecia en la fig. 9.

6.3 Frecuencia de ocurrencia conjunta de Hs-Tz.

Las figuras 10, 11, 12, 13 y 14, muestran la frecuencia de ocurrencia conjunta de los períodos de cruces por cero y la altura significativa. En las figs. 10 y 11 se presentan los histogramas para cada estación del año, y en las figs. 12, 13 y 14 se presentan los histogramas por cada año de medición. En todos los casos, los valores se presentan en partes por mil y redondeados al número entero más cercano, por lo que la suma de todas las frecuencias de ocurrencia que aparecen en las figuras pudiera no ser

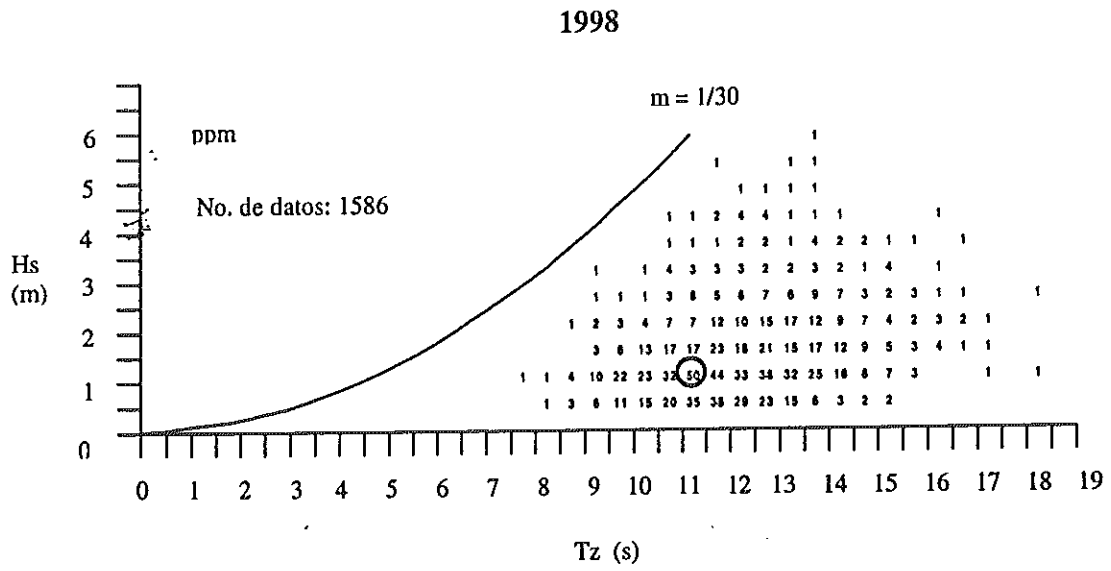


Fig.14. Histograma de distribución conjunta de Hs-Tz de 1998.

exactamente mil. Para facilitar la identificación de la pareja de valores que se presentó con mayor frecuencia de ocurrencia, se encerró en un círculo el pico de cada histograma. La línea que aparece en todos los histogramas representa la pendiente de la ola significativa, definida como $P_s = 2 \pi H_s / g T_z^2$ y que corresponde en todos los casos al valor de 1/30, ya que es esta pendiente la que delimita por debajo de ella a todos los valores de los histogramas generados.

En el análisis por estaciones del año de los histogramas conjuntos (figs. 10 y 11), resalta la marcada diferencia entre la distribución correspondiente a la época de invierno (fig. 10a), y la distribución para el resto de las estaciones. Mientras que invierno presentó una distribución conjunta un poco más universal, la distribución del resto de las estaciones pareciera estar acotada a alturas no mayores de 3.0 m. En la primavera (fig. 10b), se registró la mayor frecuencia de ocurrencia para la combinación de $H_s = 1.5$ m y $T_z = 11.5$ s., la cual resultó ser de 74 ppm. Este porcentaje ocurre dos veces: una vez en la clase de alturas de entre 1 y 1.5 m y de periodos de entre 11.0 y 11.5 s, y otra vez en la clase de alturas de entre 1 y 1.5 m y de períodos de 11.5-12.0 s. En contraste, durante el invierno, (fig. 10a), -al estar distribuidos los datos en una gama de valores más amplia-, se encuentra la frecuencia de ocurrencia máxima más pequeña, de 35 ppm, y correspondiente también a la clase de alturas de entre 1 y 1.5 m y a la clase de períodos de 11.0 a 11.5 s. Durante los otoños, (fig.11b), y los veranos, (fig.11a), el valor máximo de una combinación de Hs-Tz es de 60 ppm y corresponde a la clase de

alturas de 1-1.5 m y la clase de períodos de 11.0-11.5 s en los veranos y la clase de 11.5-12.0 s en los otoños.

En general en el análisis por años (figs.12, 13 y 14), se presentan distribuciones con formas más dsipersas. Sin embargo, en los años 1996 y 1997 se nota cierto truncamiento en la parte superior de las gráficas, al aumentar la Hs. Por otra parte, la mayor concentración de combinaciones siempre se localiza entre las alturas de 0.5 a 2.0 m y entre los períodos de 9.0 a 12.5.0 s .

6.4 Frecuencia de ocurrencia conjunta de Hs- θ .

Las rosas de oleaje son un tipo de histogramas que muestran la distribución conjunta de alturas y direcciones. Para realizarlas se utilizaron intervalos de clases de 0.5 m para las alturas y 22.5° para las direcciones. Los datos fueron clasificados en cinco grupos: el primero considera el total de datos para los cuatro años de mediciones y los otros cuatro consideran los datos correspondientes a cada una de las cuatro estaciones del año.

En todos los casos se incluye la isóbata de 10 m profundidad de con el fin de ilustrar mejor la ubicación del sensor de presión y la batimetría circundante. También se localizó (no a escala) la posición de las estructuras con las que cuenta la CFE para la toma de agua de la CT, consistentes en dos escolleras, una del lado Norte en forma de bastón, apuntando hacia el Sur, con una longitud de 730 m y 50 m de ancho y otra del

lado Sur, paralela a la Norte de 460 m de longitud y 50 m de ancho. En la escala de clases de alturas, cada intervalo se diferencía con un color y un grosor determinado.

La fig. 15 muestra como el mayor porcentaje de ocurrencia al considerar todos los datos de oleaje que arribó a la zona donde se encontraba situado el ológrafo, (32 %) , llega del SO. Este resultado destaca debido a que en gran parte de la bibliografía existente sobre el área de estudio y áreas adyacentes, se mencionan ángulos de incidencia predominantes del NW durante el invierno, (MacDonel y Torres-Coto, 1962; Padilla-Hernández, 1989; FooKong-FooKong, 1994; Appendini-Albrechtsen, 1998). Además de esta dirección dominante de arribo, se presentan olas provenientes del SSE y del S, representando ambas direcciones un 11 % con respecto al total. Por otro lado, las olas del SSO representaron un porcentaje del 26 %; las olas del SOO el 13 % y por último, las olas del O un porcentaje de 2 %. Es importante señalar que también existen olas que arriban provenientes del NOO, pero su porcentaje de ocurrencia es tan pequeño que no aparecen en las rosas de oleaje. Todas las direcciones mencionadas anteriormente se presentan durante las cuatro estaciones del año, cambiando únicamente los porcentajes de arribo en cada dirección y las Hs asociadas. En general, para todas las direcciones, las Hs de mayor frecuencia son las de 0.5 a 1.0 y las de 1.0 a 1.5 m.

En la rosa de oleaje de los inviernos, (fig.16), se aprecia que la dirección predominante, más que en cualquier otra estación, es SO, con un 49% del total de olas registradas. Las Hs de esta estación son también las más grandes y provienen

Todos

Número de datos: 9260

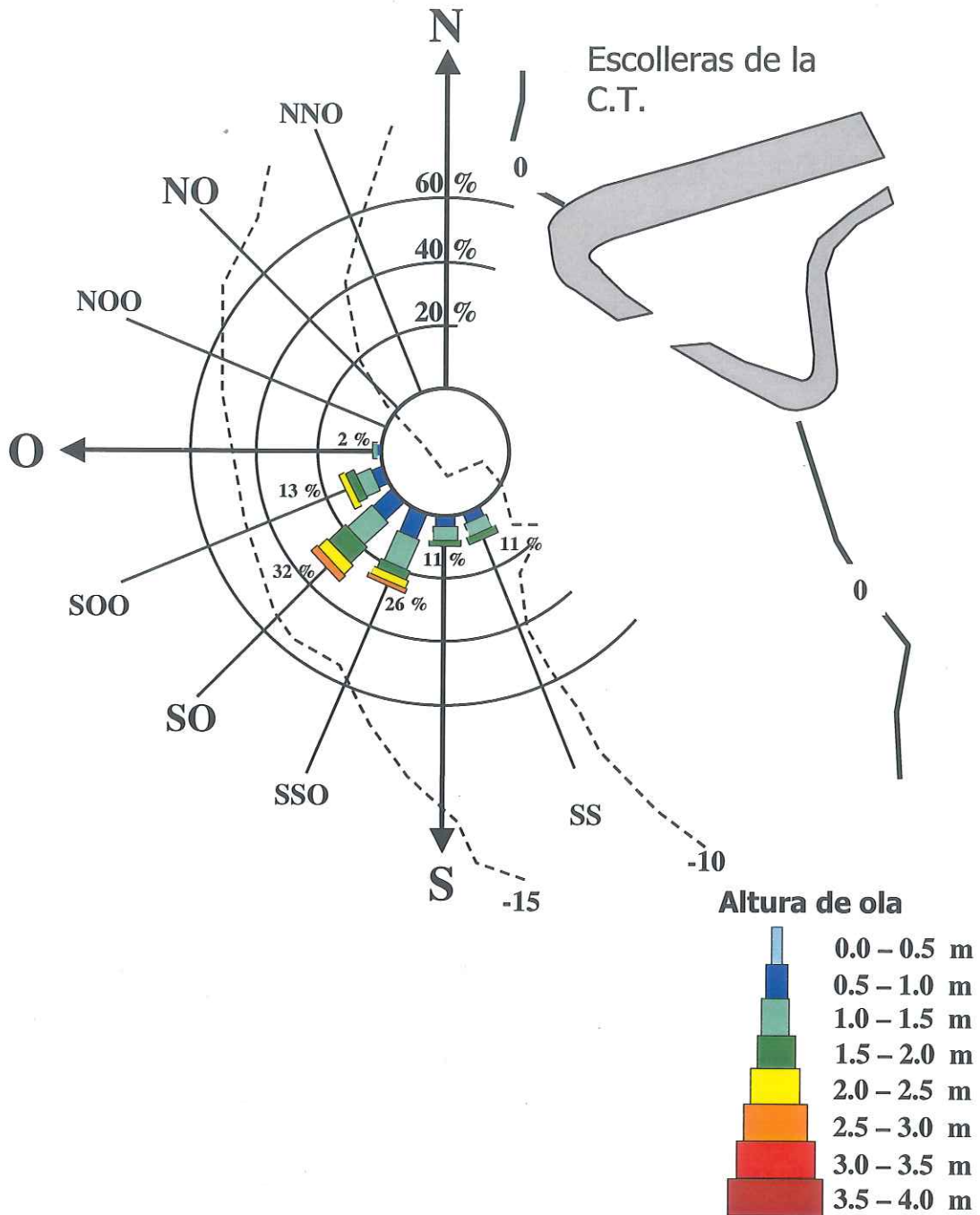


Fig.15. Rosa de oleaje de todos los datos.

Inviernos

Número de datos: 2634

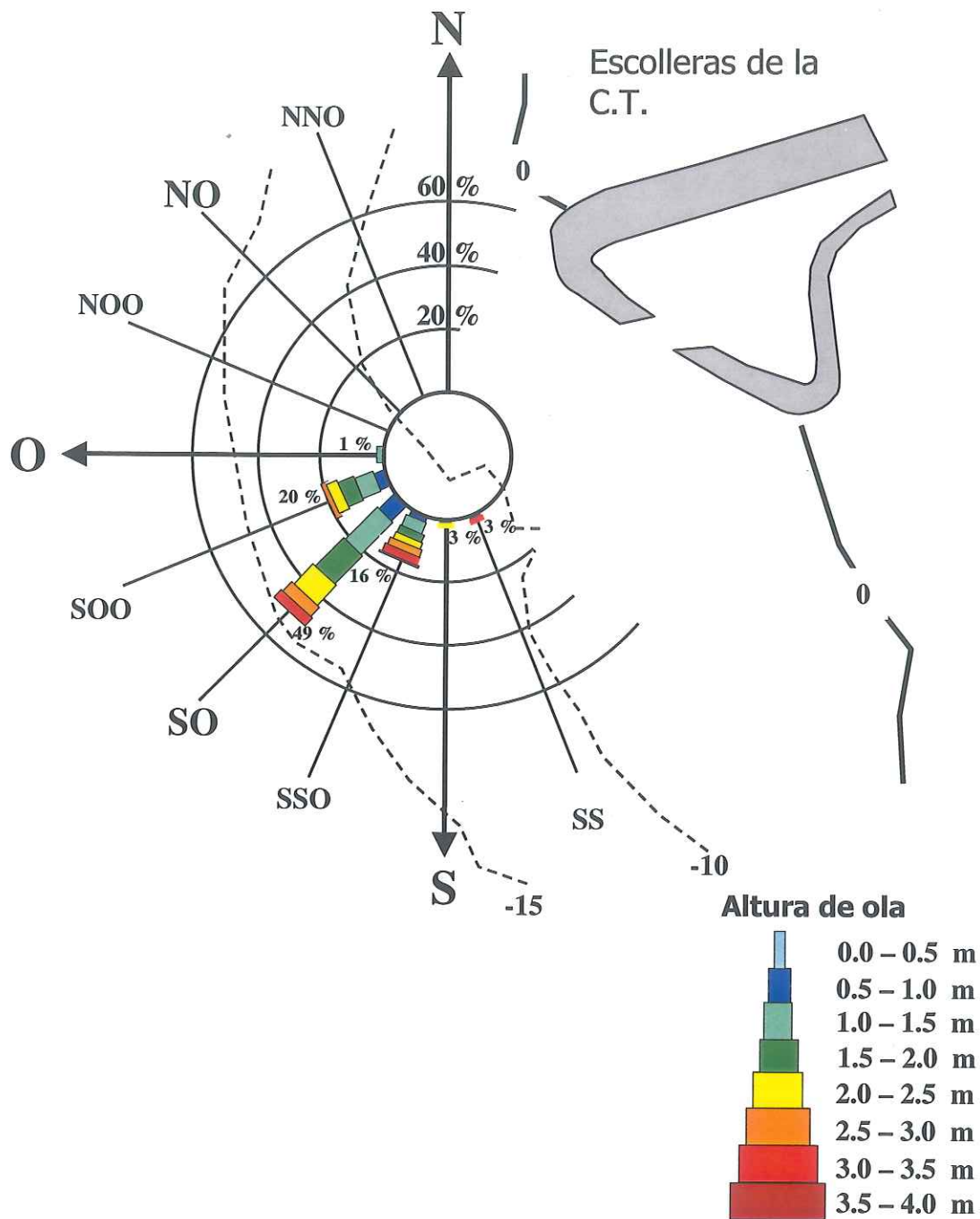


Fig. 16. Rosa de oleaje de los inviernos.

Primaveras

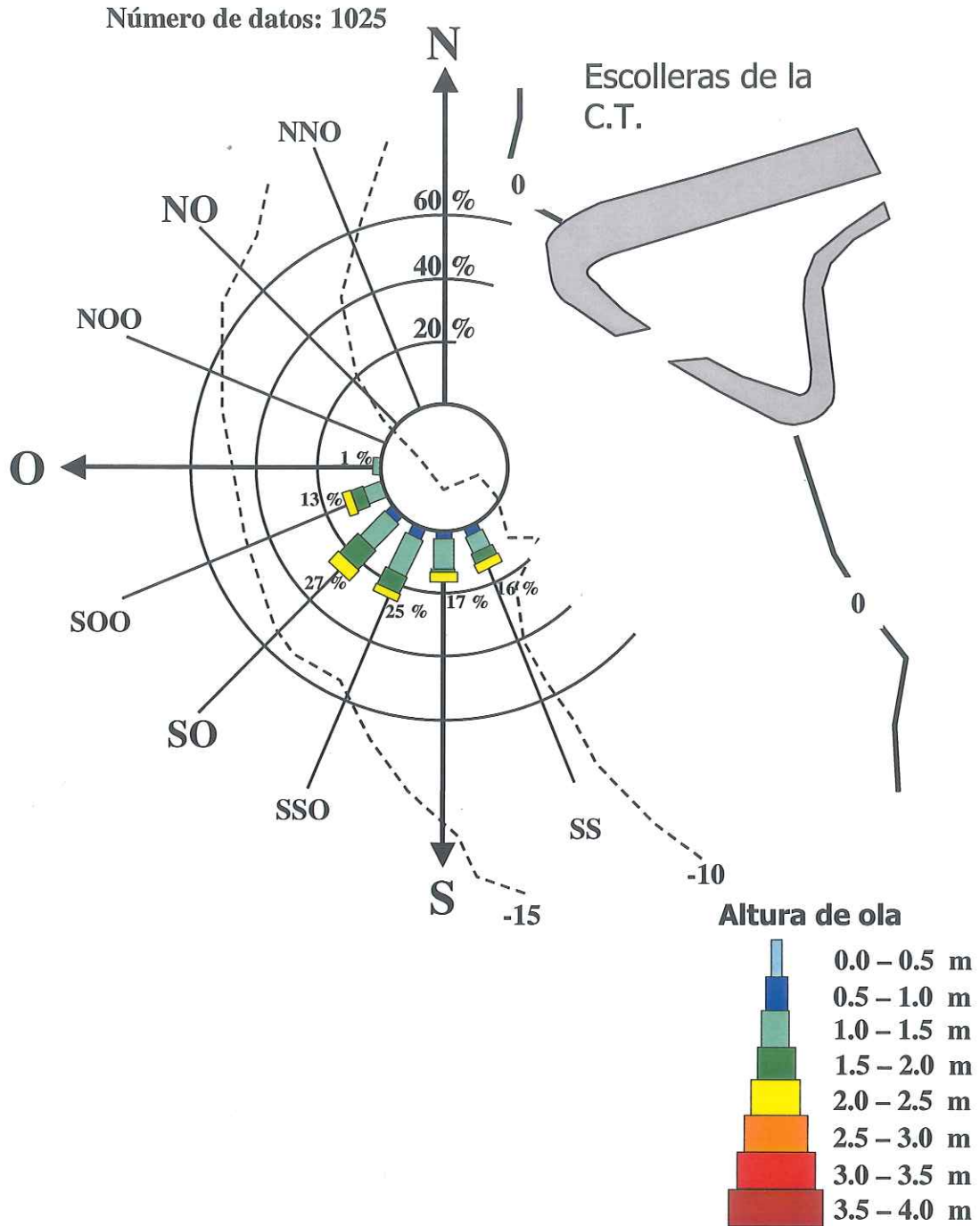


Fig. 17. Rosa de oleaje de las primaveras.

Veranos

Número de datos: 2410

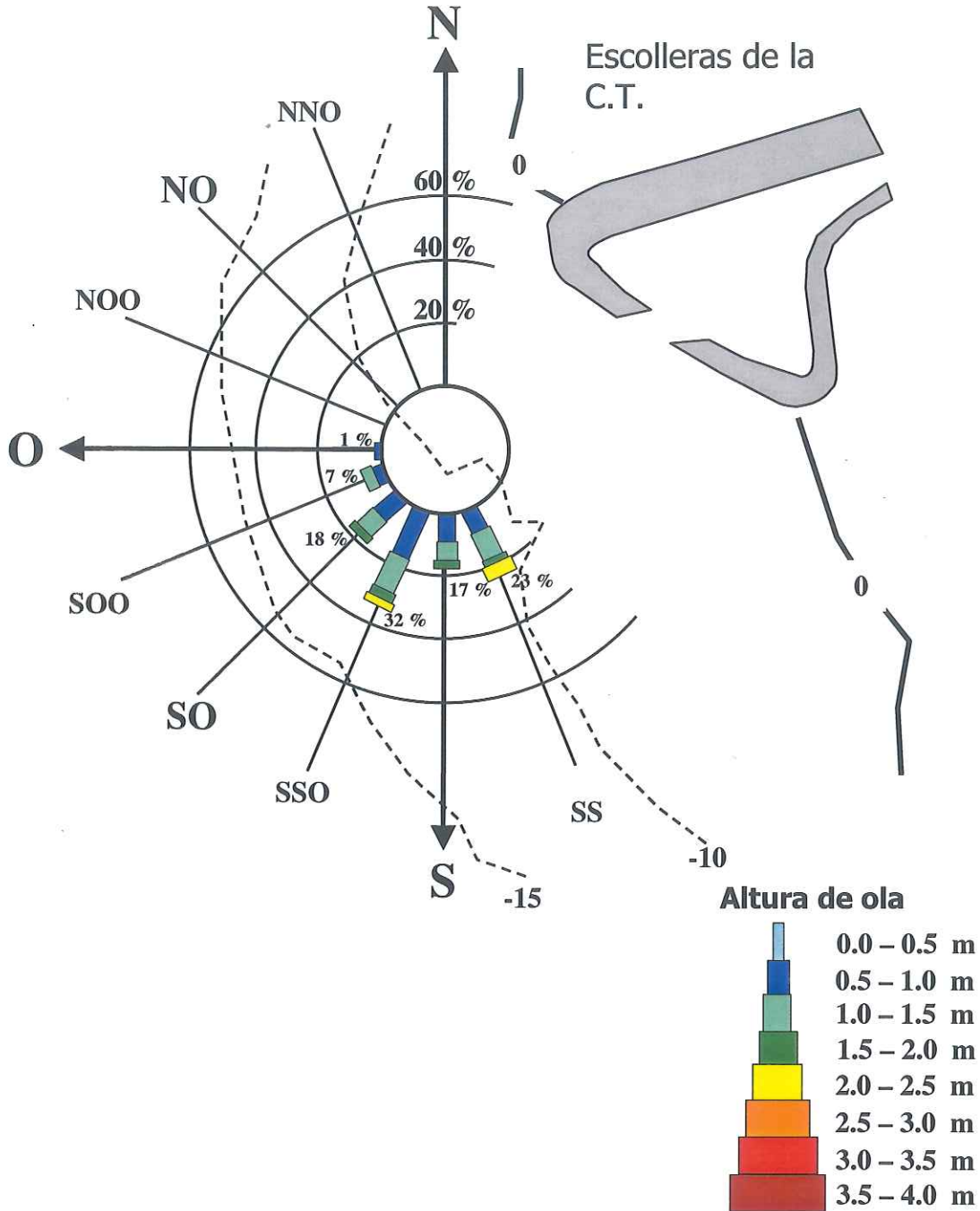


Fig. 18. Rosa de oleaje de los veranos.

Otoños

Número de datos: 3191

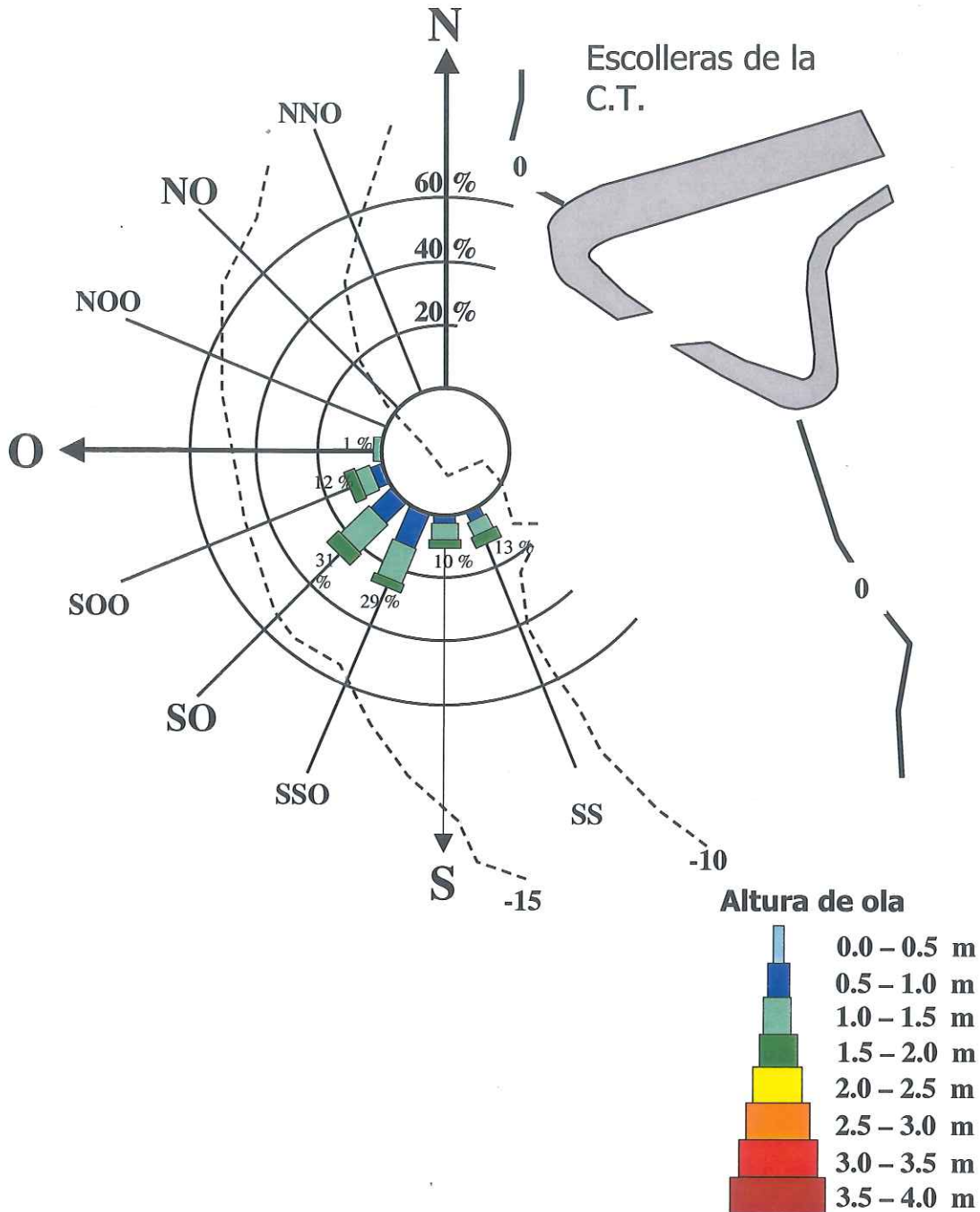


Fig. 19. Rosa de oleaje de los otoños.

principalmente del SOO, SO, SSO, S y SE. Durante los otoños y las primaveras, (figs. 19 y 17), los porcentajes de arribo de las direcciones mencionadas anteriormente, en las que llega el oleaje a la zona, son más similares entre sí, es decir que no hay una dirección fuertemente predominante sobre las otras. En otoño las Hs asociadas son menores que en las primaveras, cuando llegan a manifestarse porcentajes (visibles) de olas de 2.0 – 2.5 m, provenientes de todas las direcciones, exceptuando el O. Durante los veranos, (fig.16), la principal dirección de arribo es SSO, la cual presentan el 32 % de olas del total. Del S proviene el 17 %; del SSE el 23 %, mientras que del SO provienen 18 % del total de las olas; del SOO un 7 % y del O sólo el 1 %. Durante esta estación también hay presencia de olas de Hs de 2.0 a 2.5 m, pero por otro lado es notable un gran porcentaje de olas de Hs más pequeñas, de 0.5 a 1.0 m.

6.5 Climatología general.

La figura 20 presenta la variabilidad de los promedios calculados de Hs, Tz y θ , durante las cuatro estaciones del año de los cinco años considerados (94-98). Además, incluye la regresión lineal calculada para dichos promedios, de forma que se puede observar la tendencia de estos parámetros estadísticos. La línea roja es la recta de la regresión lineal y las líneas azules representan el promedio más o menos una desviación estándar.

En el caso de las Hs, (fig.20a), se observa un cierto patrón de comportamiento, en el que durante los inviernos las Hs aumentan, luego disminuyen gradualmente

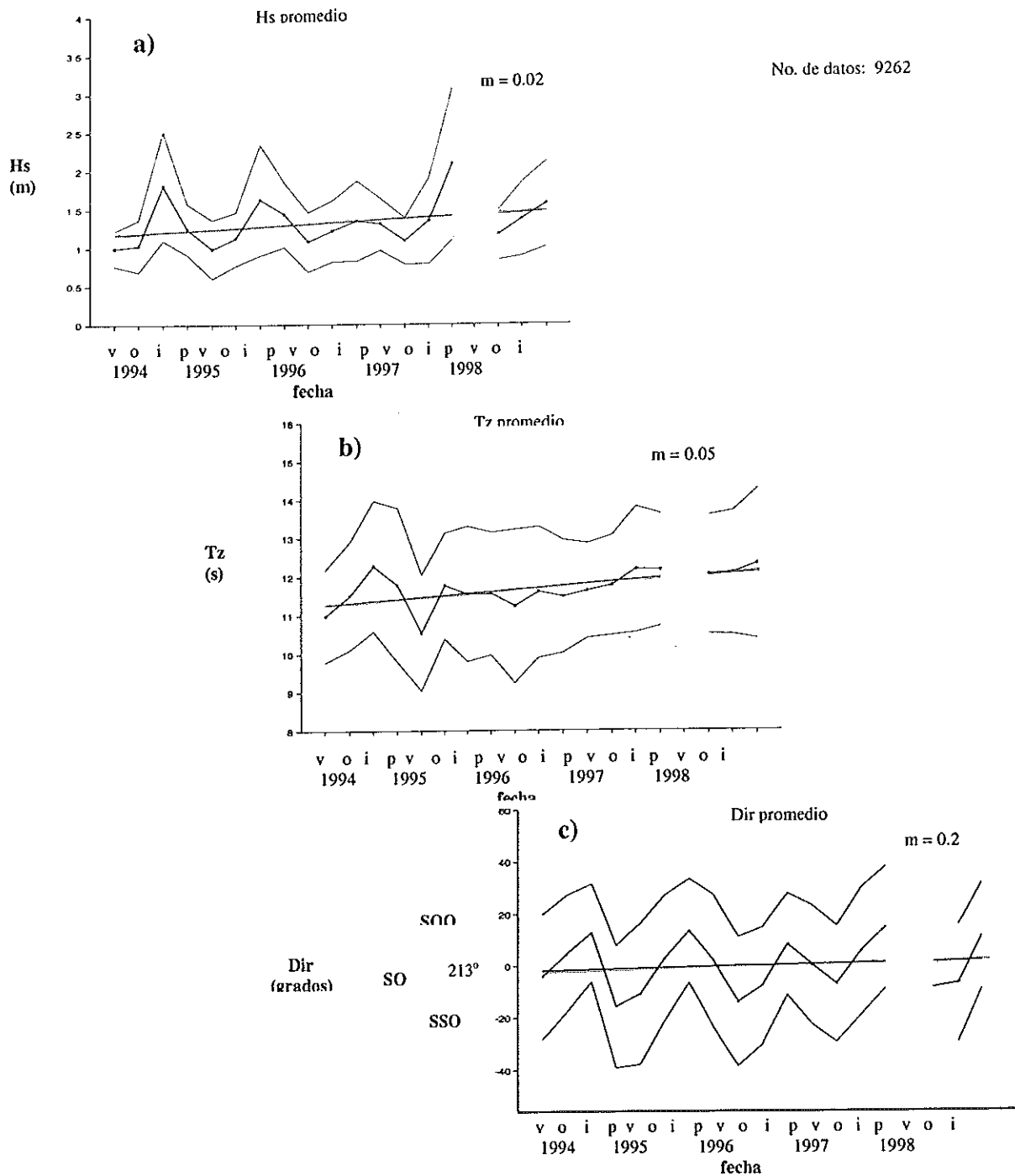


Fig. 20. Promedios estacionales de Hs, Tz y θ . La línea roja es la recta de la regresión lineal y las líneas azules son la suma (la línea de arriba) y la resta (la línea de abajo), de los promedios más, -o menos, según el caso-, la desviación estándar de dichos promedios.

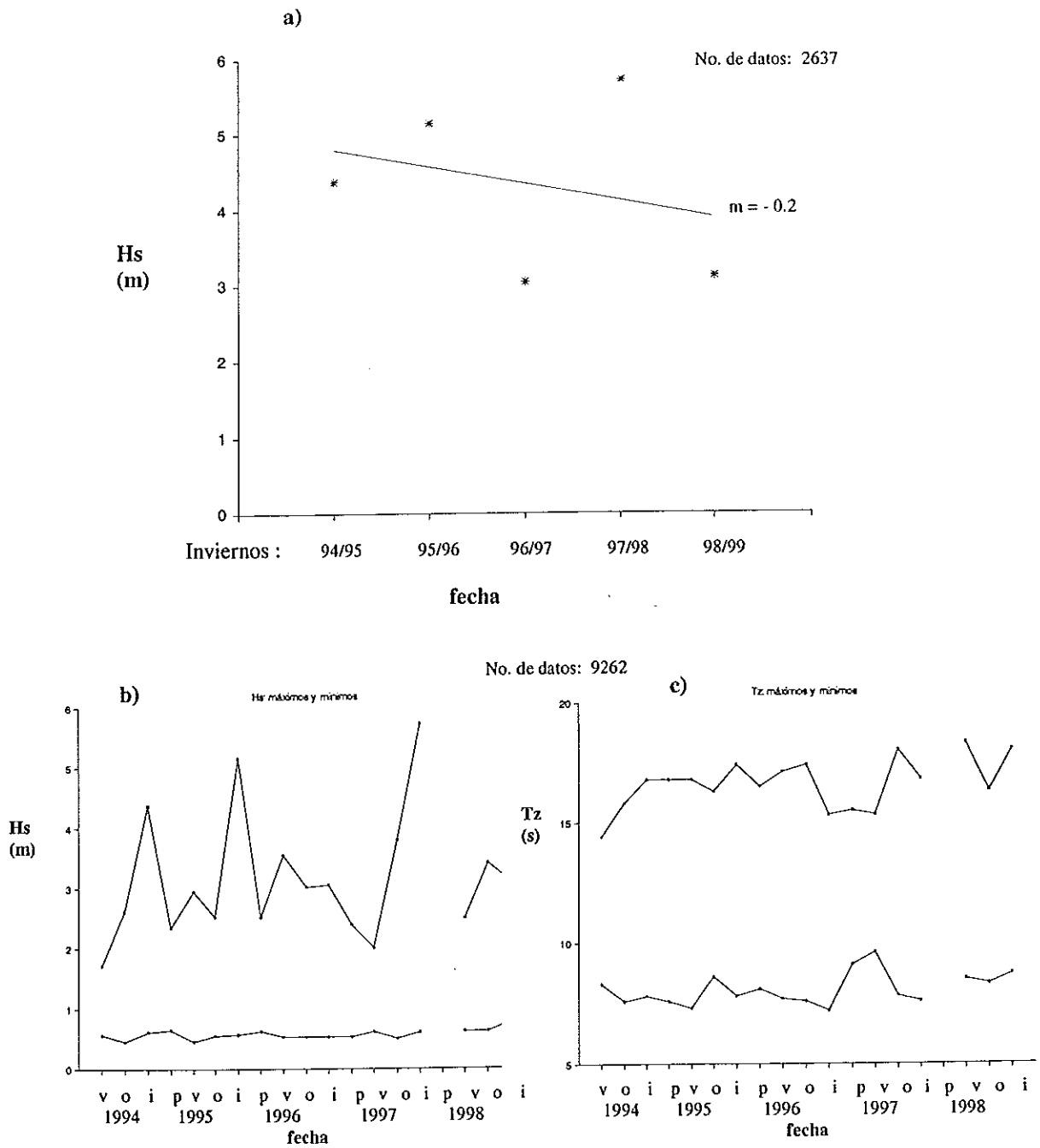


Fig. 21. Valores máximos de Hs registrados durante los inviernos, y valores máximos y mínimos de Hs y Tz registrados durante cada una de las estaciones .

durante el otoño hasta los valores mas bajos del verano, para luego incrementar de nuevo su valor durante la primavera, dando asi lugar a los valores mas grandes del invierno. Es notorio el pico máximo que alcanzan las Hs durante el invierno de 1997-1998. El ajuste lineal muestra una leve tendencia positiva, lo que representa un incremento de Hs conforme pasan los años; su pendiente resulto de 0.0175. Por otra parte, los Tz (fig.20b), presentaron menor variabilidad estacional. De hecho, no es posible distinguir ninguna tendencia; únicamente es notorio un mínimo durante el verano de 1995. También en este caso la línea recta nos indica un ligero aumento de Tz al paso de los años; el valor de la pendiente es 0.0493.

En cuanto a la dirección, (fig.20c), destaca el promedio general de 213° , que como ya se mencionó anteriormente es interesante ya que resulta ser menor a los valores reportados por otros autores. Durante el invierno, las direcciones de arribo presentan los ángulos más grandes del ciclo anual y en el verano se presentan los ángulos más chicos. La primavera y el otoño presentan direcciones transicionales entre las condiciones de invierno-verano y de verano-invierno respectivamente. Al igual que la Hs y el Tz, la regresión lineal nos muestra una pequeña tendencia a que las olas arriben de direcciones más al norte conforme avanzan los años; el valor de la pendiente en este caso es de 0.188. Sin embargo, es necesario tomar con cautela este resultado ya que como se discute más adelante el oleaje medido ha sido afectado por el proceso de refracción en su viaje hacia la costa.

En las figuras 21b y 21c se muestran los valores máximos y mínimos de Hs y Tz registrados por el ológrafo durante el período de mediciones. En el primer caso, (fig.21a) , se graficaron los valores máximos únicamente de los inviernos, por ser éstos los más energéticos, y en consecuencia los de mayor relevancia para el diseño de estructuras costeras. En el segundo caso, (fig.20b y 20c), se graficaron los valores máximos y mínimos de cada estación.

En contraste con el ajuste lineal de las Hs (fig.20a) que muestra una tendencia a aumentar el valor de las alturas conforme avanza el tiempo, la línea de regresión lineal de las Hs máximas de los inviernos (fig.21a) , indica una disminución en las Hs máximas con el transcurso del tiempo. La pendiente de la recta es igual a -0.784 . Las Hs máximas, (fig. 21b), presentan un intervalo de valores entre 1.7 y 5.7, con picos muy sobresalientes durante los inviernos de 1995-1996 y de 1997-1998. Los veranos de 1995 y 1996 muestran dos sub-picos, con Hs mayores a las de los otoños y primaveras, a pesar de que como se señaló anteriormente, el promedio de todos los valores de Hs durante el verano es menor que el de los valores de Hs del otoño y de las primaveras. Las Hs mínimas son muy constantes y oscilan alrededor de los 0.5 m, pero, como se discute más adelante, esto se debe a las limitantes propias del aparato de medición y a que trabajamos con alturas significantes, que por definición son un promedio. Los Tz máximos, (fig.21c), no presentan un patrón específico de comportamiento. El intervalo en el que se encuentran fluctúa entre los 14.4 y los 18.3 s. Los Tz mínimos no son tan homogéneos como las Hs mínimas, y presentan valores de entre 7.2 y 9.1 s.

Por último, las tablas II, III y IV pretenden resumir los parámetros estadísticos más importantes tales como promedios, desviación estándar y valores máximos y mínimos de Hs, Tz y θ para las diferentes estaciones del año y años considerados. En la Tabla II destacan las alturas máximas de los inviernos, en particular las mayores a 4 m, correspondientes a los inviernos 94-95, 95-96 y 97-98. En la tabla III, destacan los períodos grandes (mayores de 17.0 s) registrados durante el verano, otoño e invierno de 1996, y durante el invierno de 1998 y el otoño de 1997. En general, tanto los veranos como los últimos dos años, 1997 y 1998, presentan en promedio mayores valores de Tz que el resto de los períodos analizados. Las olas que en promedio presentan mayor arribo con ángulos grandes, (Tabla IV), son las que se presentaron durante 1997 y en general, durante los inviernos. Las desviaciones estándar de las alturas y de los períodos, (Tablas II y III), son mayores durante los inviernos y chicas durante los veranos. En las primaveras y otoños se mantienen bastante similares. En contraste, la desviación estándar de las direcciones es grande en los otoños, chica en los inviernos (la mitad de las de los otoños), y entre las primaveras y veranos es muy similar.

Tabla II. Valores extremos, promedios y de desviación estándar de las alturas de ola (Hs), registrados durante cada estación de 1994 a 1998.

Estación	Año	Hs mín (m)	Hs promedio (m)	Hs máx (m)	No de datos
Invierno	1994 -1995	0.62	1.81 ± 0.70	4.37	644
	1995 -1996	0.57	1.63 ± 0.71	5.15	650
	1996 -1997	0.53	1.34 ± 0.52	3.04	385
	1997-1998	0.60	2.08 ± 0.97	5.71	681
	1998- 1999	0.75	1.56 ± 0.55	3.11	277
Primavera	1995	0.65	1.24 ± 0.32	2.34	257
	1996	0.63	1.58 ± 1.15	2.51	485
	1997	0.53	1.30 ± 0.32	2.39	283
Verano	1994	0.56	1.00 ± 0.23	1.72	335
	1995	0.46	0.99 ± 0.37	2.95	686
	1996	0.53	1.07 ± 0.38	3.54	685
	1997	0.61	1.34 ± 1.50	2.00	207
	1998	0.62	1.16 ± 0.32	2.48	496
Otoño	1994	0.46	1.02 ± 0.33	2.63	685
	1995	0.55	1.13 ± 0.34	2.52	703
	1996	0.53	1.22 ± 0.39	3.01	674
	1997	0.50	1.35 ± 0.55	3.78	708
	1998	0.61	1.36 ± 0.46	3.39	421

Tabla III. Valores extremos, promedios y de desviación estándar de los períodos (Tz), registrados durante cada estación de 1994 a 1998.

Estación	Año	Tz mín (s)	Tz promedio (s)	Tz máx (s)	No de datos
Invierno	1994 -1995	7.8	12.28 ± 1.70	16.8	644
	1995 -1996	7.8	11.55 ± 1.76	17.4	650
	1996 -1997	7.2	11.48 ± 1.46	15.3	385
	1997-1998	7.6	12.17 ± 1.46	16.8	681
	1998- 1999	8.7	12.32 ± 1.95	18	277
Primavera	1995	7.6	11.79 ± 2.00	16.8	257
	1996	8.1	11.56 ± 1.60	16.5	485
	1997	9.1	11.63 ± 1.23	15.5	283
Verano	1994	8.3	10.98 ± 1.20	14.4	335
	1995	7.3	10.55 ± 1.50	16.8	686
	1996	7.7	11.23 ± 2.00	17.1	685
	1997	9.6	11.77 ± 1.30	15.3	207
	1998	8.5	12.04 ± 1.54	18.3	496
Otoño	1994	7.6	11.51 ± 1.40	15.8	685
	1995	8.6	11.77 ± 1.38	16.3	703
	1996	7.6	11.60 ± 1.70	17.4	674
	1997	7.8	12.18 ± 1.63	18.0	708
	1998	8.3	12.09 ± 1.60	16.3	421

Tabla IV. Valores extremos, promedios y de desviación estándar de las direcciones de arribo del oleaje, registrados durante cada estación de 1994 a 1998.

Estación	Año	Dir promedio	Dir desv std	No. de días
Invierno	1994	226	18.79	644
	1995	227	19.84	650
	1996	221	19.54	385
	1997	228	23.47	681
	1998	225	20.32	277
Primavera	1995	198	23.57	257
	1996	215	25.35	485
	1997	213	22.78	283
Verano	1994	209	24.10	335
	1995	202	27.08	686
	1996	200	24.83	685
	1997	206	22.24	207
	1998	205	20.89	496
Otoño	1994	218	22.59	685
	1995	216	24.28	703
	1996	205	22.53	674
	1997	218	24.48	708
	1998	206	22.41	421

7. DISCUSIONES

7.1 Variación temporal de los parámetros estadísticos

El comportamiento de Hs, Tz y θ durante todo el período de mediciones, (fig.4), muestra una marcada variación estacional, en la que: a) la altura y el período aumentan durante el invierno y disminuyen en el verano, y b) la dirección de arribo del oleaje alterna entre el SSE, como mínimo en el verano, y el NOO como máximo en el invierno. Dos de los tres picos que presenta Hs, (fig.4a), corresponden a los inviernos de los años 1995 y 1998, durante los cuales se ha determinado que se presentó el fenómeno El Niño, (Seymour, 1996 y 1998; Mendoza-Ponce, 1999). El intervalo de valores dentro del cual se encontraron tanto Hs como Tz y la dirección de incidencia, concuerda con lo reportado por otros autores como Marmolejo-Lara (1985) y Carrillo-Berumen (1998).

7.2 Frecuencia de ocurrencia de Hs y Tz.

La principal característica de todos los histogramas de Hs y Tz es su forma unimodal en la distribución, lo cual concuerda con lo que predice la teoría lineal del oleaje.

En el análisis estacional de Hs se encontró, -como ya se indicó en los resultados, que el oleaje de mayor altura se presentó siempre en el invierno, (fig.5a). Esto es de esperarse, ya que precisamente en esa época se forman las tormentas extratropicales al noroeste del Pacífico Norte (Martínez-Díaz de León, 1993), y es lo mismo que sucede a

lo largo de toda la costa este del Pacífico. La primavera y el verano pueden considerarse como épocas de transición ya que sus distribuciones de ocurrencia son muy similares (fig.5b y 5d). A partir de los resultados encontrados, no es posible afirmar que el otoño sea más energético, en términos de la Hs, que la primavera, en contraste con lo que así ocurre en otras zonas aledañas, como en la Bahía de Todos Santos, (Martinez-Díaz de León, 1993). Las alturas significantes más pequeñas se presentan en el verano, con lo que tenemos un ciclo anual típico del oleaje. Sin embargo, en contraste con lo que menciona Oropeza-Rosales (1998), para Rosarito no es posible afirmar que la sucesión entre los dos regímenes anuales, primavera-verano y otoño-invierno, es suave en un caso y abrupta en el otro, ya que por lo que se observa en la fig.5, la transición entre ambos regímenes es bastante similar. Por otra parte, las alturas con mayor frecuencia de ocurrencia durante todo el ciclo anual, son las que están entre 0.75 y 1.25 m, lo cual representa oleaje medio y concuerda con lo reportado por Carrillo-Berumen (1998).

El comportamiento de Tz a lo largo del año, (fig.6), no muestra una marcada variación estacional, -como es el caso de Hs-. El período de mayor frecuencia de ocurrencia es de 11.0 a 12.0 s, y como lo señalan Padilla-Hernández (1989) y Flick (1994), corresponde al oleaje generado en zonas distantes, conocido como *swell* y es el que predomina en la zona del sur de California y la costa oeste de la Península de B.C.

El hecho de que en promedio los veranos presenten Tz ligeramente mayores a los del resto de las estaciones (Tabla III), puede deberse a que es en esa época cuando se

presentan los largos períodos asociados al arribo de olas de tormentas del hemisferio sur, (Martínez-Díaz de León, 1989).

La variación interanual de Hs, (figs.7 y 8), puede estar indicando un cambio gradual en el tipo de oleaje que arriba a las costas de Rosarito, tendiendo a presentarse mayor ocurrencia del oleaje considerado como medio (de 0.5 a 2.5 m) y alto (mayor de 2.5 m), según la clasificación de Rivas-Cáceres (1992). La distribución más alargada y con presencia de alturas más grandes que se presentó durante 1995 y 1998, puede considerarse como una consecuencia del fenómeno El Niño (Seymour, 1998).

Una característica importante de todos los histogramas presentados es su distribución unimodal, la cual puede facilitar en un análisis futuro, el ajuste de funciones teóricas de distribución de probabilidad.

7.3 Frecuencia de ocurrencia conjunta de Hs -Tz.

A partir de los diagramas de dispersión de Hs y Tz presentados en las figuras 10 a 14 no es posible establecer la existencia de una relación unívoca entre ambos parámetros, ya que cada caso analizado presentó características diferentes. Sin embargo, el mayor porcentaje de relación que guardan las Hs con los Tz, corresponde a las Hs chicas y medias con los Tz largos, de 9.0 a 14.0 s, siendo esta relación característica de las condiciones de verano. La asociación que le sigue en porcentaje de ocurrencia es la de Hs altas y Tz cortos o muy largos, que denotan las condiciones de invierno. Este comportamiento descrito, -la asociación de alturas pequeñas con un intervalo amplio de

valores de Tz y asociación de alturas medias con un intervalo restringido de valores de Tz , es congruente con la teoría del comportamiento conjunto de los dos parámetros.

7.4 Frecuencia de ocurrencia conjunta de H_s - θ .

A pesar de que algunos autores como Cerca-Martínez (1995), han establecido que las modificaciones por refracción que sufre el oleaje al arribar a aguas someras supuestamente no son importantes por ser la costa de Rosarito una costa abierta, en este trabajo encontramos que las direcciones del oleaje que llegan al punto de medición, muestran que éste sí se ve afectado durante su aproximación hacia la costa por la batimetría y la presencia de las Islas Coronado. Esto se deduce ya que a pesar del conocimiento que se tiene de que en el Pacífico nororiental el forzamiento del viento (principal generador del oleaje), proviene del SE para las épocas de primavera-verano y del NO para las épocas del otoño-invierno, las principales direcciones del oleaje encontradas en este trabajo están siempre dentro del intervalo de direcciones del SSE al O. Es decir, que el oleaje que originalmente proviene del noroeste, al aproximarse hacia las costas de Rosarito sufre efectos de refracción y cambia su dirección de incidencia de forma que no se presentan ángulos del NO al N. De hecho, los ángulos encontrados son menores a los reportados por autores que utilizaron como fuente de información bases de datos provenientes del sur de California, donde la batimetría local y los efectos de refracción por la presencia de obstáculos como islas, son muy diferentes. Por consiguiente, es posible afirmar que no siempre es conveniente la extrapolación de datos

obtenidos en otras zonas, aunque parezcan cercanas al área de estudio, ya que los efectos locales de la batimetría y la presencia de islas en esta zona sí son importantes.

La dirección predominante durante todo el período de mediciones, -del SO-, concuerda con lo reportado por Marmolejo-Lara (1985) y Carrillo-Berumen (1998). Esta dirección es congruente con el efecto de refracción del oleaje debido a la batimetría, el cual ocasiona que la línea de la cresta de la ola tienda a ajustarse paralela a los contornos batimétricos, como se observa en la fig.15.

El comportamiento estacional de la dirección de propagación del oleaje, indica también que los otoños y primaveras son etapas transicionales en las que el oleaje que arriba no presenta una dirección preferencial tan marcada como sucede principalmente en invierno y en menor medida en verano. En primavera se observa una tendencia a que incidan mayor cantidad de olas del sur, dando pie al traslado que ocurre durante el verano hacia las direcciones más sureñas de todo el año: SSO-SSE. Este cambio en la dirección de propagación puede asociarse con la presencia del oleaje originado en el hemisferio sur y con oleaje originado durante la temporada de huracanes en la costa oeste de México, lo cual ocurre en la época de verano.

Por otra parte, el oleaje de invierno es el que presenta una dirección preferencial más dominante que cualquier otra estación: SO. Esto se puede asociar a la presencia de las tormentas extratropicales de latitudes altas (Golfo de Alaska) y los fuertes vientos

del norpacífico, que debido a su gran intensidad provocan la existencia de una dirección tan dominante. Hay que señalar que este es un factor importante a tener en cuenta en la planeación y diseño de obras costeras, ya que además de presentarse esta dirección dominante, es en el invierno cuando existen los mayores porcentajes de ocurrencia de alturas y de eventos energéticos, como lo indica Padilla-Hernández (1989), que pueden afectar y dañar a las construcciones costeras.

Existe una relación entre las alturas de ola más grandes registradas y las direcciones principales de aproximación. Las direcciones de las que proviene la mayor parte del oleaje, son en general las que presentan alturas de ola más grandes. Sin embargo, dado que por una parte no hay un drástico cambio estacional en la dirección de aproximación del oleaje (por los efectos de refracción), y por otra parte sí hay un aumento en la ocurrencia de olas con mayor altura durante el invierno, se puede decir que los factores que modifican al oleaje que llega al área de estudio resultan ser básicamente aportadores de energía.

7.5 Climatología general.

La característica más sobresaliente que se desprende del análisis de H_s , T_z y θ , es su comportamiento estacional, como ya se mencionó anteriormente y como se señala en la descripción de la fig.20 (ver resultados), en la que se observa claramente un patrón de variación para cada uno de los tres parámetros. Es interesante el hecho de que la regresión lineal de los promedios estacionales indique un aumento al paso de los años

tanto en las alturas como en los períodos, y en los ángulos de las direcciones de incidencia. Este cambio gradual podría ser debido a una modificación de los centros de baja presión donde se origina el viento y que a su vez genera el oleaje que finalmente llega a las costas de Rosarito.

Como se señaló en los antecedentes, Appendini-Albrechtsen (1995 y 1998) y Seymour (1996 y 1998) mencionan que el oleaje que se ha presentado en las últimas dos décadas se caracteriza por ser de mayor energía en promedio que el registrado anteriormente, ya que ha habido mayor número de tormentas, a pesar de que individualmente las alturas de ola de estas tormentas no presenten un incremento en sus valores de altura comparándolas con las alturas de ola de tormentas pertenecientes a las décadas anteriores y que en ciertos casos presentaron alturas sobresalientes. Este comportamiento del oleaje se confirma con los resultados aquí encontrados, en los que se observa que si se consideran únicamente las olas máximas de invierno (fig.21a), el ajuste lineal indica una disminución en los valores de Hs. Sin embargo, si se observa la tendencia de Hs en todos los años de mediciones, (fig.20a), el ajuste indica un aumento. Este resultado nos puede estar indicando dos cosas: a) existe gran variabilidad en la intensidad de los inviernos de un año a otro, lo cual es motivado por factores como la presencia del Niño, y b) ocurren gran número de tormentas, aunque las alturas de sus olas máximas no sea mayor que en las tormentas de años anteriores, pero que en promedio por ser gran cantidad provocan una tendencia a aumentar con el tiempo los valores de alturas.

Dentro de las máximas alturas registradas (ver fig.21b), destacan las que se presentan en invierno en comparación con las del resto de las estaciones. Las máximas alturas registradas en los otoños parecen ser siempre mayores que las registradas en las primaveras, a pesar de que en promedio las alturas que se tienen en primavera son ligeramente mayores que las que se tienen en otoño. Esto puede deberse a que el final de la temporada de invierno, durante el mes de febrero, es más intenso en comparación con el principio, y por lo tanto en primavera el oleaje queda con ciertos remanentes de la gran energía que presenta el invierno, mientras que en otoño únicamente comienzan a aparecer olas altas esporádicamente, como anuncio del invierno. Lo anterior puede confirmarse con los resultados de Padilla-Hernández (1989), quien encuentra un drástico aumento en los niveles de potencia (proporcional al cuadrado de la altura del oleaje) en el mes de febrero, el mes más energético.

Las alturas mínimas son en general muy constantes, pero esto en realidad se debe a que por una parte trabajamos con alturas significantes y por lo tanto existen alturas de ola más grandes y más chicas que las reportadas, y por otra parte se debe a las limitantes propias del aparato, ya que este tipo de instrumentos tiene un límite inferior de medición dependiendo de la profundidad a la que se encuentre anclado.

El comportamiento de los Tz máximos no presenta ningún patrón identificable. En cuanto a los períodos promedio, se observa un predominio de períodos altos (frecuencias bajas) en toda la serie de datos, lo cual también indica que el principal

aportador de energía es el *swell*, y concuerda con lo reportado por Padilla-Hernández (1989) y otros autores.

La presencia del fenómeno El Niño durante los inviernos de 1994-1995 y 1997-1998, es confirmada por una serie de factores físicos tales como una mayor ocurrencia de oleaje generado por tormentas (Mendoza-Ponce, 1999), lo cual se traduce en alturas y períodos de mayor tamaño que los años que median entre estos dos eventos, tal y como se observa en los resultados obtenidos (fig.20b). Hay que destacar la importancia de contar con registros de oleaje que abarquen varios años de mediciones, ya que las mediciones realizadas durante períodos cortos no incluirían y no nos permitirían identificar fenómenos como El Niño, salvo en raras excepciones.

Por otra parte, la estimación de la ola de diseño podría realizarse utilizando las mediciones analizadas en este trabajo con cierta confiabilidad ya que el período cubierto en él contiene eventos extremos como el fenómeno del Niño, además de olas de tormenta (Hs grandes). Sin embargo, habría que tener en cuenta también el resultado que nos señala que existe gran variabilidad entre un invierno y otro.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado de manera integral la base de datos de oleaje mas larga de la que se tenga conocimiento para las costas de Rosarito B.C., y quizas para toda la costa Pacífico de Baja California. Del análisis estadístico realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones.

Las condiciones oceanográficas del oleaje que prevalecen en la zona de estudio caracterizan al área como altamente dinámica, debido a que sus principales parámetros, Hs, Tz y θ , son variables y alternan tanto estacionalmente, como interanualmente. Mientras que la variación estacional está altamente asociada a la variabilidad climática estacional, la variabilidad interanual pudiera estar asociada a fenómenos de mayor escala como lo es el fenómeno de El Niño.

La presencia del fenómeno El Niño durante los inviernos de 1994-1995 y 1997-1998, es confirmada por alturas promedio más grandes que las alturas de años que median entre estos dos eventos.

Invierno y verano presentaron características extremas opuestas: en el invierno se presentaron las alturas de ola más grandes, con valores extremos de Hs de 5.15 y 5.71 m, y en el verano se presentaron las olas más chicas. Primavera y otoño pueden ser consideradas como etapas de transición. Sin embargo, la primavera en promedio es un poco más energética que el otoño debido a que al final del invierno, -hacia el mes de

febrero-, se presenta la parte más intensa de éste y transmite parte de su energía (en términos de Hs) a la primavera. La sucesión entre los regímenes de transición , primavera-verano y otoño-invierno-, es suave en ambos casos.

Las Hs con mayor frecuencia de ocurrencia resultaron ser las de 0.75 a 1.25 m, lo cual puede considerarse como oleaje medio. El oleaje alto, (olas mayores de 2.5 m), representaron solo un 0.2 % del total del oleaje que arriba a la zona.

La distribución de la frecuencia de ocurrencia de Tz no muestra una marcada variación estacional. El Tz de mayor frecuencia de ocurrencia osciló entre 11.0 y 12.0 s, períodos que están asociados al oleaje tipo *swell*, por lo que se puede decir que el oleaje local no es dominante en la climatología del oleaje de Rosarito. Los valores extremos de Tz fueron de 18.0 y 18.3 s, ocurriendo el primero en primavera y otoño, y el segundo en verano.

La distribución conjunta de alturas y períodos presentó una relación constante en la que tanto en el análisis estacional como en el análisis anual, las combinaciones más frecuentes son las que incluyen alturas de ola de 0.5 a 1.5 m (oleaje medio) con períodos de 11.0 a 12.0 s. El invierno se distingue por presentar una distribución muy amplia de los valores de combinaciones. La pendiente significativa que abarca debajo de sí la mayor parte de los valores de frecuencia de ocurrencia es la de 1/30.

El intervalo de direcciones del oleaje que arriba al punto de medición en las costas de Rosarito es del SSE al NOO. El oleaje que arriba del SO es el más frecuente. Durante el verano la dirección más frecuente es SSO. Durante el invierno, la primavera y el otoño la dirección predominante es SO. El invierno destaca ya que presenta el mayor porcentaje de frecuencia de ocurrencia de olas provenientes del SO, siendo éste de 49% con respecto al total del oleaje incidente.

Los eventos energéticos, en términos de la altura significativa, generalmente están asociados a las direcciones preferenciales de arribo, como es la dirección SO.

Se observó un cambio gradual en el período de mediciones durante el cual tanto Hs promedio como Tz promedio aumentaron año con año 0.0624 m, en el caso de Hs, y 0.1764 s, en el caso de Tz. La dirección promedio se trasladó 0.6756° hacia el norte.

El período de mediciones puede considerarse como una época que presentó ciertos eventos extremos. Sin embargo la variabilidad de estos eventos es grande, por lo que los resultados obtenidos deben tomarse con cautela si se quieren tomar como representativos del régimen de oleaje que prevalece en la zona.

BIBLIOGRAFIA

Appendini-Albrechtsen, Ch. M. 1995. Aplicación de un modelo numérico para la estimación de volúmenes de azolve en la central termoeléctrica de Rosarito, B.C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC., pp.

Appendini-Albrechtsen, Ch. M. 1998. Plan de manejo de la erosión costera para Playas de Rosarito, B.C. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas e Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC, 117 pp.

Carrillo-Berumen, R.M. 1998. Dinámica sedimentaria en las inmediaciones de la obra de toma de la central termoeléctrica Presidente Juárez en Rosarito, BC. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 134pp.

Carter, D.J.T. 1987. Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering, Volume 12: Modelling the offshore environment. Graham Trotman, UK.

Castañón-Moreno, E. 1995. Cambios Morfológicos en la línea de costa, debido a la estructura de protección de la Central Termoeléctrica Presidente Juárez, en Rosarito, B.C. Guión de unidad audiovisual. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, pp.

Cerca-Martinez, L.M. 1995. Evaluación del potencial de extracción de energía eléctrica a partir del oleaje, como posible fuente alterna en Rosarito, BC. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 48pp.

Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2000. Batimetría frente a la Central Termoeléctrica de Playas de Rosarito, BC. No publicado.

Edmisten, J.R. 1978. Toward Fullfillment of an Urgent Need, Coastal Wave Data Acquisition and Analyses. p. 3-14.

Flick, R. 1994. Shoreline Erosion Assessment and Atlas of the San Diego Region. Department of Boating and Waterways and the San Diego Association of Governments, Vol. I, Sacramento, California.

Foo Kong-Foo Kong, C.A. 1994. Analizar el caso hipotético de un derrame de hidrocarburos en la planta de Rosarito. Pregunta problema. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 56pp.

Godínez-Sandoval, V.M. 1986. Dispersión frente a la costa de Rosarito, BC. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 51pp.

- Lambert-Arista, A.A. 1993. Variabilidad del oleaje y su efecto en la estimación de parámetros estadísticos. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE, 85pp.
- Longuet-Higgins, M.S. 1952. On the statistical distribution of the heights of sea waves, *Jour. Mar. Res.*, 11(3), 245-266.
- MacDonel, J.G. y Torres-Coto, J. 1962. Estudio de corrientes y agitación dentro de la obra de toma marina en la Planta Termoeléctrica de Rosarito, B.C., U.N.A.M., México. (No publicado).
- Marmolejo-Lara, M. 1985. Control de Azolvamiento en una obra de toma de agua marina. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 60 pp.
- Martínez-Díaz de León, A., C. Nava-Button y F. Ocampo-Torres. 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.
- Martínez-Díaz de León, A. y Coria-Méndez, P. 1993. Distribución de probabilidad de la altura de oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos, B.C., México. *Ciencias Marinas*, 19(2): 203-216.
- Mendoza-Ponce, E.T. 1999. Variación espacio temporal del perfil de playa en Rosarito, B.C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 40pp.
- Oropeza-Rosales, F. 1998. Descripción del clima del oleaje para las costas Mexicanas del Océano Pacífico en los Estados de Baja California, Sonora, Colima, Michoacán y Guerrero. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 219pp.
- Padilla-Hernández, 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, UABC, 58pp.
- Pedroso-Acuña, A. 2000. Análisis frecuencial y temporal del oleaje. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM,
- Phillips, O. 1958. The equilibrium range in the spectrum of wind generated ocean waves. *J. Fluid Mech.* 107, 465pp.
- Rivas-Cáceres, H.S. 1992. Conversión de energía del oleaje: diseño, usos y aplicaciones. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 62pp.