



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DE MAR CON LAS MEDICIONES DE OLEAJE DE LA RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS.

Noé Toledano Vega
José Alfredo López López
Rodolfo Ramírez Xicotencatl
David Humberto Segura Quiroz

Publicación Técnica No. 644
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales del Instituto Mexicano del Transporte, por M. en I. Noé Toledano Vega, Dr. José Alfredo López López, Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl e Ing. David Humberto Segura Quiroz.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna VI-32/15 Caracterización del Estado de Mar con las Mediciones de Oleaje de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas.

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	xi
Sinopsis.....	xiii
Abstract.....	xv
Resumen Ejecutivo.....	xvii
Introducción.....	1
1 Marco Teórico.....	7
2 Procedimiento.....	35
3 Resultados.....	47
Conclusiones.....	115
Bibliografía.....	117

Índice de figuras

	Página
Figura 1 Ejemplos de estructuras marinas	1
Figura 2 Equipos de medición	2
Figura 3 Superficie libre del mar	3
Figura 4 Serie de tiempo de la superficie libre del mar	4
Figura 5 Modelo para régimen medio.....	5
Figura 5 Modelo para análisis extremal.....	5
Figura 1.1 Clasificación de ondas por el periodo.	7
Figura 1.2 Distribución de eventos. Periodo de oleaje normal y extraordinario.	9
Figura 1.3 Descripción de una ola simple	10
Figura 1.4 Gráfica típica de altura de ola vs probabilidad acumulada de excedencia.....	14
Figura 1.5 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad para la distribución Fisher Tippett.	20
Figura 1.6 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada para la distribución Fisher Tippett.	20
Figura 1.7 Gráfica de la Densidad de Densidad de Probabilidad para la distribución Frechet.....	22
Figura 1.8 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada para la distribución Frechet.....	23
Figura 1.9 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad para la distribución Exponencial.....	26
Figura 1.10 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada para la distribución Exponencial.....	26

Figura 1.11 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad para la distribución Weibull.	28
Figura 1.12 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada para la distribución Weibull	28
Figura 1.13 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad para la distribución Rayleigh	30
Figura 1.14 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada para la distribución Rayleigh	31
Figura 2.1 Boya direccional medidora de oleaje MKIII marca Datawell.	35
Figura 2.2 Esquema de las partes de la boya, exterior e interior	37
Figura 2.3 Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas.	37
Figura 2.4 Archivo tipo GPS.txt.	38
Figura 2.5 Archivo tipo HIS.	38
Figura 3.1 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Ensenada, B. C.	48
Figura 3.2 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Ensenada, B. C.	49
Figura 3.3 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Isla Cedros, B. C.	50
Figura 3.4 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Isla Cedros, B. C.	51
Figura 3.5 Caracterización del oleaje medio para el puerto de San Carlos, B. C. S.	52
Figura 3.6 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de San Carlos, B. C. S.	53
Figura 3.7 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Cabo San Lucas, B. C. S.	54
Figura 3.8 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Cabo San Lucas, B. C. S.	55
Figura 3.9 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Mazatlán, Sin.	56

Figura 3.10 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Mazatlán, Sin.	57
Figura 3.11 Caracterización del oleaje medio para Puerto Vallarta, Jal.	58
Figura 3.12 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Vallarta, Jal.	59
Figura 3.13 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Manzanillo, Col.	60
Figura 3.14 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Manzanillo, Col.	61
Figura 3.15 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Cuyutlán, Col.	62
Figura 3.16 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Cuyutlán, Col.	63
Figura 3.17 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.	64
Figura 3.18 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.	65
Figura 3.19 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Acapulco, Gro.	66
Figura 3.20 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Acapulco, Gro.	67
Figura 3.21 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Huatulco, Oax.	68
Figura 3.22 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Huatulco, Oax.	69
Figura 3.23 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Salina Cruz, Oax.	70
Figura 3.24 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Salina Cruz, Oax.	71
Figura 3.25 Caracterización del oleaje medio para Puerto Chiapas, Chis.	72
Figura 3.26 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Chiapas, Chis.	73
Figura 3.27 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Loreto, B. C. S.	74

Figura 3.28 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Loreto, B. C. S.	75
Figura 3.29 Caracterización del oleaje medio para Puerto Peñasco, Son.	76
Figura 3.30 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Peñasco, Son. ..	77
Figura 3.31 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Bahía de Kino, Son.	78
Figura 3.32 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Bahía de Kino, Son.	79
Figura 3.33 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Guaymas, Son.	80
Figura 3.34 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Guaymas, Son.	81
Figura 3.35 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Yavaros, Son.	82
Figura 3.36 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Yavaros, Son.	83
Figura 3.37 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Topolobampo, Son.	84
Figura 3.38 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Topolobampo, Son.	85
Figura 3.39 Caracterización del oleaje medio para el puerto de El Mezquital, Tamps.	86
Figura 3.40 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de El Mezquital, Tamps.	87
Figura 3.41 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Altamira, Tamps.	88
Figura 3.42 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Altamira, Tamps.	89
Figura 3.43 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Tampico, Tamps.	90
Figura 3.44 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Tampico, Tamps.	91

Figura 3.45 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Tuxpan, Ver.	92
Figura 3.46 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Tuxpan, Ver.	93
Figura 3.47 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Tecolutla, Ver.	94
Figura 3.48 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Tecolutla, Ver.	95
Figura 3.49 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Bahía de Vergara, Ver.	96
Figura 3.50 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Bahía de Vergara, Ver.	97
Figura 3.51 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Veracruz, Ver.	98
Figura 3.52 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Veracruz, Ver.	99
Figura 3.53 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Dos Bocas, Tab.	100
Figura 3.54 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Dos Bocas, Tab.	101
Figura 3.55 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Frontera, Tab.	102
Figura 3.56 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Frontera, Tab.	103
Figura 3.57 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Seybaplaya, Camp.	104
Figura 3.58 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Seybaplaya, Camp.	105
Figura 3.59 Caracterización del oleaje medio para Puerto Progreso, Yuc.	106
Figura 3.60 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Progreso, Yuc. ...	107
Figura 3.61 Caracterización del oleaje medio para Puerto Juárez, Q. Roo.	108
Figura 3.62 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Juárez, Q. Roo. .	109

Figura 3.63 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Cozumel, Q. Roo.	110
Figura 3.64 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Cozumel, Q. Roo.	111
Figura 3.65 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Mahahual, Q. Roo.	112
Figura 3.66 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Mahahual, Q. Roo.	113

Índice de tablas

	Página
Tabla 1.1 Funciones de distribución probabilística para análisis extremal	32
Tabla 2.1 Características de las boyas medidoras de oleaje direccional	36
Tabla 2.2 Características de la dirección del oleaje	36
Tabla 2.3 Especificaciones de la luz de led.....	36
Tabla 2.4 Parámetros de ajuste para obtener las variables de la función de densidad de probabilidad	45

Sinopsis

El presente documento ha sido elaborado utilizando datos procedentes de la Red Nacional de Estaciones Mareográficas y Meteorológicas (RENEOM) del Instituto Mexicano del Transporte, dependencia desconcentrada de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, del Gobierno de México.

Los datos proceden, por lo tanto, de las estaciones que conforman la RENEOM, dichos datos han sido almacenados durante el tiempo de operación de la red y se les aplicaron controles de calidad y procesos de validación que garanticen la mayor fiabilidad posible.

Los resultados contenidos en este documento tienen carácter consultivo u orientativo, por lo que en ningún caso el Instituto Mexicano del Transporte o la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, del Gobierno de México, se hará valedor o responsable de las consecuencias que se pudieran derivar de su uso.

Abstract

This document has been prepared using data from the National Network of Mareographic and Meteorological Stations (RENEOM) of the Mexican Transportation Institute, a deconcentrated unit of the Ministry of Communications and Transportation of the Government of Mexico.

The data therefore comes from the stations that make up the RENEOM, these data have been stored during the network's operation time, and quality controls and validation processes were applied to guarantee the highest possible reliability.

The results contained in this document are advisory or advisory in nature, so that in no case the Mexican Institute of Transportation or the Ministry of Communications and Transportation, the Government of Mexico, will be held responsible or responsible for the consequences that may arise from its use.

Resumen ejecutivo

Esta investigación está orientada a las necesidades del País en materia de información meteorológica marina, cuyos productos están enfocados a las actividades marinas en el mar y a las diversas actividades que se desarrollan en áreas costeras.

En general, la meteorología marina abarca múltiples actividades, principalmente predicciones y avisos a la comunidad, para los cuales, es necesario conocer antes el estado de las condiciones de la atmósfera, así como el de la superficie del océano, ya que las operaciones que se desarrollan en el mar dependen totalmente de las condiciones ambientales, siendo el viento y el oleaje los factores que determinan la seguridad o la capacidad de operación en un puerto.

Por ello, el desarrollo óptimo y seguro de las actividades portuarias dependerá, en gran medida, de las herramientas que se le ofrezcan a los usuarios y prestadores de servicios para poder tener conocimiento del estado de mar que prevalece en determinados momentos en una zona portuaria.

Para cubrir esa necesidad y generar información representativa, actualmente se utilizan equipos de medición como boyas, radares, imágenes de satélite y modelos numéricos con los que se genera información de la superficie del océano.

En la Ingeniería de Puertos y Costas conocer el comportamiento del oleaje de una región en particular es el factor más importante en la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de estructuras portuarias. Por tal motivo y con la finalidad de generar información complementaria del oleaje en las costas nacionales, la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales del Instituto Mexicano del Transporte realizó un estudio para caracterizar los estados del mar representativos en los principales puertos de México, en el que se tomó como base la historia de mediciones del oleaje que se ha generado con las boyas de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas. La descripción de las mediciones que se obtiene en este estudio está en términos de altura de ola, periodo y dirección de incidencia y, para ello, se utilizaron modelos probabilísticos con los que se determinó la forma que tomó cada conjunto de datos muestreados en los puertos, definiendo régimen medio y extremal para cada caso. En ambos tipos de análisis, se definió la función de probabilidad que mejor se ajustó a los datos disponibles.

Introducción

Las estructuras que se diseñan en la ingeniería civil, se conciben con la finalidad de cumplir una serie de funciones, de respetar su entorno y buscando promover el desarrollo sostenible de todas las actividades socioeconómicas vinculadas.

Son muchos los casos en los que la ingeniería se enfrenta a trabajos en los que está involucrado el comportamiento del mar y, en el caso de estructuras marinas, por ejemplo, algunas de ellas se construyen para crear zonas de abrigo para que las embarcaciones puedan operar con seguridad la mayor parte del tiempo posible. Para cumplir ese objetivo, es necesario conocer el comportamiento de los fenómenos naturales que interactuarán con la estructura, ya que de eso dependerá hacer estructuras que cumplan con los requerimientos físicos a los que estará sometida, sin llegar a sobreestimaciones que serían imposibles de construir económicamente hablando.



Figura 1. Ejemplos de estructuras marinas.

Durante la vida útil de una estructura marina, los procesos dinámicos generados por la acción del oleaje y de las mareas serán incesantes, por lo que una correcta estimación del comportamiento de las olas en la zona es indispensable y su determinación debe basarse en el conocimiento que describa los estados de mar representativos de la región de interés.

En este estudio, la División de Ingeniería de Puertos y Costas del Instituto Mexicano del Transporte realizará la caracterización de las mediciones del comportamiento del oleaje (estado de mar) que se ha medido con las boyas de la RENEOM en los puertos mexicanos, con la finalidad de generar información complementaria del oleaje representativo en las costas mexicanas que será puesto a disposición del público en general.

Para tener el conocimiento de los estados de mar se debe medir en sitio, sin embargo, pocas veces es posible disponer de una fuente de información que genere datos que describan las características de los mares de México y, en ese sentido, en el año 2004, el Instituto Mexicano del Transporte puso en operación una boya direccional medidora de oleaje con la finalidad de medir sistemáticamente y de forma permanente, el comportamiento del oleaje en el puerto de Veracruz, Veracruz. La instalación de este equipo, marcó la línea base de las mediciones del oleaje, porque esa boya fue el programa piloto del proyecto denominado Red Nacional de Estaciones Oceanográficas que tiene por objetivo medir permanentemente las variables involucradas en la interacción océano-atmósfera en los puertos de México. Con la ejecución de ese proyecto, hoy se cuenta con una importante base de datos de mediciones de las características del oleaje, de las variaciones de los niveles del mar y de las principales variables meteorológicas.



Figura 2. Equipos de medición.

Las mediciones en sitio son una herramienta muy valiosa que ofrece una buena idea acerca del comportamiento de la variable de interés en determinado lugar, pero las mediciones, por sí mismas, no ofrecen la respuesta a la incógnita que se busca en la ingeniería para un diseño. Además de disponer de equipos especializados para la medición, labor de por sí ya difícil, es necesario aplicar métodos estadísticos que ayuden a conocer un valor representativo que deberá ser el resultado del análisis de una muestra de datos. De tal forma que, para determinar los valores característicos que representen ese estado de mar en un tiempo determinado, se deberá analizar todo un conjunto de observaciones que describan el perfil de la superficie libre del mar el cual estará compuesto por una amplia gama de amplitudes de onda que provienen de distintas direcciones con frecuencias y fases diferentes.

Para el desarrollo de este trabajo, el enfoque será en las mediciones del oleaje que se han realizado con las boyas de la RENEOM. Es necesario tener claro que el interés principal en el estudio de un estado de mar es el de observar la tendencia que muestran los valores de las características de las olas a través del tiempo.



Figura 3. Superficie libre del mar.

Normalmente, la caracterización del estado del mar se entiende como una descripción en términos de altura de ola, periodo y dirección de incidencia, que puede ser de largo término, en el que se incluye por un lado el régimen medio del oleaje, así como, el régimen extremal; o bien, de corto término en el que se utilizan métodos conocidos como análisis temporal y análisis espectral. Para estos últimos se asume que el proceso es estacionario, aleatorio y con distribución normal, mientras que la descripción de largo término refleja las características climatológicas existentes. Para este el enfoque fue en la caracterización del estado del mar de largo término sin dejar de describir a grandes rasgos en qué consisten los métodos de análisis a corto plazo.

Se parte de las mediciones de la superficie libre del mar generadas con las boyas de la RENEOM, mediciones que corresponden al resultado de una serie de registros consecutivos y a determinado tiempo, de la oscilación de la superficie libre del mar, la cual es denotada por $\eta(t)$ (ver figura 4). Para su análisis, estas mediciones deberán ser tratadas como un proceso estocástico, ya que una señal de mediciones de oleaje representa un fenómeno que se desarrolla de forma aleatoria por tratarse de un conjunto amplio y diverso de magnitudes como: alturas de ola, períodos de ola, dirección de incidencia, longitudes de onda, los cuales varían con el paso del tiempo. Esta idea conduce a la representación de todo un conjunto de mediciones tomadas en un intervalo de tiempo, a través de un solo valor característico, el cual puede ser obtenido con la aplicación de métodos que permitan el ordenamiento estadístico del conjunto de mediciones, los cuales son conocidos como análisis temporal cuando el análisis se hace en el dominio del tiempo o bien, análisis espectral si se hace en el dominio de la frecuencia. Estos métodos han sido utilizados en varias disciplinas de la ingeniería para describir algunos fenómenos físicos y, de acuerdo con su función, son aquellos que tratan de condensar o resumir todos los datos o características de una serie de tiempo de valores, para, de esta forma, describir varios aspectos del conjunto de mediciones. Con la aplicación de cualquiera de estos dos métodos se puede resolver el problema de obtener valores estadísticos que representen un conjunto de mediciones, que, para este caso, serán la altura de ola significativa, su periodo asociado y la dirección de incidencia, que

representan al conjunto de eventos medidos a cada 0.7 s durante un intervalo de tiempo 30 minutos.

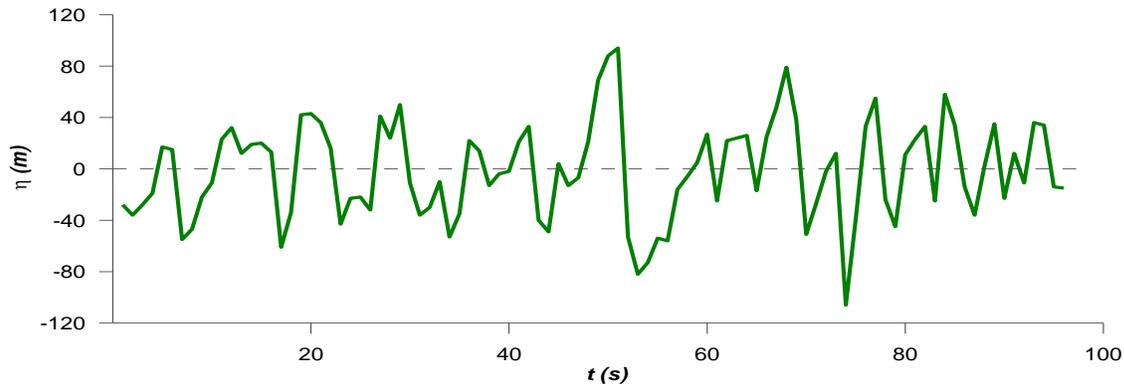


Figura 4. Serie de tiempo de la superficie libre del mar.

Una vez que se obtiene el valor conocido como altura de ola significativa H_s el cual representa un conjunto de mediciones de la superficie libre del mar $\eta(t)$ tomados a cada 7 s en 30 minutos, se continuará con el ejemplo de la estructura marina. Se ha obtenido un valor H_s que representa un conjunto de mediciones de la superficie libre del mar, ahora, ¿qué valor del conjunto de las alturas de ola H_s medidas en un año, por ejemplo, podría considerarse como la altura de ola de diseño de una estructura, si se cuenta con una serie de valores de H_s a intervalos de 30 minutos? La pregunta anterior ahora dependerá en buena medida del análisis que se realice al conjunto de valores de H_s y, para ello, existen métodos probabilísticos que pueden ser aplicados para la determinación de los conocidos “régimen medio” y “régimen extremal”, cuya aplicación permitirá la caracterización de un estado de mar. De acuerdo a la literatura, en el uso de estos métodos para la determinación de valores extremos existe gran controversia, por lo que la elección la ola de diseño también recae invariablemente en la experiencia del ingeniero diseñador.

Para la caracterización del estado del mar a largo término, existen dos tipos de análisis conocidos como régimen medio y extremal, siendo el objetivo principal del análisis de régimen medio describir el oleaje, permitiendo conocer las condiciones reinantes, o más frecuentes, con el fin de utilizar esta información en estudios de dinámica litoral, operación portuaria, planificación y mantenimiento de la infraestructura, o cualquier tipo de estudio en el que esté relacionado el oleaje incidente en la costa. Con relación a la operación portuaria, el análisis de régimen medio permite conocer, por ejemplo, el tiempo (término medio) que un muelle puede estar abierto para las operaciones de entrada o atraque. Para la construcción de cualquier obra marítima, el análisis, indica los periodos del año en que las condiciones de agitación del mar sean más favorables, ya que permite conocer a altura del oleaje y la dirección por mes o por estación climatológica (Figura 5).



Figura 5 Modelo para régimen medio.

El segundo tipo de análisis se refiere al análisis extremal, que tiene como objetivo conocer los periodos de retorno de oleaje extremo con el fin de conocer la probabilidad de que cierto tamaño de ola se presente en un puerto y, con ello, poder definir la ola de diseño para fines de construcción o mantenimiento de estructuras marítimas. En este caso, el periodo de retorno se define como el número de años que, en término medio, transcurre entre dos sucesos extremos de determinada magnitud. E igual de interesante, es conocer el valor de la altura de ola asociada a un periodo de retorno, por ejemplo, conocer cuál es la altura de ola que se presenta cada 10 años (Figura 6).

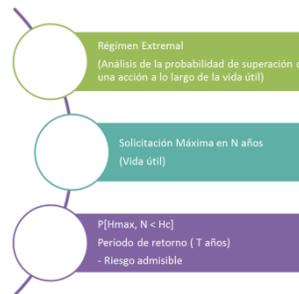


Figura 6 Modelo para análisis extremal.

Para ello se utilizan modelos probabilísticos que tienen como objetivo determinar la forma que pueden tomar un conjunto de datos obtenidos de muestreos con comportamiento aleatorio. Por lo que permite conocer, con un cierto nivel de certeza, cómo podría comportarse un sistema en el futuro. Existe una amplia variedad de distribuciones de probabilidad teóricas que pueden utilizarse para describir diferentes sucesos, pero no todas son adecuadas para describir ciertos fenómenos, como es el caso de la descripción del estado del mar de largo término.

En ambos tipos de análisis, un problema importante es definir la función de probabilidad que mejor se ajuste a los datos disponibles. Para caracterizar el estado del mar de largo término se ha establecido algunos modelos de funciones probabilísticas que pueden representarlo adecuadamente, como son las distribuciones: Weibull (con 2 o 3 parámetros), Fisher-Tippett I (Gumbel), Fisher-Tippett II (Frechet), la distribución exponencial, así como la distribución Rayleigh. Para definir la función de probabilidad que mejor se ajusta a los datos analizados

se pueden aplicar dos estimadores, el primero a través de coeficiente de correlación (R^2) que evalúa la correlación entre dos series de datos por medio de la covarianza y las desviación estándar de cada serie de datos, el segundo es un estimador del error relativo que evalúa el error entre la curva probabilística acumulada calculada y la curva de probabilidad acumulada de los datos, de acuerdo al valor de cada clase obtenida del histograma de datos.

El objetivo principal de este trabajo es generar un Atlas de oleaje de los puertos de México que ofrezca información que apoye a la comunidad portuaria en la toma de decisiones y, para tal efecto, se definen los siguientes objetivos particulares:

- Analizar estadísticamente las series de tiempo que se han generado con las boyas de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas
- Aplicar modelos probabilísticos que describan el comportamiento del oleaje en cada puerto a los datos de la RENEOM y del ATLOOM
- Caracterizar y zonificar los estados de mar correspondientes en el Litoral mexicano
- Analizar los resultados probabilísticos
- Interpretar la información que se obtenga de las funciones probabilísticas generadas

Para lograr los objetivos planteados, en el presente se realizó con los siguientes alcances:

- Para efectos de análisis, los datos que se utilizarán pertenecen a la base de datos que contiene la historia de registros (altura de ola significativa y su periodo de ola asociado, así como la dirección de incidencia) que han sido generados con las boyas direccionales medidoras de oleaje de la RENEOM. Adicionalmente, también se utilizarán los datos del ATLOOM
- Se aplicarán modelos probabilísticos (Weibull, Fisher-Tippett I, II y III, así como, la distribución exponencial) para caracterizar la altura de ola, el periodo de ola y la dirección de incidencia, en los puertos mexicanos que estén instrumentados con boyas direccionales propiedad del Instituto Mexicano del Transporte
- Con base en los resultados se definirán los estados de mar característicos para cada puerto analizado, así como para la zona o región del litoral mexicano, los cuales serán publicados en el Atlas.

1. Marco Teórico

En este capítulo se da una descripción de la caracterización del estado del mar con las mediciones de oleaje de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM). Para ello se iniciará con una breve descripción del oleaje marítimo y después se expondrá una breve introducción a la descripción de los modelos probabilísticos empleados.

1.1 Oleaje

Las ondas superficiales oceánicas son el resultado de fuerzas que actúan sobre el océano. Las fuerzas naturales predominantes son la presión o el esfuerzo de la atmósfera (especialmente a través de la acción de los vientos), terremotos, la gravedad de la Tierra y los cuerpos celestes (la Luna y el Sol), la fuerza de Coriolis (debido a la rotación de la Tierra) y la tensión superficial. Las características de las ondas dependen de las fuerzas que las generan. Las ondas de marea son generadas por la respuesta a la fuerza de gravedad de la Luna y el Sol y estas fuerzas generan ondas de largo periodo. Las ondas capilares, en el otro extremo de la escala, son generadas por la tensión superficial en el agua.

Las ondas pueden ser caracterizadas por su período, es decir, el tiempo que toman las crestas de dos ondas sucesivas para pasar por un mismo punto. El tipo y la escala de las fuerzas que actúan para crear una onda, se reflejan generalmente en el período. La figura 7 ilustra tal clasificación de ondas.

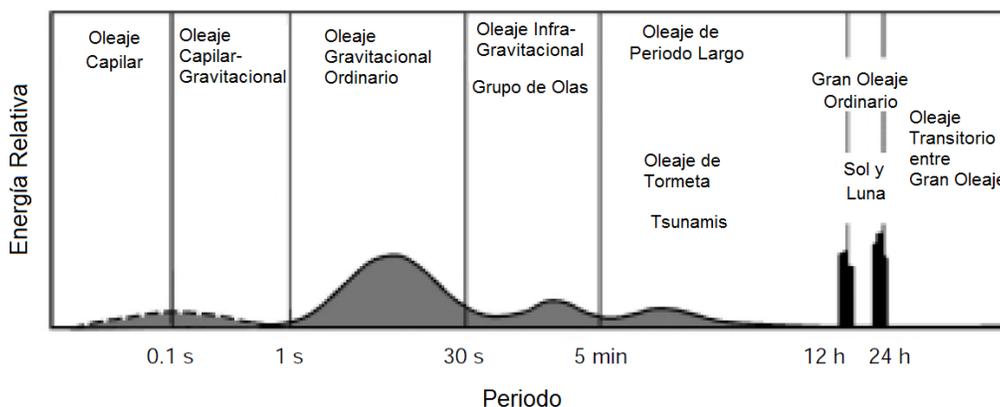


Figura 1.1. Clasificación del oleaje por el periodo^[A].

A grandes escalas, las mareas ordinarias están siempre presentes y son predecibles con bastante exactitud. Menos previsibles son los Tsunamis (generados por terremotos o movimientos de tierras), los cuales pueden ser catastróficos, así como la marea de tormenta que está asociada con el movimiento de la presión atmosférica de meso-escala y puede causar inundaciones costeras.

En este trabajo el enfoque será en las ondas de gravedad, también conocidas como oleaje, las cuales son generadas por el viento y están siempre presentes en el mar. Este tipo de ondas son generadas por el viento en algún lugar del océano, ya sea localmente o a miles de kilómetros de distancia. Afectan a una amplia gama de actividades como el transporte marítimo, la pesca, la recreación, la costa, la industria costera, la administración costera (defensas) y el control de la contaminación. También son muy importantes en los procesos climáticos ya que juegan un papel importante en los intercambios de calor, energía, gases y partículas entre los océanos y la atmósfera.

1.2 Descripción de una ola simple

Tratamiento de la señal

Ante la visión estocástica de las señales aleatorias, y el desarrollo de modelos matemáticos en el campo de la electrónica aplicados a las ciencias relacionadas con el mar, se ha desarrollado métodos para tratar registros de características variables en el tiempo como el oleaje y, como en la mayoría de los problemas relacionados con la ingeniería de puertos, se necesita solo una descripción del oleaje basada en parámetros básicos del tipo altura, periodo y dirección de las olas, se hace una caracterización estadística del oleaje para conocer la magnitud de dichas variables.

En este trabajo, el análisis de las series de tiempo para obtener las alturas y periodos de ola sucesivos, se hace en el dominio del tiempo, tomando como criterio para discretizar la señal el método de cruces por cero. Este método parte de fijar un nivel de referencia cero, considerando un evento (una ola), a los registros contenidos entre dos cruces ascendentes o descendentes por cero.

Aplicando este método, se analizaron las series de tiempo de la superficie libre del mar y se obtuvo una serie de alturas de ola que abarcó aproximadamente un año de mediciones. De las alturas correspondientes a cada uno de los paquetes de datos, se extrajeron los valores de las alturas de ola: significativa H_s , máxima H_{max} , media H_m y la un décimo $H_{1/10}$. A continuación se muestran las series de tiempo de las alturas de ola obtenidas en el proceso.

Es importante recalcar que antes de realizar la estimación de las variables que definen el oleaje, es indispensable tener en mente que en el mar se presentan otros tipos ondas que quedan fuera de los límites definidos para el oleaje gravitacional.

Estas ondas no gravitacionales generaran efectos en los registros e, invariablemente, alterarán los resultados del análisis, por lo que es necesario eliminar dichos efectos antes de hacer el análisis, a través de la aplicación de filtros que eliminen esas influencias.

Estadística de la señal

La elección del tratamiento al cual será sometida la serie es subjetiva y en cada caso debe estudiarse la resolución y el nivel de confianza que se desea tener para la estimación de los parámetros. Ahora, retomando el concepto de altura de ola significativa, la cual, como ya se dijo, no representa el valor de una altura de ola, sino que el valor de esta altura de ola es igual al promedio de un conjunto de olas que queda contenido en el tercio superior de todos los registros. Por otro lado, se hace una distribución en distintas clases de las alturas de ola que se obtuvieron durante un periodo de medición, se obtienen distribuciones como las que se muestran en la figura 8. Esas distribuciones indican que las alturas de ola que se presentaron con mayor frecuencia quedan representadas en la parte central de la campana, mientras que en los extremos se encuentran las alturas de ola que fueron menos frecuentes, olas pequeñas a la izquierda y olas de altura mayor a la derecha para cada una de las campanas (Bretschneider, 1964).

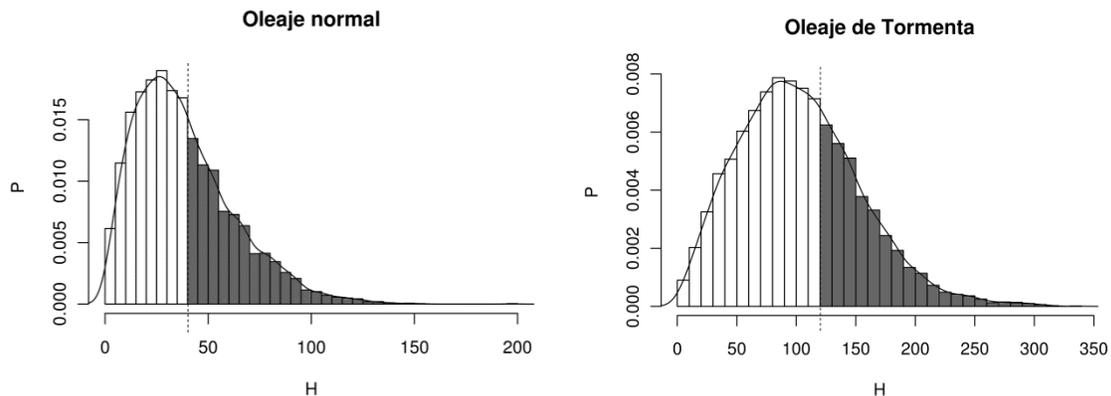


Figura. 1.2 Distribución de eventos. Periodo de oleaje normal (izquierda), extraordinario (derecha).

Las distribuciones de la figura anterior representan la ocurrencia de distintas alturas de ola en estados de mar de dos muestreos realizados en periodos distintos del año. En la gráfica de la izquierda se representa un estado de mar en calma, siendo notorio el aumento del número de alturas de ola de pequeña magnitud, mientras que en la gráfica de la derecha se observa una distribución más simétrica, con un incremento en la ocurrencia de alturas de ola de mayor magnitud, ya que fue tomada durante un temporal.

Ahora, si se observa el comportamiento de la relación entre las variables de interés (resaltadas en la distribución de la figura 1.2), se tiene que las relaciones H_{max}/H_s ,

H_m/H_s y $H_{1/10}/H_s$, siguen un patrón bien definido, siendo la relación con la altura máxima la que muestra una ligera dispersión como se observa en la siguiente figura de los datos.

Para analizar y predecir el oleaje primero se necesita conocer a detalle el fenómeno, y ello permitirá aplicar una teoría para conocer cómo se comporta. Si se observa la superficie del océano se notará que el oleaje suele formar un patrón bastante complejo. Para comenzarse buscará un modelo de inicio simple, el cual es consistente con la dinámica de la superficie del océano, y de esto se derivará una imagen del oleaje por viento que se observa.

El modelo del océano que se utilizó para desarrollar esta idea se basa en unos supuestos bastante simples:

- La incompresibilidad del agua. Esto significa que la densidad es constante y, por lo tanto, se puede derivar una ecuación de continuidad del fluido, expresando por la conservación de fluido dentro de una pequeña celda de agua (Llamada una partícula de agua).
- El flujo de fluido es irrotacional. Esto significa que las partículas individuales no giran. Pueden moverse alrededor uno del otro, pero no hay acción de torsión. Esto permite relacionar los movimientos de las partículas vecinas definiendo una cantidad escalar, llamada potencial de velocidad, para el fluido. La velocidad del fluido es determinada a partir de las variaciones espaciales de esta cantidad.

El movimiento de una ola simple puede ser representado por un movimiento sinusoidal, de cresta larga y oleaje progresivo. La descripción sinusoidal significa que la ola se repite a sí misma y tiene una forma suave de una curva sinusoidal, como se muestra en la Figura 9. La descripción de cresta larga se refiere a que el oleaje está formado por una serie de crestas largas y paralelas que son todas iguales en altura y equidistantes entre sí. La naturaleza progresiva se observa en el movimiento del oleaje a una velocidad constante en una dirección perpendicular a las crestas y sin cambio de forma.

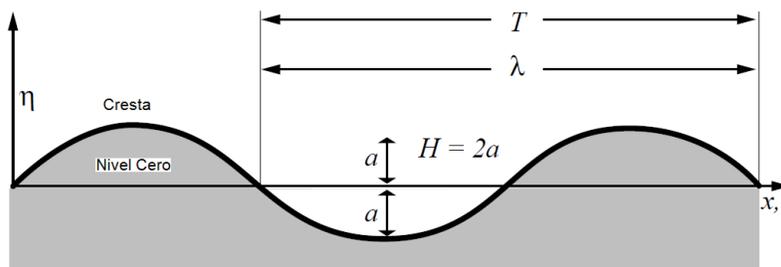


Figura 1.3 Descripción de una ola simple.

1.3 Definiciones Básicas

A continuación, se indican unas definiciones básicas, con base en la descripción de una ola simple:

- **Longitud de ola, λ** , es la distancia horizontal (en metros) entre dos crestas sucesivas.
- **Período, T** , es el intervalo de tiempo (en segundos) entre el paso por un punto fijo de crestas sucesivas
- **Frecuencia, f** , es el número de crestas que pasan por un punto fijo en 1 segundo. Por lo general se mide en crestas por segundo (Hertz) y es el mismo que $1 / T$.
- **Amplitud, a** , es la magnitud del máximo desplazamiento desde el nivel medio del mar. Esto suele indicarse en metros (o pies)
- **Altura de la ola, H** , es la diferencia de superficial de la elevación entre la cresta de la ola y el canal de la ola anterior. Para una ola sinusoidal simple $H = 2a$.
- **Velocidad de propagación, c** , es la velocidad con la que recorre una ola, es decir, la velocidad a la cual avanza la cresta y el canal de la ola. Se refiere comúnmente a la velocidad de ola o velocidad de fase.
- **Inclinación** es la relación entre la altura de ola y su longitud (H/λ).

1.4 Las mediciones de oleaje y la utilización de los datos ^[B]

Las mediciones del oleaje en las costas y en el mar, con instrumentos de auto registro, se han llevado a cabo en los últimos 60 años alrededor del mundo, sin embargo, las observaciones visuales se siguen realizando como se han llevado a cabo a lo largo de la historia. Las mediciones con instrumentos se efectúan en varios países y el número de estaciones de medición está en constante crecimiento.

Las necesidades de las mediciones de oleaje son importantes. Científicamente, el oleaje del mar es una parte más del rompecabezas de los fenómenos naturales, así que muchas más mediciones son necesarias para aclarar su naturaleza. Desde el punto de vista de la ingeniería de costas y oceanográfica, el oleaje marino es el factor externo más poderoso para la planeación, el diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura costera. Sin el conocimiento definitivo de las condiciones del mar en el sitio, ningún proyecto de ingeniería puede ser propuesto. En las zonas costeras, especialmente, los datos de las mediciones instrumentadas

de oleaje son la única fuente con las que los trabajos de ingeniería pueden estar basados.

1.4.1 Duración de los registros e intervalos

La literatura recomienda que la duración estándar actual para el registro de la variación de la superficie libre del mar, es de 100 olas consecutivas, con el fin de reducir la incertidumbre entre la estabilidad estadística de los datos de oleaje y la no estacionalidad de la actividad de oleaje. Para una localidad donde prevalecen periodos de oleaje que exceden los 10 segundos o más, una duración de 20 minutos es comúnmente empleada. Para áreas con aguas de profundidad limitada, donde prevalecen periodos de algunos segundos, una duración de 10 minutos puede ser suficiente. Cuando se realiza un análisis de datos para determinar el espectro por medio de la técnica de la transformada rápida de Fourier, la duración de 17 minutos con 4 segundos se utiliza algunas veces porque permite evaluar 2048 puntos de datos con una tasa de muestreo de 2 Hz.

El oleaje generado por el viento es complejo, incorporando muchos componentes adicionales en las descripciones de altura, periodo y dirección de las olas. Si el estado del mar es medido en una zona de tormenta, entonces los patrones de oleaje consisten en fluctuaciones periódicas aleatorias. Para encontrar el orden en este aparente caos, considerables investigaciones y mediciones deben ser realizadas, para poderlas interpretarlas correctamente.

Los registros de oleaje están disponibles solamente en ciertos sitios. Estos son obtenidos, generalmente, por equipos colocados en sitios fijos, o con boyas medidoras de oleaje direccional (los cuales son ubicados en ciertos sitios de interés). Estos registros contienen generalmente las mediciones de oleaje por un corto periodo (típicamente de 20 a 30 minutos) grabados en intervalos fijos (normalmente por 3 horas) y tomando muestras de 2 registros por segundo (2 Hz). De esta forma, el estado del mar típico puede ser inferido sin la necesidad de un monitoreo continuo.

1.4.2 Análisis de ola por ola

En las etapas iniciales del análisis de oleaje, se utilizaban gráficas en papel para trazar el perfil del oleaje. La lectura manual de los perfiles del oleaje fue el procedimiento comúnmente empleado para el análisis de los registros grabados. En este análisis, las alturas y periodos de olas individuales son leídos, desde el cual algunos parámetros de alturas y periodos son calculados. Los parámetros estándar son la altura máxima (H_{max}) y el periodo de la altura máxima (T_{Hmax})

Como las olas son generalmente aleatorias, siendo generados por los vientos cerca de la superficie del mar, una aproximación estadística es realizada para definir las

condiciones de diseño. Esto es, el estado del mar es descrito en términos de mediciones representativas de la altura, el periodo y dirección del oleaje. Para el diseño se pueden utilizar formulaciones para estimar estas cantidades desde ecuaciones empíricas hasta con los principios básicos que describen el comportamiento del mar.

Cabe mencionar que los equipos utilizados en este estudio son boyas direccionales de oleaje que tienen un rango de operación de -20m a 20m con una resolución de 0.01m; sin embargo, no se toma en la estadística el registro de cada ola, sino una representación la Altura de Ola Significante (H_s), que se define como la media aritmética del tercio de olas más altas registradas en el muestreo.

1.4.3 Series de tiempo para régimen medio [C]

Las series de tiempo son los registros del oleaje en un sitio específico durante una temporada, estos registros permiten realizar la estadística de observaciones individuales de oleaje. Cuando se analizan datos individuales se trata de encontrar una tormenta que tenga una frecuencia de excedencia por ejemplo de $1/n$ por año (por ejemplo $1/225$ por año). Esta tormenta proporciona un X% probabilidad de falla en la vida útil de la estructura definida en años de servicio (por ejemplo 20% de probabilidad de falla en la vida útil de la estructura para 50 años).

El proceso inicia con una serie de observaciones de oleaje dentro de un intervalo definido. Cada observación (por ejemplo, con duración de 30 minutos) da como resultado un valor definido de Altura de Ola Significativa (H_s), el cual se ha definido como la media aritmética del tercio de olas más altas registradas en el muestreo. Cuando un programa de observaciones es realizado de forma permanente durante un largo tiempo, se crea una serie de tiempo con valores de H_s . Estas series de tiempo son la base de las operaciones estadísticas que se explicarán a continuación.

La probabilidad (P) de que una altura de ola (H'_s) sea igual o menor a una altura de ola significativa específica (H_s) está definido por:

$$P=P(H'_s \leq H_s) \quad (1.1)$$

La probabilidad de excedencia (Q), es decir, de que H'_s sea más grande que la altura de ola significativa específica H_s puede entonces ser definida como:

$$Q=Q(H'_s > H_s)=1-P \quad (1.2)$$

Cuando esta relación es expresada en forma logarítmica, se debe calcular también $-\ln(Q)$, y con un análisis entre H_s y $-\ln(Q)$ se observa que existe una alta correlación entre H_s y $-\ln(Q)$ (cerca de 1). Sin embargo, a pesar de que el coeficiente de correlación es alto, es claro que una distribución logarítmica no es totalmente correcta. Esto se demuestra al analizar una gráfica con estos datos, en la que se

observa que los datos no se ajustan totalmente a una línea recta. A pesar de este error, para pequeñas extrapolaciones no existe un gran problema. Los valores de la regresión lineal pueden ser utilizados para calcular la probabilidad de excedencia de una determinada altura de ola específica H_s .

El resultado puede obtenerse de una forma directa. Graficando los valores de Q en un papel con cuadrícula logarítmica, en donde se gráfica la altura de ola vs la probabilidad acumulada de excedencia. En esta gráfica la excedencia de que una observación sea más grande que H_s es fácilmente observada. Por lo tanto, la ventaja de esta gráfica es que los valores de excedencia pueden ser leídos desde la misma (Figura 1.4)

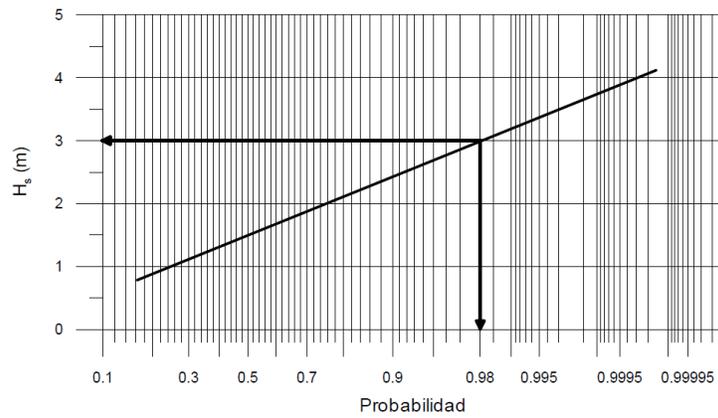


Figura 1.4 Gráfica típica de altura de ola vs probabilidad acumulada de excedencia [D].

Para propósitos de diseño, los valores encontrados en el régimen medio no tienen un significado real. Estos análisis indican los momentos aleatorios del mar, es decir, indican la probabilidad en un momento dado de observar una altura de ola específica H_s . Pero no de una ola de diseño de tormenta H_{ss} . La estadística obtenida puede ser aplicada para asegurar las operaciones del puerto. La lectura de los resultados indica que, con una determinada probabilidad calculada, por ejemplo, el 0.98% del tiempo las condiciones de oleaje pueden presentarse olas con alturas específicas menores de 3.0 m. Si se supone que las operaciones en el puerto se suspenden con alturas mayores de 3.0 m, se puede estimar el porcentaje del tiempo en que estarán cerradas las operaciones del puerto.

1.4.4 Series de tiempo para análisis extremal [C]

Para propósitos de diseño de estructuras, se necesita calcular la excedencia de una tormenta de diseño y no la excedencia de las condiciones de oleaje individual. El primer paso para el diseño de infraestructura costera es la selección de las olas de diseño. En muchos casos, la altura máxima de ola de tormenta podría ser excedida alguna vez en un dado periodo de años, por ejemplo en 100 años, por lo que la altura de ola de diseño es elegida con base en el análisis estadísticos de eventos

extremos. Para el análisis de valores extremos éste se fundamenta en el conocimiento científico y de la ingeniería, como es: el estudio de los caudales de avenida (descargas de lodo) para protección de inundaciones; el efecto de los vientos de huracán para el diseño de los elementos de suspensión para puentes; el estudio estadístico de las alturas de las olas de tormenta para el diseño de obras de defensa costera, son algunos ejemplos del desarrollo de la ingeniería civil e hidráulica aplicada a la obras de infraestructura costera.

Existen tres tipos de aproximaciones para definir la ola de diseño, los cuales dependen del método que se elija para seleccionar el conjunto de datos de oleaje (el cual es llamado muestreo estadístico), los cuales se describen a continuación.

1.4.4.1 Método de Muestreo Total

El primer método utiliza el conjunto total de datos de altura de ola observados visualmente o por instrumentos, durante un periodo de años. El análisis consiste en encontrar una función de densidad de probabilidad conocida (Gumbel, Weibull, Frechet, Tippet, Exponencial, etc.), que mejor se adapte a los datos de la muestra. Una vez que se encuentra la función de densidad de probabilidad que mejor represente a los datos observados, la altura de ola de diseño es estimada por extrapolación de la función de densidad de probabilidad que corresponda a un periodo de años considerado en el proceso de diseño con el objeto de estimar la probabilidad de ocurrencia.

Los otros dos métodos utilizan únicamente las alturas máximas de ola de los datos de las series de tiempo. El Método de máxima anual utiliza la altura de ola significativa más grande de cada año, mientras que el Método de picos por arriba del umbral utiliza las alturas de olas pico de tormentas que sobrepasan un cierto valor umbral.

1.4.4.2 Requisitos estadísticos

El primer requisito importante para una muestra estadística es la independencia de la muestra, esto es, que los datos en una muestra deben ser estadísticamente independientes uno del otro; en otras palabras, el coeficiente de correlación entre datos sucesivos debe ser cercano a cero. Otro factor importante es la homogeneidad, es decir, que los datos individuales de una muestra deben pertenecer a una misma distribución estadística, entonces todos los datos pertenecen a un mismo grupo, el cual es llamado población.

Las olas de tormenta durante un huracán comparado con las olas de tormenta fuera de la temporada de huracanes pueden exhibir algunas diferencias en la función de densidad probabilística acumulada y esto significa que los datos pertenecen a

diferentes poblaciones. Una población de olas generadas por ciclones tropicales podría ser probablemente diferente de la generada por ciclones extra tropicales.

Por lo tanto, el Método de Muestreo Total no es recomendable por los requisitos indicados anteriormente. Las alturas de ola en el océano tienen una tendencia de ser persistentes por muchas horas. El coeficiente de correlación entre alturas de ola en 24 horas es, en algunos casos, de 0.3 a 0.5, esta independencia no es satisfactoria para el conjunto de datos utilizado en el Método de Muestreo Total. Además, el grupo de altura de olas pequeñas constituye una población diferente del grupo de altura de olas grandes. Por lo que se ha observado un error en la estimación de la altura de ola grande de 10% más alta en comparación con los otros métodos.

Por lo que se refiere al Método de Máxima Anual y el Método de Picos por Arriba del Umbral, ambos satisfacen el requisito de independencia.

1.4.4.3 Método de Máxima Anual

El Método de Máxima Anual es ampliamente utilizado en el análisis de descargas extremas de lodos y de otros datos de descargas medio ambientales, para el caso del estudio de oleaje extremal, éste consiste básicamente en seleccionar la altura de ola significativa máxima registrada en un año. Sin embargo, existen bases de datos de tormentas en varios países que raramente cubren un periodo mayor de 20 años. Por lo que se tiene un registro pobre de datos de valores extremos que conlleva a obtener una baja confiabilidad, desde el punto de vista estadístico; una pequeña muestra induce a un amplio rango en el intervalo de confianza.

1.4.4.4 Método del Pico sobre el Método de Disparo (Análisis POT)

El Método de Picos por Arriba del Umbral (abreviado como POT, por sus siglas en inglés *Peaks-Over-Threshold*) puede tener relativamente un gran número de datos en la muestra y esto proporciona un rango pequeño en el intervalo de confianza, que otorga mayor certidumbre.

Con el fin de transformar las observaciones individuales en tormentas, se puede utilizar una secuencia de alturas de ola que no son aleatorias. Cuando se hacen mediciones de oleaje, se define un cierto umbral de disparo, es decir, altura de ola umbral (H_t) por ejemplo $H_t = 1.5$ m, el método consiste en obtener el muestreo estadístico con alturas de ola significativa que son mayores al valor umbral, en este caso con olas mayores de 1.5 m. El valor de la altura de ola umbral se selecciona de forma arbitraria; sin embargo, esta selección afecta seriamente a la sensibilidad del método. Esto es debido a que, con un umbral alto, se observarán pocos eventos a lo largo de los años y puede acarrear una baja correlación estadística; en cambio,

con un valor menor se obtendrá una mayor cantidad de datos, con una mejor correlación estadística.

La razón de introducir un valor umbral es para evitar las pequeñas variaciones en la altura de ola durante largos periodos de medición, ya que los periodos de calma tienen una influencia significativa sobre el resultado final. Básicamente, se debe elegir un valor umbral tan alto como sea posible, pero que contenga suficientes datos para que se pueda hacer un análisis estadístico confiable.

1.5 Distribuciones probabilísticas

Una vez definido el muestreo estadístico para el análisis extremal, es necesario definir las características del oleaje en términos estadísticos y probabilístico. Para ello es necesario definir cualquier altura de ola (que pertenecen al muestreo estadístico) en términos de probabilidad, es decir, la probabilidad que existe de que cierto valor de altura de ola significativa (h) sea mayor a una altura de ola determinada (H), para un conjunto de datos registrados en determinado tiempo. Para ello es necesario conocer el modelo de distribución probabilístico que mejor represente a la muestra estadística.

Con el procedimiento que aquí se presenta se obtiene la probabilidad de aparición de una altura de ola

$$p(H < h) \quad (1.3)$$

Que al integrar esta función se obtiene la función de distribución de probabilidad

$$P(H < h) \quad (1.4)$$

Es decir, el porcentaje de olas que presentan una altura menor o igual a h .

Sin embargo, desde el punto de vista de ingeniería resulta más conveniente hablar en términos de probabilidad de excedencia (porcentaje de olas que tienen una altura de ola mayor que un cierto valor):

$$Q(H > h) = 1 - P(H < h) \quad (1.5)$$

Cabe mencionar que existen dos formas de representar los datos, una a través de la función de densidad de probabilidad (FDP) y otra a través de la densidad de probabilidad acumulada (DPA), ambas se explicarán a continuación para la serie de funciones de probabilidad aplicadas en este trabajo [1, 3, 6].

1.5.1 Distribución Fisher-Tippett 1 (Gumbel)

La distribución Fisher-Tippett Tipo 1, es una distribución de valores extremos, también conocida como Distribución Gumbel, que fue desarrollada a finales del siglo XIX por el matemático alemán Emil Julius Gumbel, es una distribución con dos parámetros de ajuste, uno de posición teta (θ) y un parámetro de escala Beta (β).

1.5.1.1 Función de densidad de probabilidad (FDP)

La función de densidad de probabilidad se define como:

$$p(H < h) = \frac{1}{\beta} \exp - \left[\frac{h-\theta}{\beta} + \exp - \frac{h-\theta}{\beta} \right] \quad (1.6)$$

Para $\beta > 0$

Donde

h = Altura de ola significativa

$\exp = e$ que es una constante = 2.71828182845904

θ = Parámetro de posición = $-b * \beta$

β = Parámetro de escala = $\frac{1}{m}$

m = Pendiente de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

b = Ordenada al origen de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

En algunas ocasiones se puede encontrar esta función expresada con una función reducida z , de forma que, reescribiendo la ecuación 1.6, con una función reducida z , se tiene que:

$$z = \frac{h-\theta}{\beta} \quad (1.7)$$

La ecuación 1.6 se puede expresar como:

$$p(H < h) = \frac{1}{\beta} \exp - [z + \exp - z] \quad (1.8)$$

1.5.1.2 Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA)

La función para determinar la densidad de probabilidad acumulada, se define como:

$$P(H < h) = \exp \left[-\exp - \frac{h-\theta}{\beta} \right] \quad (1.9)$$

Y en términos de la función reducida se obtiene:

$$P(H < h) = \exp[-\exp - z] \quad (1.10)$$

1.5.1.3 Ejes para graficado de datos

Para el graficado de los datos con esta distribución, se emplean las siguientes relaciones:

$$x = h \quad (1.11)$$

$$y = -\ln[-\ln(Phi)] \quad (1.12)$$

En donde h es la altura de ola y Phi es la probabilidad asignada a cada ola, dependiendo del factor de ajuste (formas de punteo), para ello se ordenan los datos de mayor a menor (para, por ejemplo, tormentas o avenidas en ríos) o de menor a mayor (periodos de poco oleaje o estiajes) y de acuerdo con la fórmula de Gringorten (1.13), se tiene que:

$$Phi = 1 - \frac{i-A}{N_t+B} \quad (1.13)$$

En donde:

i = lugar de ubicación de acuerdo a ordenamiento de los datos = 1, 2, ..., N_t

$$A = 0.44; \quad B = 0.12$$

Con respecto a i , se deberá asignar un número de orden, teniendo en cuenta que el número 1 corresponderá al suceso menos probable (creciente o bajante extrema), para el caso de oleaje de régimen medio o para el análisis extremal, se ordena los datos de mayor a menor, es decir el número 1 corresponderá a la altura de ola significativa más alta dentro de la muestra ^[F].

1.5.1.4 Forma de las gráficas típicas

La gráfica Fisher-Tippett Tipo 1 de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP) tiene la siguiente forma:

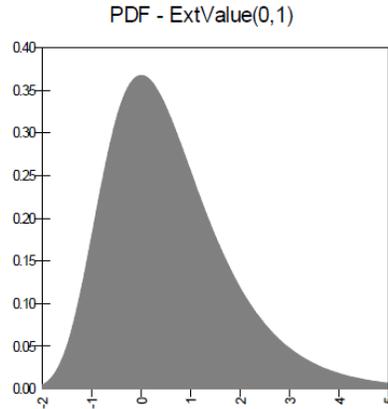


Figura 1.5 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP), para la Distribución Fisher-Tippett Tipo 1 (Gumbel) [6].

Y la gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA) es de la siguiente forma:

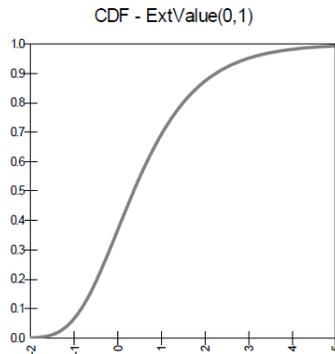


Figura 1.6 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA), para la Distribución Fisher-Tippett Tipo 1 (Gumbel) [6].

1.5.2 Distribución Fisher-Tippett Tipo 2 (Frechet) Modificado

La distribución Fisher-Tippett Tipo 2, también conocida como Distribución Frechet, que proviene del nombre del matemático francés Maurice Frechet, es un caso especial de la distribución de valores extremos y tiene tres parámetros de ajuste: α de forma, θ de posición y β que es un parámetro de escala. La distribución empleada en este trabajo corresponde a una modificación de la distribución original, propuesta por Goda y Kobune en 1990^[2], en donde se emplea k en lugar del parámetro de forma α .

1.5.2.1 Función de densidad de probabilidad (FDP)

La función de densidad de probabilidad se define como:

$$p(H < h) = \frac{k}{\beta} \left(1 + \frac{(h-\theta)}{k\beta}\right)^{-1-k} \exp\left[-\left(1 + \frac{(h-\theta)}{k\beta}\right)^{-k}\right] = \frac{k}{\beta} (z)^{-1-k} \exp^{-(z)^{-k}} \quad (1.14)$$

$$\text{con } z = 1 + \frac{(h - \theta)}{k\beta}$$

Donde

h = Altura de ola significativa

\exp = e que es una constante= 2.71828182845904

β = Parámetro de escala = $e^{-\frac{b}{a}}$

θ = Parámetro de posición $< h_{\min}$

b = Ordenada al origen de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

k = 2.5, 3.33, 5.0 y 10.0

1.5.2.2 Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA)

La función para determinar la densidad de probabilidad acumulada, se define como:

$$P(H < h) = \exp\left\{-\left[1 + \frac{(x-\theta)}{k\beta}\right]^{-k}\right\} \quad (1.15)$$

Y en términos de la función reducida se obtiene:

$$P(H < h) = \exp[-(z)^{-k}] \quad (1.16)$$

1.5.2.3 Ejes para graficado de datos

Para el graficado de los datos con esta distribución, se emplean las siguientes relaciones:

$$x = \ln(h - \theta) \quad (1.17)$$

$$y = [-\ln(\Phi)]^{-1/k} \quad (1.18)$$

En donde h es la altura de ola, θ es el parámetro de posición de la curva de Frechet y Φ es la probabilidad asignada a cada ola, dependiendo del factor de ajuste, el cual se define con la ecuación (1.19), para ello se ordenan los datos de mayor a menor o de menor a mayor y, de acuerdo con la fórmula de Gringorten y con parámetros de ajuste para la distribución Frechet, se tiene que:

$$\Phi_i = 1 - \frac{i-A}{N_t+B} \quad (1.19)$$

En donde:

i = lugar de ubicación de acuerdo a ordenamiento de los datos = 1, 2, ..., N_t

$A = 0.44 + 0.52/\kappa$; $B = 0.12 - 0.11/\kappa$

Goda y Kobune, proponen para esta distribución modificada, que los valores de sean:

$\kappa = 2.5, 3.33, 5.0$ y 10.0

1.5.2.4 1.5.2.4 Forma de las gráficas típicas

La gráfica Frechet de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP) tiene la siguiente forma:

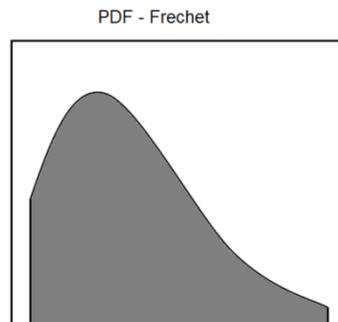


Figura 1.7 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP), para la Distribución Frechet.

Y la gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (CFD) es de la siguiente forma:

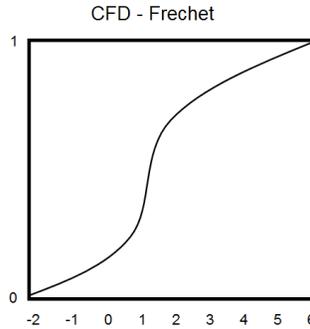


Figura 1.8 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA), para la Distribución Frechet.

1.5.3 Distribución Fisher-Tippett 3 (FT-3) [1]

La distribución Fisher-Tippett 3, es un caso especial de la distribución de valores extremos y tiene tres parámetros de ajuste: α de forma, θ de posición y β que es un parámetro de escala.

1.5.3.1 Función de densidad de probabilidad (FDP)

La función de densidad de probabilidad se define como:

$$p(H < h) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\theta-h}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp^{-\left(\frac{\theta-h}{\beta} \right)^{\alpha}} = \frac{\alpha}{\beta} (z)^{\alpha-1} \exp^{-(z)^{\alpha}} \quad (1.20)$$

$$\text{con } z = \frac{\theta - h}{\beta}$$

Donde

h = Altura de ola significante

$\exp=e$ que es una constante = 2.71828182845904

α = Parámetro de forma = $-b * \beta$

β = Parámetro de escala = $\frac{1}{m}$

θ = Parámetro de posición $< h_{\min}$

m = Pendiente de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

b = Ordenada al origen de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

1.5.3.2 Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA)

La función para determinar la densidad de probabilidad acumulada, se define como:

$$P(H < h) = \exp \left[- \left(\frac{\theta - h}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (1.21)$$

Y en términos de la función reducida se obtiene:

$$P(H < h) = \exp[-(z)^\alpha] \quad (1.22)$$

1.5.3.3 Ejes para graficado de datos

Para el graficado de los datos con esta distribución, se emplean las siguientes relaciones:

$$x = \ln(\theta - h) \quad (1.23)$$

$$y = \ln[-\ln(\text{Phi})] \quad (1.24)$$

En donde h es la altura de ola, θ es el parámetro de posición de la curva y debe ser evaluado mediante prueba y error para obtener la mejor aproximación ($\theta > h_{\max}$) y Phi es la probabilidad asignada a cada ola, dependiendo del factor de ajuste, para ello se ordenan los datos de mayor a menor o de menor a mayor y, de acuerdo con la fórmula de Hazen (1.25) y el ajuste para la distribución FT-3, se tiene que:

$$\text{Phi} = \frac{i-0.5}{N_t} \quad (1.25)$$

En donde:

i = lugar de ubicación de acuerdo a ordenamiento de los datos = 1, 2, ..., N_t

N_t = Número total de datos

1.5.4 Distribución Exponencial [1, 6]

La distribución Exponencial representa el tiempo continuo equivalente a la distribución Geométrica y representa al tiempo de espera para la ocurrencia de un proceso que es continuo en el tiempo y de intensidad constante. Tiene un parámetro de ajuste β que es un parámetro de escala.

1.5.4.1 Función de densidad de probabilidad (FDP)

La función de densidad de probabilidad se define como:

$$p(H < h) = \frac{\exp^{-(h/\beta)}}{\beta} \quad (1.26)$$

Donde

h = Altura de ola significativa

β = Parámetro de escala = $\frac{1}{m}$

m = Pendiente de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

$\exp=e$ que es una constante = 2.71828182845904

1.5.4.2 Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA)

La función para determinar la densidad de probabilidad acumulada, se define como:

$$P(H < h) = 1 - \exp\left(-\frac{h}{\beta}\right) \quad (1.27)$$

1.5.4.3 Ejes para graficado de datos

Para el graficado de los datos con esta distribución, se emplean las siguientes relaciones:

$$x = h \quad (1.28)$$

$$y = -\ln(1 - Phi) \quad (1.29)$$

En donde h es la altura de ola y Phi es la probabilidad asignada a cada ola, dependiendo del factor de ajuste, para ello se ordenan los datos de mayor a menor o de menor a mayor y, de acuerdo con la fórmula de Gringorten (1.30), se tiene que:

$$Phi = 1 - \frac{i-A}{N_t+B} \quad (1.30)$$

En donde:

i = lugar de ubicación de acuerdo a ordenamiento de los datos = 1, 2, ..., N_t

$A = 0$; $B = 1$

1.5.4.4 Forma de las gráficas típicas

La gráfica Exponencial de la Función de Densidad de Probabilidad (PDF) tiene la siguiente forma:

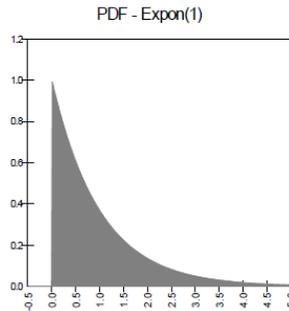


Figura 1.9 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP), para la Distribución Exponencial [6].

Y la gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA) es de la siguiente forma:

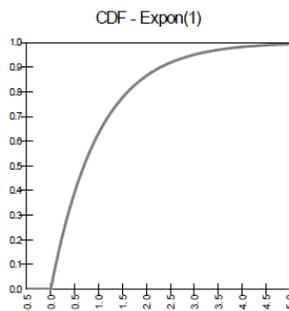


Figura 1.10 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA), para la Distribución Exponencial [6].

1.5.5 Distribución Weibull con 3 parámetros [1, 2, 6]

La distribución Weibull se trata de un modelo continuo, utilizado ampliamente para determinar la vida útil de componentes, determinar el tiempo hasta que un mecanismo falla o, en este caso, para definir periodos de retorno. Tiene tres parámetros de ajuste, θ de posición, α de forma y β que es un parámetro de escala. Algunas ocasiones puede encontrarse distribuciones Weibull con 2 parámetros, esto sucede cuando $\theta = 0$, en este caso, también, se siguen las recomendaciones de Goda y Kobune para la estimación de la probabilidad de la muestra.

1.5.5.1 Función de densidad de probabilidad (FDP)

La función de densidad de probabilidad se define como:

$$p(H < h) = \frac{\alpha(h-\theta)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \left[\exp -\left(\frac{h-\theta}{\beta}\right)^\alpha \right] \quad (1.31)$$

Donde

h = Altura de ola significante

\exp = e que es una constante = 2.71828182845904

α = Parámetro de forma = m

β = Parámetro de escala = $e^{-\frac{b}{\alpha}}$

θ = Parámetro de posición $< h_{\min}$

m = Pendiente de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

b = Ordenada al origen de la recta del ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

1.5.5.2 Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA)

La función para determinar la densidad de probabilidad acumulada, se define como:

$$P(H < h) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{h-\theta}{\beta}\right)^\alpha \right] \quad (1.32)$$

1.5.5.3 Ejes para graficado de datos

Para el graficado de los datos con esta distribución, se emplean las siguientes relaciones:

$$x = \ln(h - \theta) \quad (1.33)$$

$$y = [-\ln(1 - Phi)]^{1/k} \quad (1.34)$$

En donde h es la altura de ola, y Phi es la probabilidad asignada a cada ola, dependiendo del factor de ajuste, para ello se ordenan los datos de mayor a menor y de acuerdo con la fórmula de Gringorten (1.35) se tiene que:

$$Phi = 1 - \frac{i-A}{N_t+B} \quad (1.35)$$

En donde:

i = lugar de ubicación de acuerdo a ordenamiento de los datos = 1, 2, ..., N_t

$$A = 0.20 + 0.27(\kappa)^{1/2}; \quad B = 0.20 + 0.23(\kappa)^{1/2}$$

Goda y Kobune, proponen para esta distribución modificada que los valores sean:

$$\kappa = 0.75, 1.4 \text{ y } 2$$

El parámetro de forma a , se aplica también en las ecuaciones de la función de densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada.

1.5.5.4 Forma de las gráficas típicas

La gráfica Weibull de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP) tiene la siguiente forma:

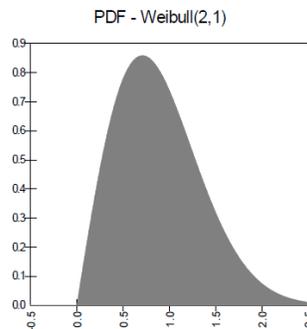


Figura 1.11 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP), para la Distribución Weibull [6].

Y la gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA) es de la siguiente forma:

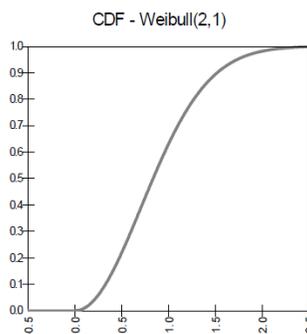


Figura 1.12 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA), para la Distribución Weibull [6].

1.5.6 Distribución Rayleigh [1, 6]

La distribución Rayleigh tiene un parámetro de ajuste que es la varianza de la muestra (σ^2), a continuación, se indican las ecuaciones para determinar las propiedades de esta distribución. Ward Donal L. *et al*, proponen que también se puede aplicar la distribución Weibull cuando el parámetro de ajuste κ es igual a 2. En este trabajo se evaluaron ambas distribuciones, la que se explica a continuación y con el parámetro sugerido que se evalúa dentro de la distribución Weibull.

1.5.6.1 Función de densidad de probabilidad (FDP)

La función de densidad de probabilidad se define como:

$$p(H < h) = \frac{2h}{\sigma^2} \left(\exp\left(-\frac{h^2}{\sigma^2}\right) \right) \quad (1.36)$$

Donde:

h = Altura de ola significativa

$\exp=e$ que es una constante y es igual a 2.71828182845904.

$$\sigma^2 = \text{Varianza de la muestra} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

Con respecto a la varianza, en este trabajo se calculó con respecto al valor de cada clase del histograma ya que, con la serie de datos originales, así como la serie obtenida del picado, en ambos casos las distribuciones no representaban de manera coherente a la muestra.

1.5.6.2 Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA)

La función para determinar la densidad de probabilidad acumulada, se define como:

$$P(H < h) = 1 - \exp\left[-\frac{h^2}{\sigma^2}\right] \quad (1.37)$$

1.5.6.3 Ejes para graficado de datos

Para el graficado de los datos con esta distribución, se emplean las siguientes relaciones:

$$x = \ln(h) \quad (1.38)$$

$$y = \ln[-\ln(1 - Phi)] \quad (1.39)$$

En donde h es la altura de ola, y Phi es la probabilidad asignada a cada ola, dependiendo del factor de ajuste, para ello se ordenan los datos de mayor a menor y de acuerdo con la fórmula de Hazen (1.40) se tiene:

$$Phi = \frac{i-0.5}{N_t} \quad (1.40)$$

En donde:

i = lugar de ubicación de acuerdo a ordenamiento de los datos = 1, 2, ..., N_t

N_t = Número total de datos

1.5.6.4 Forma de las gráficas típicas

La gráfica Rayleigh de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP) tiene la siguiente forma:

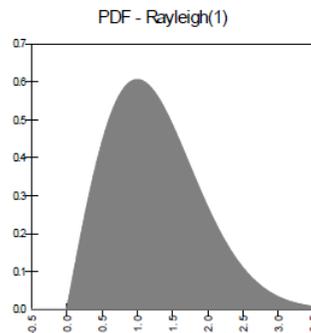


Figura 1.13 Gráfica de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP), para la Distribución Rayleigh [6].

Y la gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA) es de la siguiente forma:

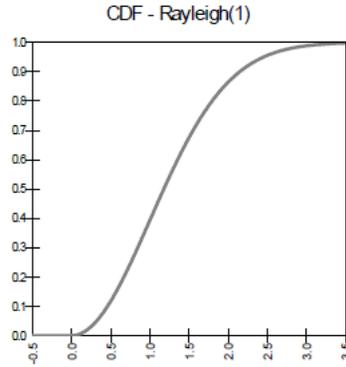


Figura 1.14 Gráfica de la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA), para la Distribución Rayleigh [6].

1.5.7 Mínimos cuadrados ortogonales

El objetivo de utilizar el ajuste por mínimos cuadrados, es determinar la recta que mejor ajusta una nube de puntos (x_i, y_i) . Por lo tanto, para cada valor en el eje de las ordenadas se considera que puede representarse como la suma del valor esperado (que se obtiene por la recta de regresión) más un valor de error que mide la diferencia entre la ordenada experimental y la teórica.

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (1.41)$$

Este supuesto implica que todo el error proviene de la variable dependiente y considera nulo el error en el eje de las abscisas, con lo que se obtiene la regresión de la recta de y sobre x .

La regresión por mínimos cuadrados, tiene como base en determinar los estimadores que reduzcan la suma de los cuadrados de los términos de error.

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \rightarrow \text{Mínimo} \quad (1.42)$$

También podría tomarse como base un razonamiento inverso, es decir, que se considera que la totalidad del error está localizado en la variable independiente, con lo que se obtiene la recta de regresión de x sobre y .

Sin embargo, en numerosos casos prácticos, no puede asegurarse que el error en una de las variables sea nulo o despreciable frente a la otra, sino que ambos son del mismo orden. Para esta situación se aplica el método de regresión por mínimos cuadrados ortogonales que reduce tanto las desviaciones horizontales como verticales.

Se parte del hecho que ambas variables siguen una distribución normal, con esta base se determina la pendiente y la ordenada al origen, el cual se calcula con las siguientes expresiones:

$$y = m + \beta x \quad (1.43)$$

$$m = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (1.44)$$

$$\beta = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (1.45)$$

1.5.8 Resumen de las Distribuciones Analizadas

En la tabla 1.1, se muestra el resumen de las distribuciones analizadas.

Tabla 1.1 Funciones de distribución probabilística para análisis extremal

Distribución	Expresión matemática	Función Reducida	Asignar Probabilidades	Ejes para gráficas
Fisher-Tippett Tipo 1 (FT-1) o Gumbel	<p>FDP</p> $p(H < h) = \frac{1}{\beta} \exp[-z + \exp(-z)]$ <p>DPA</p> $P(H < h) = \exp[-\exp(-z)]$	$z = \frac{h - \theta}{\beta}$	<p>Gringorten</p> $\text{Phi} = 1 - \frac{i - A}{N_t + B}$ <p>A=0.44 B=0.12</p>	$x = h$ $y = -\ln[-\ln(\text{Phi})]$
Fisher-Tippett Tipo 2 (FT-2) o Frechet Modificado	<p>FDP</p> $p(H < h) = \frac{k}{\beta} (z)^{-1-k} \exp^{-(z)^{-k}}$ <p>DPA</p> $P(H < h) = \exp[-(z)^{-k}]$	$z = 1 + \frac{(h - \theta)}{k\beta}$	<p>Gringorten</p> $\text{Phi} = 1 - \frac{i - A}{N_t + B}$ <p>A=0.44+0.52/κ B=0.12-0.11/κ κ= 2.5, 3.33, 5 y 10</p>	$x = \ln(h - \theta)$ $y = [-\ln(\text{Phi})]^{-1/k}$
Fisher-Tippett 3 (FT-3)	<p>FDP</p> $p(H < h) = \frac{\alpha}{\beta} (z)^{\alpha-1} \exp^{-(z)^\alpha}$ <p>DPA</p> $P(H < h) = \exp[-(z)^\alpha]$	$z = \frac{\theta - h}{\beta}$	<p>Hazen</p> $\text{Phi} = \frac{i - 0.5}{N_t}$	$x = \ln(\theta - h)$ $y = \ln[-\ln(\text{Phi})]$
Exponencial	<p>FDP</p> $p(H < h) = \frac{\exp^{-(h/\beta)}}{\beta}$ <p>DPA</p> $P(H < h) = 1 - \exp\left(-\frac{h}{\beta}\right)$	NA	<p>Gringorten</p> $\text{Phi} = 1 - \frac{i - A}{N_t + B}$ <p>A=0 B=1</p>	$x = h$ $y = -\ln(1 - \text{Phi})$

Tabla 1.1 Funciones de distribución probabilística para análisis extremal (continuación)

Distribución	Expresión matemática	Función Reducida	Asignar Probabilidades	Ejes para gráficas
Weibull con 3 parámetros	<p>FDP</p> $p(H < h) = \frac{\alpha(h - \theta)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \left[\exp - \left(\frac{h - \theta}{\beta} \right)^\alpha \right]$ <p>DPA</p> $P(H < h) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{h - \theta}{\beta} \right)^\alpha \right]$	NA	<p>Gringorten</p> $Phi = 1 - \frac{i - A}{N_t + B}$ <p>A=0.20+0.27(κ)^{1/2} B=0.20+0.23(κ)^{1/2} κ = 0.75, 1.4 y 2</p>	$x = \ln(h - \theta)$ $y = [-\ln(1 - Phi)]^{1/k}$
Rayleigh	<p>FDP</p> $p(H < h) = \frac{2h}{\sigma^2} \left(\exp \left(-\frac{h^2}{\sigma^2} \right) \right)$ <p>DPA</p> $P(H < h) = 1 - \exp \left[-\frac{h^2}{\sigma^2} \right]$	NA	<p>Hazen</p> $Phi = \frac{i - 0.5}{N_t}$	$x = \ln(h)$ $y = \ln[-\ln(1 - Phi)]$

2. Procedimiento

En este capítulo se describe, brevemente, el procedimiento para definir la caracterización del estado del mar con las mediciones del oleaje obtenidas de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas.

2.1 Equipos de Medición de Oleaje

Desde el año 2006 el Instituto Mexicano del Transporte ha instalado, en las zonas exteriores de diversos puertos, boyas direccionales medidoras de oleaje en su mayoría modelo MKIII, marca Datawell, que transmiten información en tiempo real al centro de control de tráfico marítimo de la Administración Portuaria Integral o a la Capitanía de Puerto por medio de radio transmisión a la computadora recolectora de datos. La información que se transmite es la altura de ola, el período de la ola, la dirección de incidencia del oleaje y temperatura superficial del agua de mar.

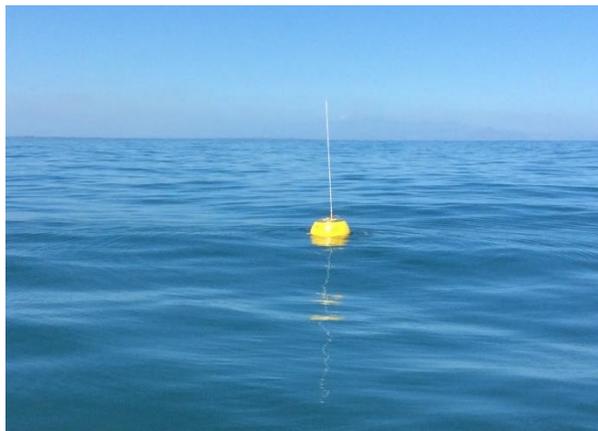


Figura 2.1 Boya direccional de oleaje modelo MKIII marca Datawell.

Este tipo de boya opera siguiendo el movimiento orbital de las ondas en la superficie del mar, mide las aceleraciones verticales y horizontales a que es sometida. La principal ventaja de este esquema de funcionamiento es la precisión para determinar la dirección del oleaje en cuanto a su altura, periodo y dirección, así como la temperatura superficial del agua.

A partir de las aceleraciones medidas, una doble integración permite obtener el desplazamiento del equipo en tres dimensiones. La boya direccional es capaz de registrar aceleraciones en el rango de frecuencia de 0.033 a 0.64 Hz, lo que equivale a periodos de ola entre 1.5 y 30 segundos.

El instrumento posee una antena GPS con la cual se localiza la posición de la boya. La latitud y la longitud se actualizan cada media hora y durante ese tiempo se transmite 8 veces la posición y tiene una precisión de 10 m.

Estos equipos tienen como propósito determinar las características del oleaje; altura, periodo y dirección con acelerómetros estabilizados que consisten en esferas rellenas de fluido (figura 2.2) y son capaces de medir oleaje con las características que se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2, además de registrar la temperatura superficial del mar, ya que poseen un sensor situado en la parte inferior del casco de la boya, con un rango de -5°C a 46°C, resolución de 0.05°C y precisión de 0.2°C.

Tabla 2.1 Características de las boyas medidoras de oleaje direccional.

Rango	-20 m a 20 m
Resolución	1 cm
Precisión	< 0.5 % del valor medido
Rango de periodos	1.6 s a 30 s

Tabla 2.2 Características de la dirección del oleaje.

Rango	0° a 360°
Resolución	1.5°
Referencia	Norte magnético

Tanto para la seguridad en el mar como para la seguridad de la propia boya, ésta posee una antena con luz LED destellante con un alcance geográfico de 6.9 millas náuticas y un alcance luminoso de 4 millas náuticas. El color y patrón de los destellos (5 destellos cada 20s) cumple con la normatividad de ODAS (*Ocean Data Acquisition Systems*) en la IALA (*Internacional Association of Lighthouse Authorities*). En la tabla 2.3 se muestran las características de los destellos emitidos por la boya.

Tabla 2.3 Especificaciones de la luz de led.

Rango	4 Nm
Patrón de destellos	5 flashes en 10 s, 20 s repetición
Ángulos de luz	360° alrededor, +/- 45° del plano
Umbral de funcionamiento	60 Lux

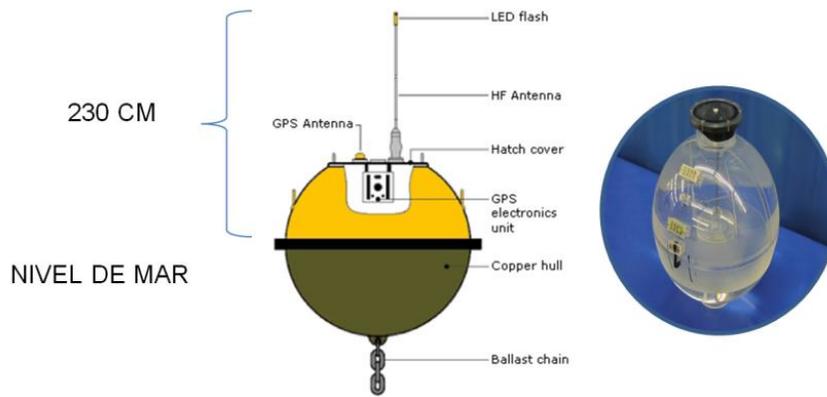


Figura. 2.2 Esquema de las partes de la boya, exterior e interior.

Con la información de estas boyas la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM), tiene una serie de mediciones sistemáticas que, hoy en día, representa una plataforma nacional de información oceanográfica y que han sido instalados de manera permanente en diversos puntos de la línea de la costa mexicana (figura 2.3) con el propósito principal de integrar una historia de datos muestreando variables oceanográficas y que, además, puede ser consultada en tiempo real.

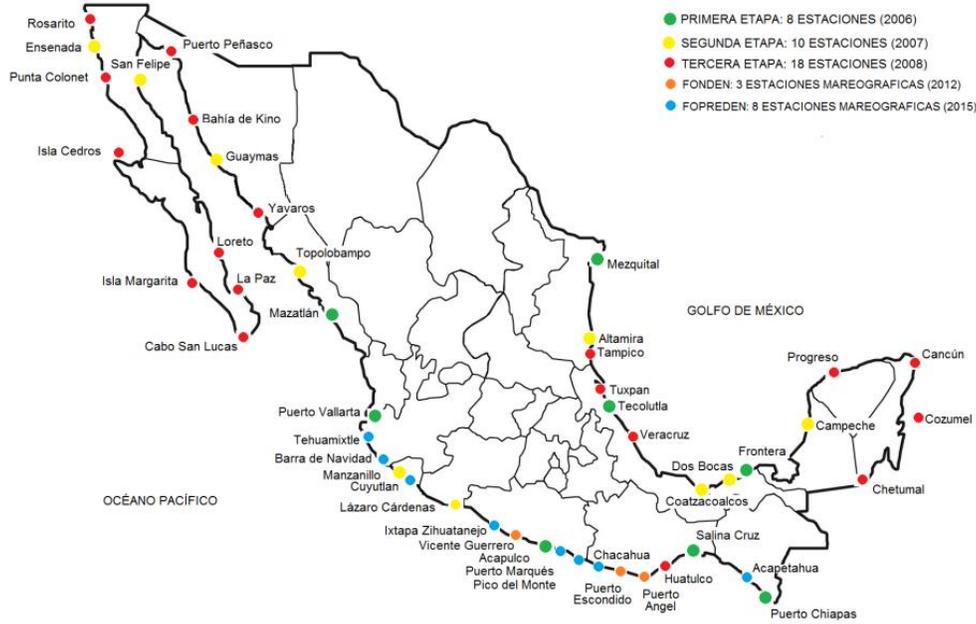


Figura 2.3 Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas del Instituto Mexicano del Transporte.

2.2 Pre-Procesamiento de datos

Las boyas medidoras de oleaje direccional generan varios tipos de archivos, entre ellos cada mes se genera un archivo con los registros de la posición con latitud y posición (*GPS.txt) y otra con los registros de las mediciones de altura de oleaje significativo, dirección y periodo, entre otros datos (*.HIS). La codificación de cada archivo indica el puerto donde se encuentra la boya, año y mes, por ejemplo Boya_Puerto}2008-04 GPS.txt y Boya_Puerto}2008-04.his (figuras. 2.4 y 2.5).

```
2008-04-02T16:02:00.000-06:00 3 31.85734 -116.63142
2008-04-02T16:31:59.999-06:00 3 31.85740 -116.63152
2008-04-03T16:02:00.000-06:00 3 31.85624 -116.63105
2008-04-03T16:31:59.999-06:00 3 31.85629 -116.63103
2008-04-03T17:01:59.999-06:00 3 31.84836 -116.62502
2008-04-03T19:31:59.999-06:00 3 31.81755 -116.64569
2008-04-03T20:01:59.999-06:00 3 31.81751 -116.64571
2008-04-03T20:32:00.000-06:00 3 31.81751 -116.64575
2008-04-03T21:01:59.999-06:00 3 31.81752 -116.64575
2008-04-03T21:31:59.999-06:00 3 31.81749 -116.64584
2008-04-03T22:02:00.000-06:00 3 31.81747 -116.64586
2008-04-03T22:31:59.999-06:00 3 31.81748 -116.64597
2008-04-03T23:01:59.999-06:00 3 31.81747 -116.64601
2008-04-03T23:32:00.000-06:00 3 31.81749 -116.64605
2008-04-04T00:01:59.999-06:00 3 31.81753 -116.64609
2008-04-04T00:31:59.999-06:00 3 31.81754 -116.64618
2008-04-04T01:02:00.000-06:00 3 31.81765 -116.64622
2008-04-04T01:31:59.999-06:00 3 31.81770 -116.64629
2008-04-04T02:01:59.999-06:00 3 31.81777 -116.64629
```

Figura 2.4 Archivo tipo *GPS.txt

```
2008-04-02T16:02:00.000-06:00,25.00,163.1,75.2,22.222,25.0,24.00,22.50,16.45,23.04,32.04,25.60,0.271,0.653,3.34,3.244E-4,24.85,17.60,7
2008-04-02T16:31:59.999-06:00,25.00,220.8,62.3,21.053,1.0,24.20,22.21,10.22,22.95,31.98,26.37,0.372,0.871,3.29,1.446E-5,24.85,18.00,4
2008-04-03T16:02:00.000-06:00,15.38,236.3,60.7,8.696,3.0,15.22,10.52,4.89,12.14,16.89,22.02,0.662,0.826,2.39,2.34E-4,24.85,20.75,5
2008-04-03T16:31:59.999-06:00,15.38,220.8,72.7,4.348,5.0,12.71,5.65,2.41,7.69,10.09,28.59,0.827,0.833,1.13,1.695E-3,24.90,23.30,5
2008-04-03T17:01:59.999-06:00,12.30,233.4,17.5,6.780,19.0,9.43,7.22,5.54,7.88,9.77,12.32,0.381,0.569,2.58,2.648E-3,24.85,23.90,5
2008-04-03T19:31:59.999-06:00,15.38,265.8,31.8,3.810,91.0,7.39,4.27,2.74,5.09,5.44,12.79,0.515,0.692,1.33,4.017E-2,24.85,16.30,5
2008-04-03T20:01:59.999-06:00,15.38,261.6,24.6,3.960,103.0,7.96,4.47,2.83,5.39,6.74,14.17,0.528,0.697,1.43,4.208E-2,24.85,16.25,5
2008-04-03T20:32:00.000-06:00,14.29,255.9,24.8,4.000,100.0,7.59,4.48,2.85,5.31,5.48,12.86,0.518,0.699,1.33,4.004E-2,24.85,16.25,5
2008-04-03T21:01:59.999-06:00,14.29,267.2,15.9,4.211,97.0,8.76,4.87,2.80,5.96,8.65,15.76,0.592,0.744,1.46,3.505E-2,24.85,16.20,5
2008-04-03T21:31:59.999-06:00,14.29,270.0,24.3,4.348,92.0,8.59,5.03,2.88,6.04,7.15,14.67,0.579,0.751,1.28,3.118E-2,24.85,16.20,5
2008-04-03T22:02:00.000-06:00,15.38,268.6,19.2,4.598,87.0,9.21,5.34,2.95,6.46,9.15,15.88,0.602,0.764,1.38,2.637E-2,24.85,16.20,5
2008-04-03T22:31:59.999-06:00,14.29,260.2,23.2,4.598,82.0,8.85,5.27,3.02,6.29,7.59,14.86,0.570,0.751,1.28,2.485E-2,24.85,16.15,5
2008-04-03T23:01:59.999-06:00,15.38,268.6,26.2,4.706,80.0,9.15,5.45,3.11,6.52,8.34,15.36,0.578,0.753,1.31,2.314E-2,24.85,16.15,5
2008-04-03T23:32:00.000-06:00,14.29,278.4,19.5,5.000,83.0,9.56,5.78,3.19,6.90,9.40,15.81,0.592,0.767,1.44,2.127E-2,24.85,16.10,5
2008-04-04T00:01:59.999-06:00,14.29,270.0,24.4,5.000,78.0,9.36,5.78,3.23,6.84,8.46,15.16,0.577,0.764,1.32,1.999E-2,24.85,16.15,5
2008-04-04T00:31:59.999-06:00,14.29,269.0,18.2,5.263,77.0,9.70,6.16,3.21,7.26,9.27,15.27,0.611,0.793,1.40,1.781E-2,24.85,16.15,5
2008-04-04T01:02:00.000-06:00,14.29,267.2,20.4,5.128,73.0,9.38,5.99,3.20,7.03,7.89,14.69,0.596,0.782,1.23,1.779E-2,24.85,16.10,5
2008-04-04T01:31:59.999-06:00,14.29,265.8,18.8,5.556,77.0,10.01,6.43,3.38,7.54,10.40,15.58,0.595,0.791,1.60,1.598E-2,24.85,16.15,5
2008-04-04T02:01:59.999-06:00,15.38,261.6,21.2,5.333,72.0,9.78,6.21,3.26,7.30,9.42,15.40,0.598,0.791,1.41,1.622E-2,24.85,16.20,5
2008-04-04T02:32:00.000-06:00,14.29,268.6,16.1,5.333,73.0,9.30,6.12,3.33,7.09,8.00,14.13,0.571,0.779,1.28,1.645E-2,24.85,16.20,5
2008-04-04T03:01:59.999-06:00,14.29,265.8,27.9,5.063,70.0,8.51,5.75,3.28,6.57,6.18,12.59,0.534,0.762,1.20,1.750E-2,24.85,16.25,5
2008-04-04T03:31:59.999-06:00,14.29,261.6,21.6,5.333,81.0,9.40,6.11,3.48,7.09,7.80,14.46,0.547,0.760,1.30,1.825E-2,24.85,16.25,5
2008-04-04T04:02:00.000-06:00,14.29,267.2,14.9,5.634,87.0,10.01,6.58,3.44,7.63,11.56,15.32,0.594,0.791,1.85,1.756E-2,24.85,16.30,5
2008-04-04T04:31:59.999-06:00,15.38,253.1,21.2,5.556,85.0,9.68,6.38,3.44,7.40,8.24,14.69,0.575,0.783,1.25,1.764E-2,24.85,16.30,5
2008-04-04T05:01:59.999-06:00,14.29,258.8,19.0,5.479,81.0,9.64,6.37,3.37,7.38,9.81,14.59,0.581,0.791,1.57,1.729E-2,24.85,16.35,5
2008-04-04T05:32:00.000-06:00,14.29,264.4,19.8,5.556,88.0,9.72,6.42,3.33,7.45,9.80,14.72,0.590,0.798,1.52,1.826E-2,24.85,16.45,5
2008-04-04T06:01:59.999-06:00,14.29,263.0,16.6,5.479,86.0,9.37,6.24,3.42,7.19,8.77,14.07,0.556,0.779,1.47,1.836E-2,24.85,16.50,5
```

Figura 2.5 Archivo tipo HIS.

Como puede observarse se genera un registro tanto de posición como en oleaje, aproximadamente a cada 30 minutos, con formato de fecha y hora de acuerdo a la norma ISO-8601 en los dos tipos de archivos. Como parte del pre-procesamiento de datos, es necesario asegurar la calidad de los datos, esto se realiza con la aplicación de los siguientes filtros.

2.2.1 Filtrado 1: Registros sincronizados

Un primer paso es el filtrado de datos para comprobar que se hayan generado ambos archivos, con el fin de poder procesarlos. Se buscan las fechas de los archivos HIS, que no están en el archivo GPS, para igualarlos y rellenar los huecos con la fecha y la posición correspondiente, en el archivo GPS. También busca las fechas en el archivo GPS que no están en el archivo HIS y los elimina. Por lo que el primer paso es la corrección o eliminación de registros no sincronizados.

2.2.2 Filtrado 2: Todas las direcciones se corrigen al Norte

Una vez que los registros de fechas en ambos archivos son comparables, se realiza una corrección de las direcciones con la declinación magnética, es decir, que todas las direcciones de oleaje, están corregidas con relación al Norte Magnético y no al Norte Geográfico.

2.2.3 Filtro 3: Ningún valor puede ser negativo

Ningún valor en el registro de oleaje (Archivo HIS), puede ser negativo, por lo que, si se encuentran valores negativos, el registro se elimina tanto en el archivo GPS como en el HIS.

2.2.4 Filtro 4: Todas las coordenadas deben estar cerca de la posición de fondeo.

Se ha elaborado un archivo con la posición de fondeo de cada boya con el fin de que los análisis de las mediciones correspondan al sitio correspondiente. Esto se realiza con el archivo GPS. El máximo error en la posición es de 0.25%, en caso de que una medición se indique fuera de este margen, el registro es eliminado. Por esta razón, en el archivo con las posiciones de fondeo, se deberá indicar cada vez que cambie la posición de fondeo o se instalen boyas nuevas. Estas desviaciones pueden ser debidas a un error en el servicio de GPS, o bien a una falla en el sistema de amarre de la boya, que provoca que la boya abandone el sitio de fondeo (desgaritamiento).

2.2.5 Filtro 5: Todas las direcciones deben estar en 0° y 360°

Debido a fallas en el sistema de posicionamiento global (GPS), en ocasiones se registran direcciones de oleaje menores a 0° o mayores a 360°, cuando se presentan este tipo de registros el proceso de filtrado los elimina del análisis.

2.2.6 Filtro 6: Los períodos T_p deben ser mayores a los períodos T_z

T_p es el periodo pico (que es el recíproco de la frecuencia pico) y se expresa en segundos. Y T_z es el periodo medio que es la media de los periodos registrados y

se expresa en segundos. El registro se elimina si T_p es menor que T_z . Recordando que los máximos valores son los registrados en un lapso de 30 minutos.

2.2.7 Filtro 7: Los períodos T_p deben ser menores o iguales a 30 segundos

Los períodos pico no debe ser mayor o igual a 30 segundos, en este caso el registro se elimina si no cumple con esta condición debido a las características técnicas de la boya direccional utilizada (Tabla 2.1).

2.2.8 Filtro 8: Los períodos T_z deben ser mayores o iguales a 2 s y menores de 25 s.

El periodo medio (T_z), debe ser mayor o igual a 2 segundos y menor de 25 segundos, el registro se elimina si no cumple con esta condición.

2.2.9 Filtro 9: Las alturas de ola H_s deben ser mayores de 0.05m y menores de 10 m

El rango de operación de las boyas es de -20m a 20m con una resolución de 0.01m; sin embargo, no se toma en la estadística el registro de cada ola, sino una representación la Altura de Ola Significante (H_s), que se define como la media aritmética del tercio de olas más altas registradas en el muestreo. Los registros se eliminan si no cumplen con esta condición.

2.2.10 Filtro 10: Los valores “ nu ” deben ser menores de 1

El parámetro nu se refiere al ancho de banda *Longuet-Higgins*, que se relaciona con el ancho espectral, el cual se usa para determinar la distribución de los componentes en frecuencia para determinar el estado del mar. En donde el parámetro del ancho de banda *Longuet-Higgins* tiende a cero, por lo tanto, los registros se eliminan si son iguales o mayores de 1.

2.2.11 Filtro 11: Los valores eps deben ser menores a 1

El parámetro *eps* se refiere al parámetro *épsilon* o ε que es otro parámetro del ancho de banda y es derivado del cociente entre el número de olas y el número de crestas medidas, el cual depende de la velocidad de muestreo, en este caso los registros se eliminan si son iguales o mayores de 1.

2.2.12 Filtro 12: Los períodos Tpc deben ser menores de 30 s.

Tpc se refiere al periodo pico calculado, éste se elimina si es igual o mayor de 30 s, debido al rango de operación de la boya direccional.

2.3 Metodología para el Análisis del Régimen Medio

El procesamiento de datos se divide en dos actividades: la generación de rosas de oleaje en el cual se describe la altura de olas significativas, periodos y direcciones y la generación de la gráfica de No Excedencia. Para ello se obtienen los registros del archivo *.HIS pre-procesados y se procede como sigue:

2.3.1 Rosas de Oleaje

Para obtener las gráficas de oleaje se realiza un Histograma con las siguientes características:

- 1) Ancho de la clase: 22.5 °
- 2) Número de clases: 16
- 3) Forma del Histograma: Circular
- 4) Escalas:
 - a. Altura de ola: rangos a cada 0.5 m
 - b. Periodo rango a cada 2 segundos

2.3.2 Gráfica de No Excedencia

Para la obtención de la gráfica de No-Excedencia para altura de ola significativa, el proceso es el siguiente:

- 1) Obtención de un histograma de frecuencias con un Ancho del Intervalo (AI) de 25 cm, con inicio en 0 cm y máximo de 1000 cm (10 m), lo que da un total de 40 clases.

Por ejemplo, para la Clase 1, el inicio es en 0 cm y el final es en 25 cm.

- 2) Se obtiene la Frecuencia Absoluta (FA) para cada clase, marcando la clase como:

$$\text{Clase } (C) = \text{Inicio} + \frac{AI}{2} \quad (2.1)$$

$$\text{Límite inferior} = C - \frac{AI}{2} \quad (2.2)$$

$$\text{Límite Superior} = C + \frac{AI}{2} \quad (2.3)$$

- 3) Se obtiene la Frecuencia Absoluta Acumulada (FAA) por cada clase.
- 4) Se obtiene la Probabilidad de No Excedencia (P) por cada clase, que es la probabilidad de que cualquier altura de ola h sea igual o menor a una altura de ola específica H .

$$P = P(h \leq H) = \frac{FAA}{N_t} \quad (2.4)$$

- 5) Se obtiene la Probabilidad de Excedencia (Q) por cada clase, que es la probabilidad de que cualquier altura de ola h sea igual o mayor a una altura de ola específica H .

$$Q = Q(h \geq H) = (1 - P) \quad (2.5)$$

- 6) Graficar los datos

Se grafican los datos con el eje de x con la Probabilidad de Excedencia (Q) en orden descendente y en el eje y la altura de ola en cm y se hace un ajuste con mínimos cuadrados para trazar una recta entre los valores de cada clase.

2.3.3 Procedimiento para obtener el periodo de retorno

Para obtener las gráficas de periodo de retorno del régimen extremal, se realiza una evaluación de las Funciones de Densidad de Probabilidad (FDP) y la Densidad de Probabilidad Acumulada (DPA) y se escoge la de menor error y la que obtenga un

mejor coeficiente de correlación, como se explicó en el capítulo anterior, para ello se procede con base al Método Gumbel^[F], el cual se resume en las siguientes etapas:

- 1) Ordenar los datos (de mayor a menor).
- 2) Obtener el Histograma de Frecuencias y la Frecuencia Relativa Acumulada de la muestra.

- i. El número de clases (NC) se determina con la regla de Hebert Sturges (K):

$$K = 1 + 3.322 * LN(N_t) \quad (2.6)$$

$$NC = Entero_k + 1 \quad (2.7)$$

En donde N_t es el número total de registros en la muestra, y el Entero se obtiene del resultado de la ecuación de Sturges y se le suma 1 (uno).

- ii. El ancho del intervalo (AI) se determina con:

$$AI = \frac{Máximo - Mínimo}{NC} \quad (2.8)$$

Dónde: Máximo es el valor máximo de la muestra y Mínimo es el valor mínimo de la muestra.

- iii. El valor de la clase 1 se obtiene como:

$$AI = Máximo * (1.01) \quad (2.9)$$

- iv. Obtener la Frecuencia Absoluta (FA) de la muestra de acuerdo a cada clase, es decir, cuántos registros se cuentan para cada clase.
- v. Obtener la Frecuencia Relativa (FR)

$$FR = \frac{FA}{N_t} \quad (2.10)$$

Dónde: N_t es el número total de registros de la muestra, debido a que se utilizan anchos de rango fijos o iguales, en este caso a la Frecuencia Relativa se le conoce también como Densidad de Probabilidad.

- vi. Obtener la Frecuencia Relativa Acumulada y la Frecuencia Acumulada Inversa.

Con estas frecuencias se evaluará el error relativo para elegir la mejor distribución probabilística.

3) Asignar probabilidades (Phi).

En Tabla 2.1 en la columna de Asignar Probabilidades, se refiere a que a cada registro se le asigna una probabilidad (en este caso como está ordenado de mayor a menor, significa que la altura de ola más alta tendrá el valor más bajo de probabilidad), para la asignación de probabilidad se utilizaron básicamente dos ajustes una propuesta por Hazen y la propuesta por Gringorten, para este último se usaron las modificaciones propuestas por Goda y Kobune.

4) Determinar los valores de la variable reducida, cuando aplique.

5) Graficar los datos

- i. Este paso se realizaba, inicialmente, debido a que se llevaba a cabo el análisis en papel; de hecho, existían hojas de papel con el cuadrulado de cada distribución que se deseaba aplicar, actualmente este paso se obvia debido al proceso por computadora.

6) Hallar los coeficientes de la recta por el método de mínimos cuadrados ortogonales ^[F].

El objetivo de este método es determinar la recta que mejor se ajusta a la nube de puntos (x_i, y_i , los cuales dependen de cada distribución analizada Tabla 1.1), existen tres formas de obtener el ajuste, el primero considera que el error se debe a la variable x que es la variable dependiente y considera nulo el error en el eje y , para este caso, se utilizan los promedios, la varianza y covarianzas de x y y . En el segundo caso considera que el error se encuentra en el eje y que es la variable dependiente, y se aplican los estimadores correspondientes para este caso.

En numerosos casos prácticos no puede asegurarse que el error en una de las variables (en este caso la altura de ola medida h_i y la probabilidad asignada Φ_i), sean nulos o despreciables, frente al correspondiente a la otra, sino que ambos son del mismo orden. Por tal motivo, se utiliza el determinar la pendiente de la recta con una regresión ortogonal que minimiza tanto las desviaciones en el eje x como en el eje y .

- i. Por lo que la pendiente de la recta (m) y la ordenada al origen (b), se definen como:

$$m = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (2.11)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (2.12)$$

En dónde:

σ_y es la desviación estándar de Y

σ_x es la desviación estándar de X

m es la pendiente de la recta

b la ordenada al origen

- ii. Una vez encontrados los valores de la pendiente (m) y la ordenada al origen (b), se definen los parámetros de cada distribución como se indica en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4 Parámetros de ajuste para obtener las variables de la función de densidad de probabilidad

Distribución	Parámetros de ajuste
Fisher-Tippett Tipo 1 (Gumbel)	$\theta = -b^* \beta$ $\beta = \frac{1}{m}$
Fisher-Tippett Tipo 2 (Frechet) Modificado	$\theta < h_{min}$ $\beta = e^{-\frac{b}{\alpha}}$
Fisher-Tippett Tipo 3	$\theta > h_{max}$ $\alpha = m$ $\beta = e^{-\frac{b}{\alpha}}$
Weibull	$\theta < h_{min}$ $\alpha = m$ $\beta = e^{-\frac{b}{\alpha}}$
Exponencial	$\beta = \frac{1}{m}$
Rayleigh	σ^2

7) Definir la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a la muestra.

El objetivo es conocer la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los datos de la muestra, para ello en este estudio se utilizaron dos parámetros de comparación, el primero es del coeficiente de correlación, definido como:

$$R^2 = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.13)$$

En donde σ_{xy} es la covarianza de x y y , σ_x la desviación estándar de x y σ_y la desviación estándar de y , tomando como la probabilidad observada con respecto a los resultados obtenidos con la función de densidad de probabilidad (FDP).

El segundo método de comparación es por mínimos cuadrados, en este método el objetivo es minimizar el error mediante la siguiente expresión:

$$error = \sum_{i=1}^n [(h_i)_{observada} - (h_i)_{estimada}] \quad (2.14)$$

Donde $(h_i)_{estimada}$ es la altura de ola calculada que corresponde a la i -ésima ola observada $(h_i)_{observada}$, tomando como base de cálculo la gráfica de densidad de probabilidad acumulada (PDA).

Una vez conocida la distribución de probabilidad para todos los valores de la variable aleatoria x . En particular nos interesa conocer la probabilidad de no excedencia, es decir, de que esta variable tome un valor menor o igual a un cierto nivel de referencia X , en este caso, como se refiere a alturas de ola significativa (h), la situación se expresa con la siguiente expresión:

$$P = P(h \leq H) \quad (2.15)$$

Siendo P la función de distribución de la variable aleatoria de la altura de ola significativa h , la cual es conocida para todo el intervalo de variación de h y se describe por la distribución de probabilidad del fenómeno estudiado.

Cuando la variable aleatoria considerada es una magnitud relacionada con un fenómeno natural (en este caso Altura de Ola Significativa), es conveniente referirse a periodos de retorno en lugar de probabilidades de excedencia.

Si Q es la probabilidad de que la variable h supere o iguale un valor dado H en un cierto lapso (generalmente un año), el periodo de retorno T representa el número de unidades de tiempo (años) que transcurrirán en promedio entre dos eventos, en el cual la variable h supere el valor de referencia H , esto es:

$$Q = Q(h \geq H) = (1 - P) = \frac{1}{T} \quad (2.16)$$

Esto es equivalente a especificar que un período de retorno o de recurrencia de 100 años, es igual a una probabilidad anual de 0.01.

3. Resultados

En este capítulo se presentan gráficamente los resultados obtenidos de la caracterización del estado de mar en los 33 puertos donde se han realizado las mediciones del oleaje con la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas con formato de Atlas.

Dicho formato esta estructurado de tal forma que se reúnen ordenadamente los resultados correspondientes a la caracterización del estado de mar en sus regímenes medio y extremal.

La disposición de los resultados es la siguiente:

- **Régimen medio:**
 - Ubicación general y particular del sitio de mediciones del oleaje, se indican las coordenadas geográficas y la profundidad del sitio de fondeo.
 - Rosas de oleaje (alturas y períodos de ola)
 - Histogramas de alturas de ola y períodos de ola
 - Distribución de probabilidad de excedencia de alturas de ola
 - Pie de gráfica en la que se indica el puerto, y se muestran los logos institucionales del Instituto Mexicano del Transporte y de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes
- **Régimen medio:**
 - Ubicación general y particular del sitio de mediciones del oleaje, se indican las coordenadas geográficas y la profundidad del sitio de fondeo.
 - Distribución de probabilidad de no excedencia y altura de ola para diferentes períodos de retorno
 - Correlación de alturas y períodos del oleaje
 - Pie de gráfica en la que se indica el puerto, y se muestran los logos institucionales del Instituto Mexicano del Transporte y de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes

3.1 Ensenada B. C. S.

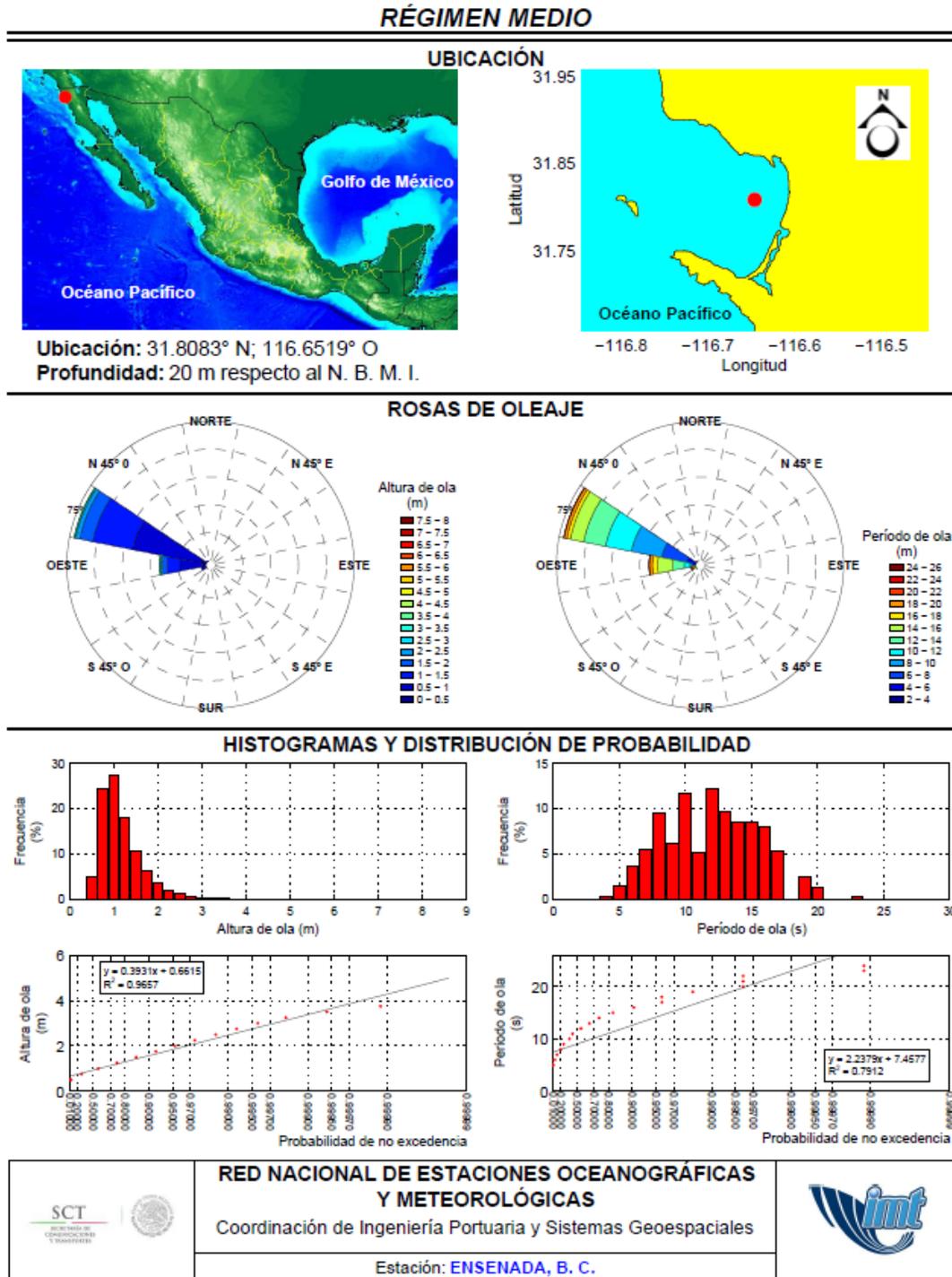


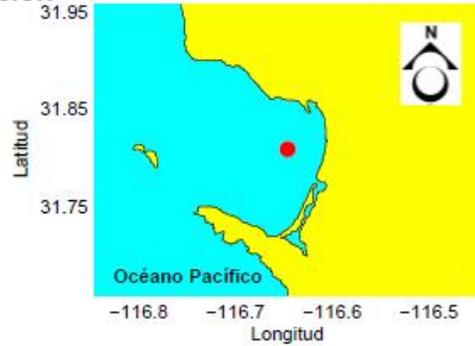
Figura 3.1 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Ensenada, B. C.

RÉGIMEN EXTREMAL

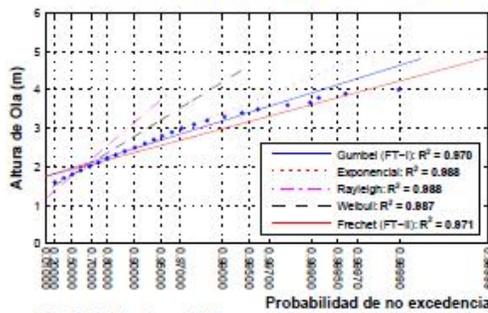
UBICACIÓN



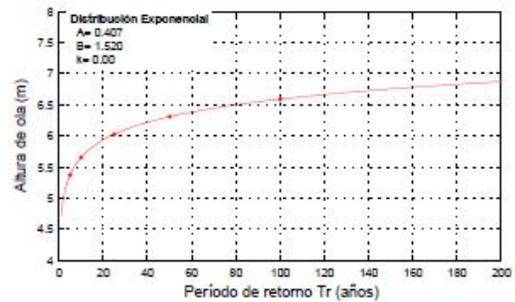
Ubicación: 31.8083° N; 116.6519° O
Profundidad: 20 m respecto al N. B. M. I.



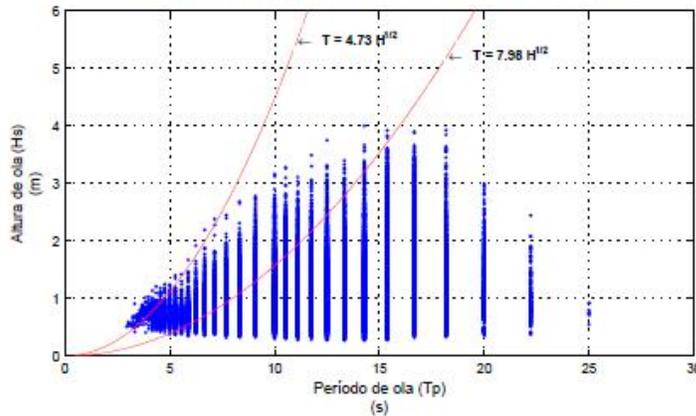
DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación



CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales</p>	
<p>Estación: ENSENADA, B. C.</p>		

Figura 3.2 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Ensenada, B. C.

3.2 Isla Cedros B. C.

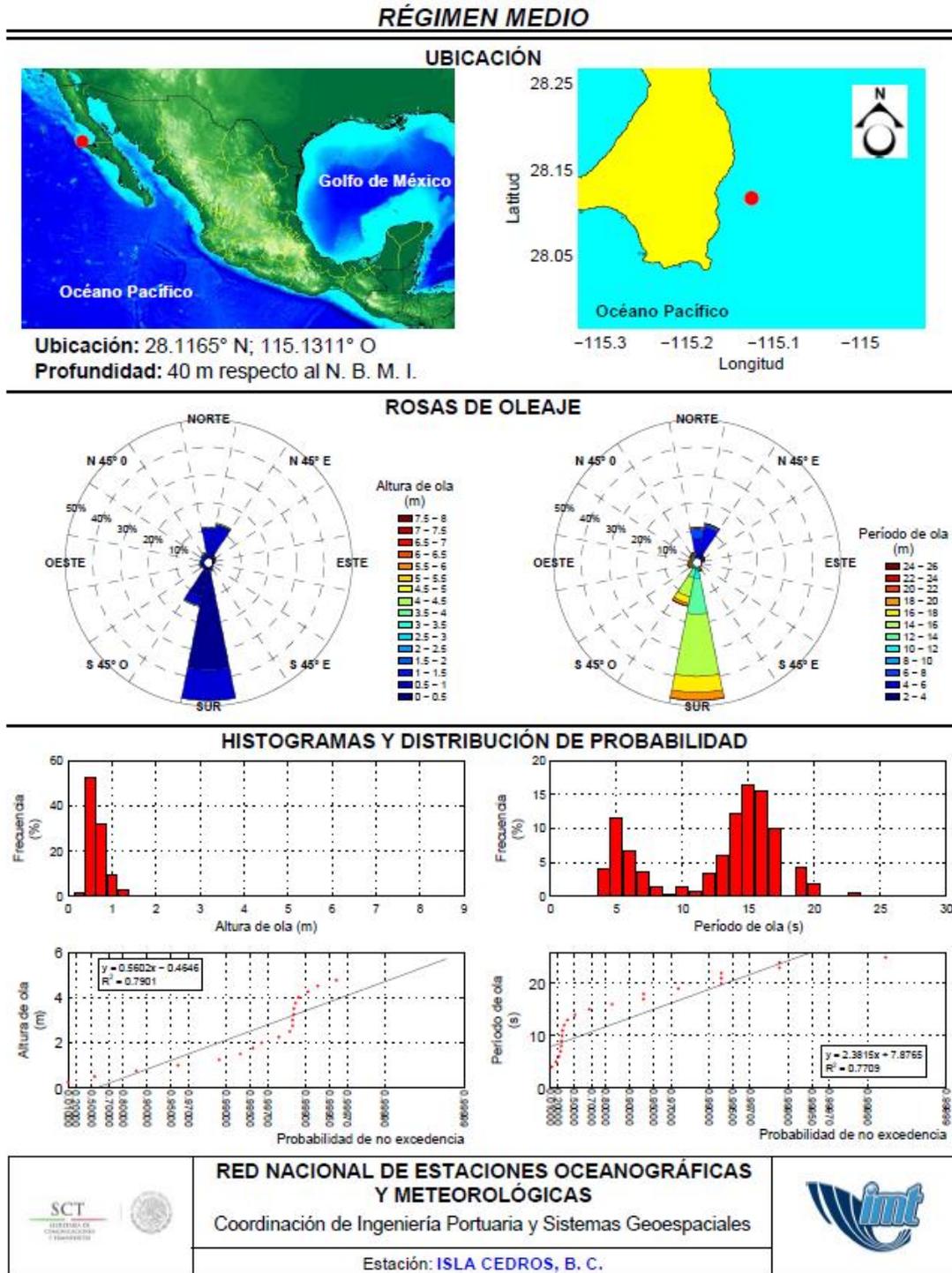


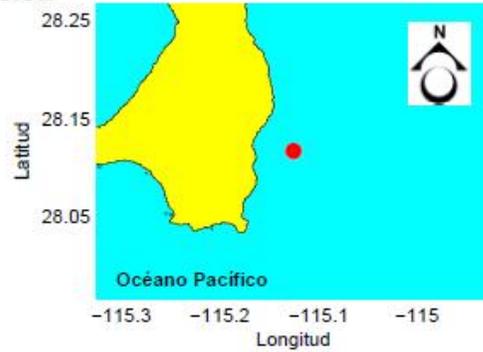
Figura 3.3 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Isla Cedros, B. C.

RÉGIMEN EXTREMAL

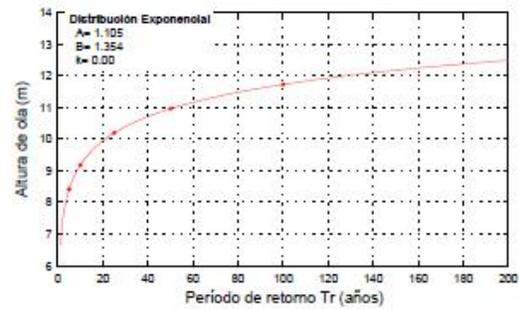
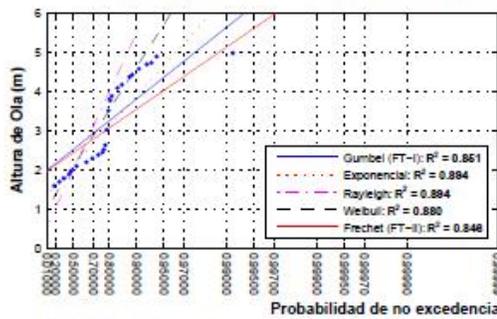
UBICACIÓN



Ubicación: 28.1165° N; 115.1311° O
 Profundidad: 40 m respecto al N. B. M. I.

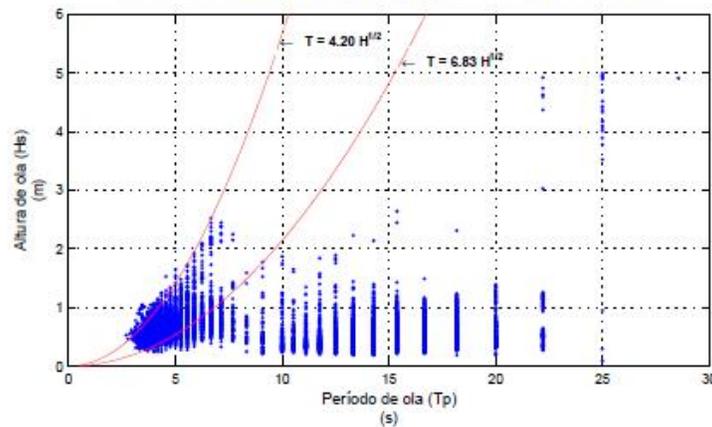


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: ISLA CEDROS, B. C.	

Figura 3.4 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Isla Cedros, B. C.

3.3 San Carlos B. C. S.

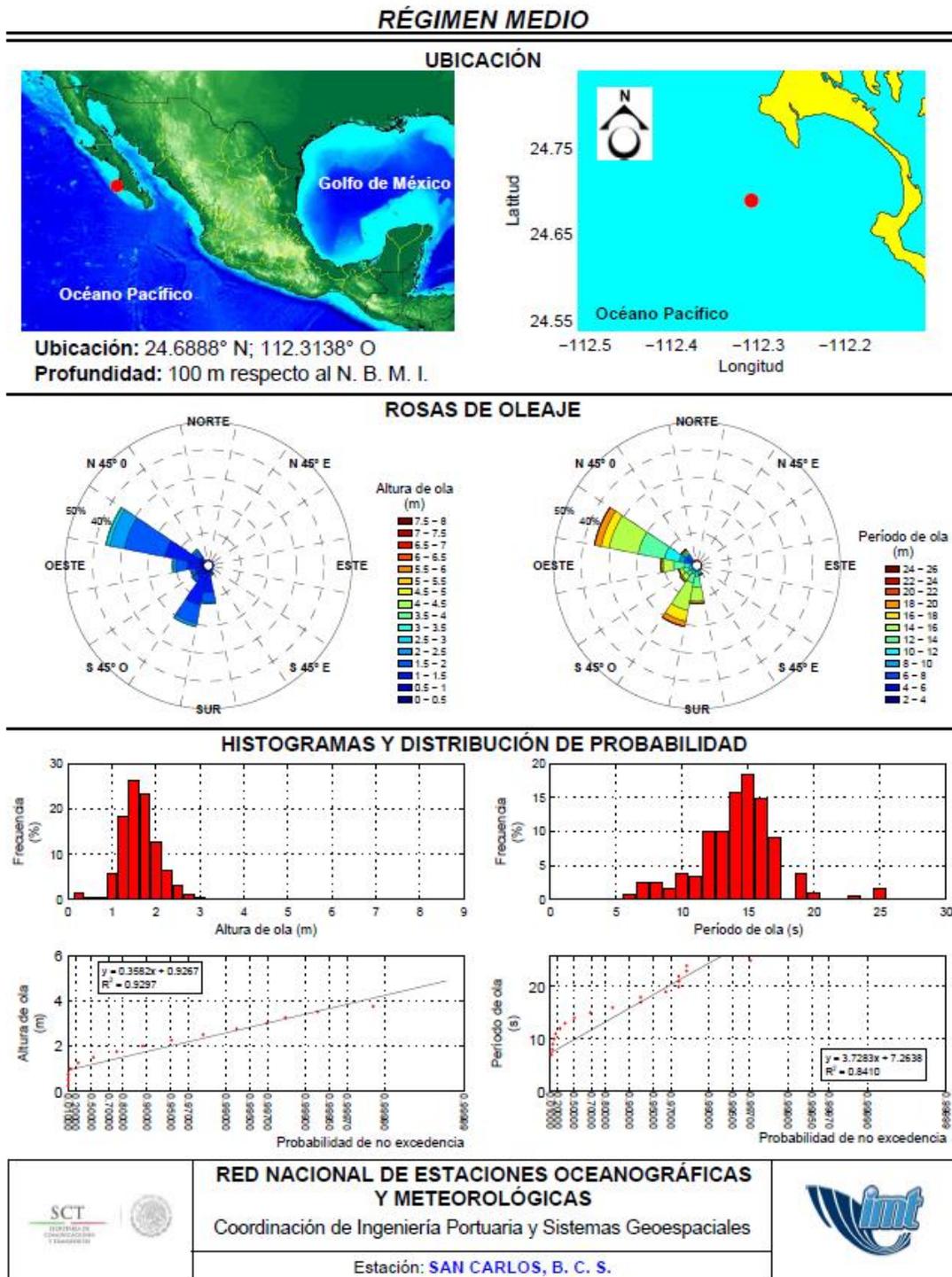
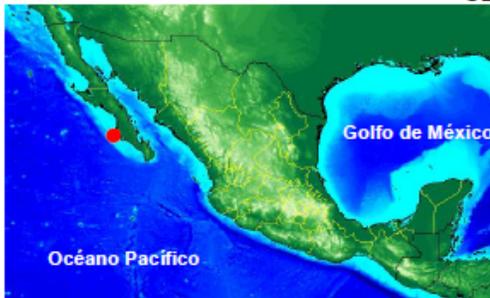


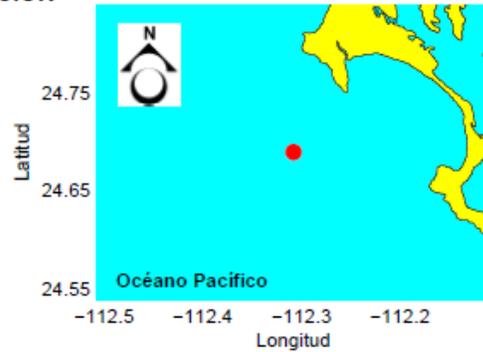
Figura 3.5 Caracterización del oleaje medio para el puerto de San Carlos, B. C. S.

RÉGIMEN EXTREMAL

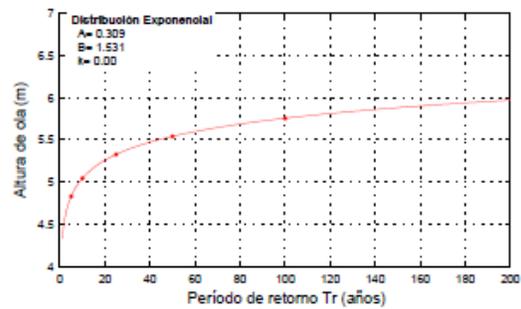
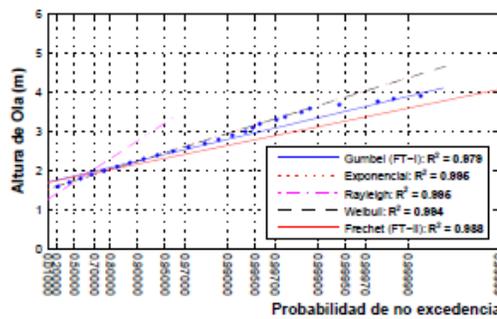
UBICACIÓN



Ubicación: 24.6888° N; 112.3138° O
 Profundidad: 100 m respecto al N. B. M. I.

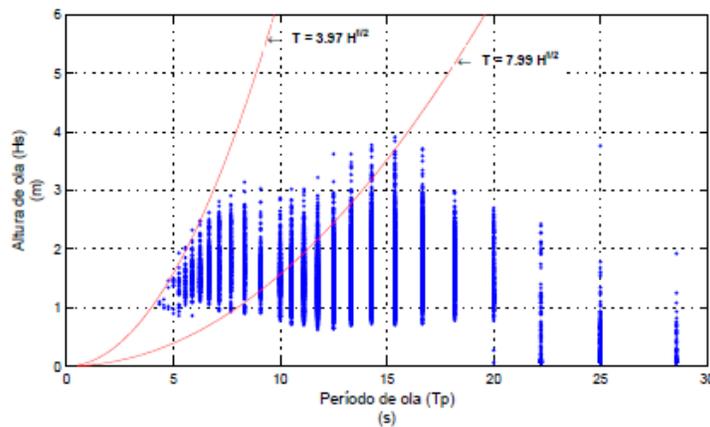


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: SAN CARLOS, B. C. S.	

Figura 3.6 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de San Carlos, B. C. S.

3.4 Cabo San Lucas B. C. S.

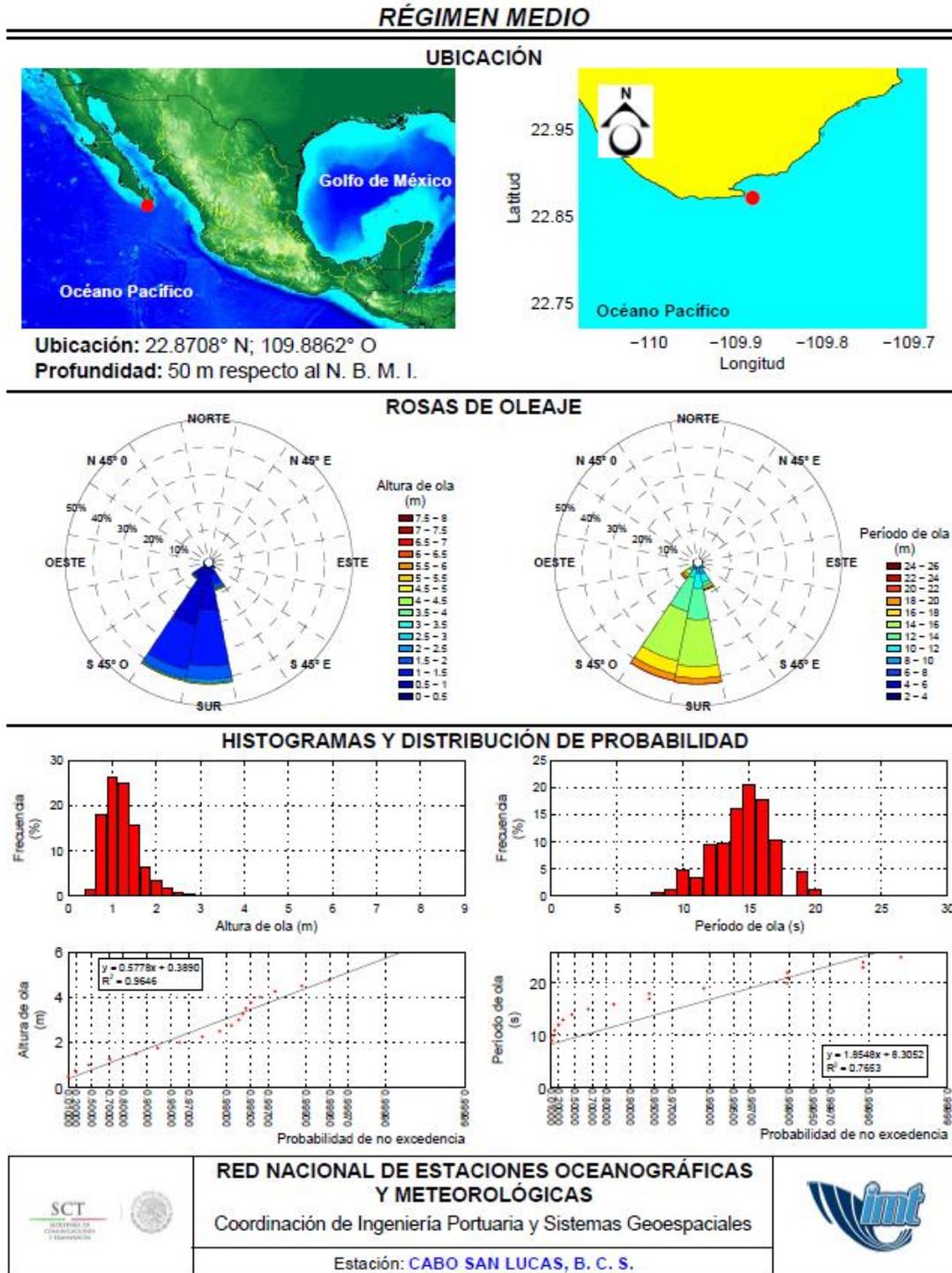


Figura 3.7 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Cabo San Lucas, B. C. S.

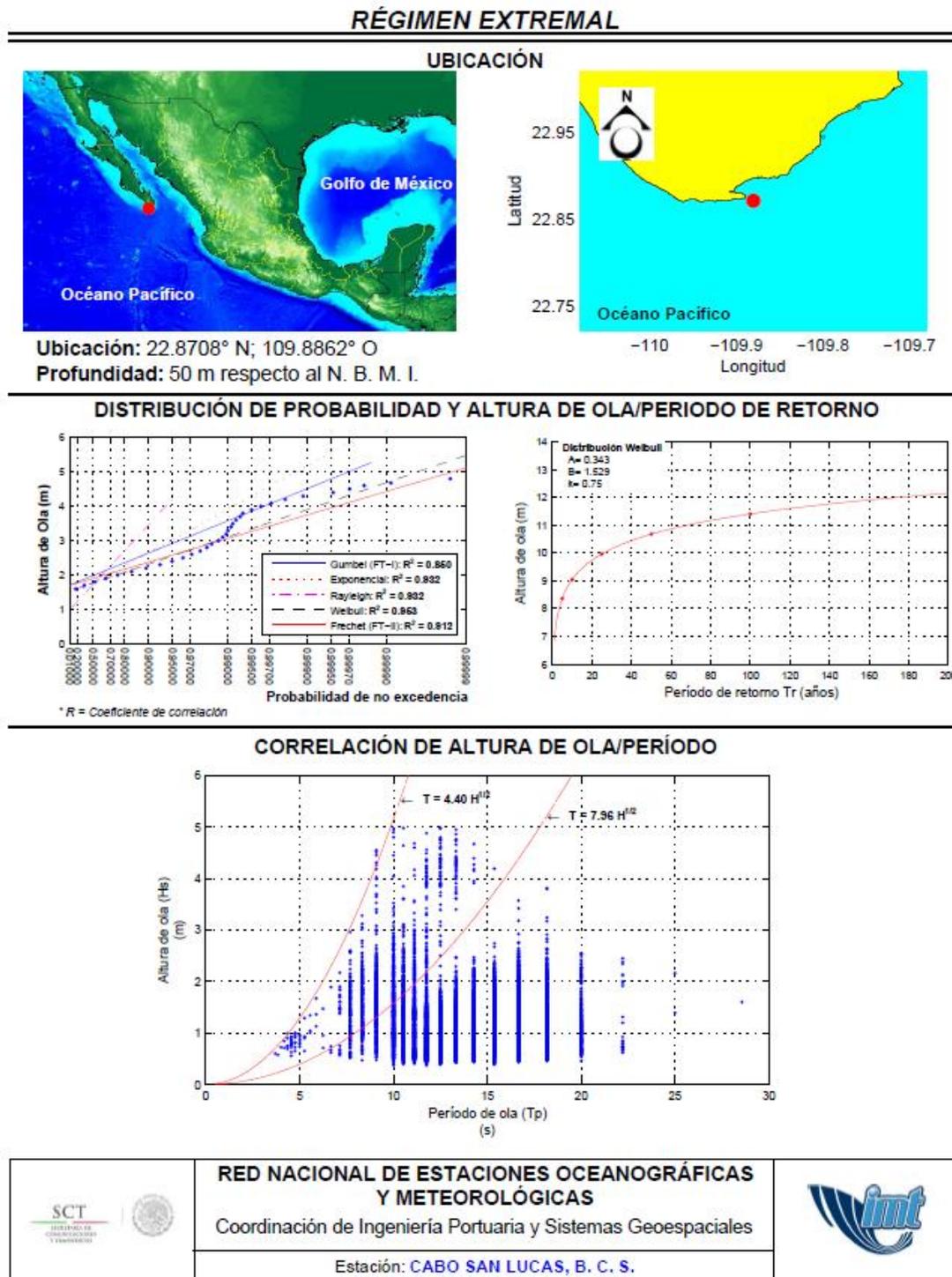


Figura 3.8 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Cabo San Lucas, B. C. S.

3.5 Mazatlán Sin.

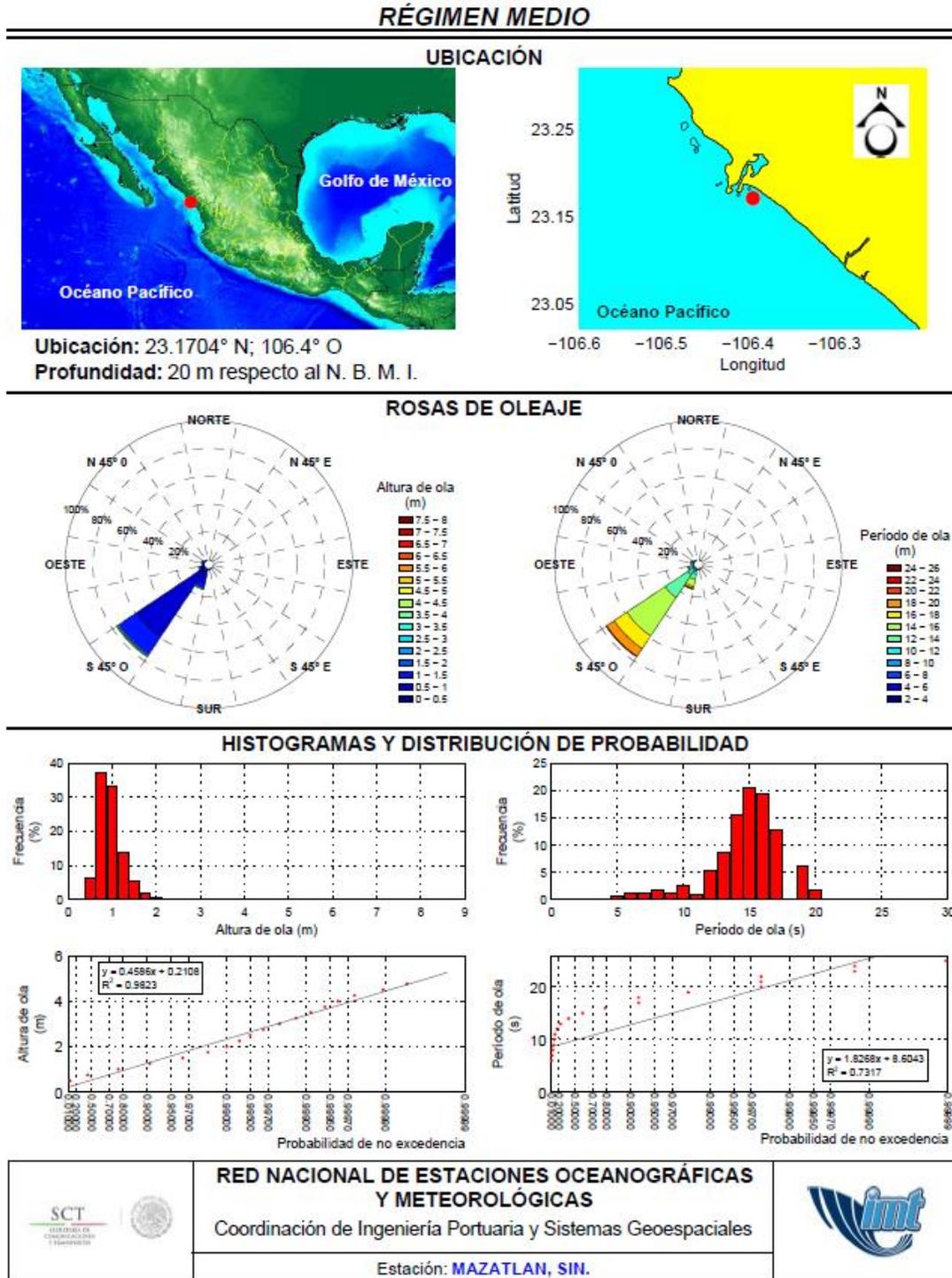
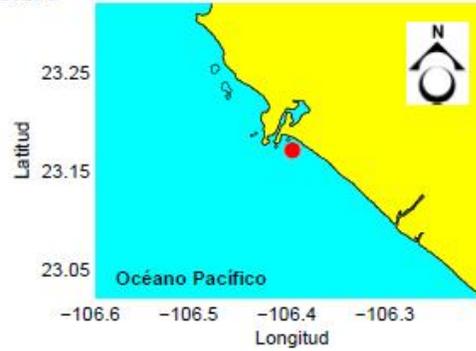


Figura 3.9 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Mazatlán, Sin.

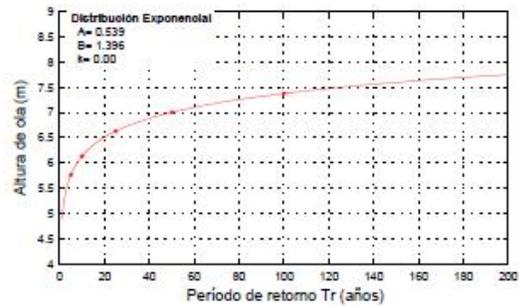
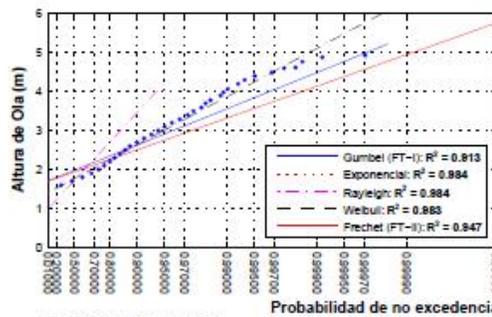
RÉGIMEN EXTREMAL

UBICACIÓN



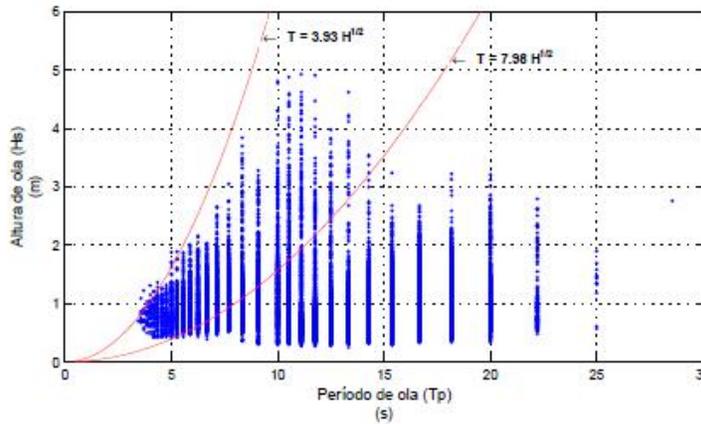
Ubicación: 23.1704° N; 106.4° O
 Profundidad: 20 m respecto al N. B. M. I.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: MAZATLAN, SIN.	

Figura 3.10 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Mazatlán, Sin.

3.6 Puerto Vallarta Jal.

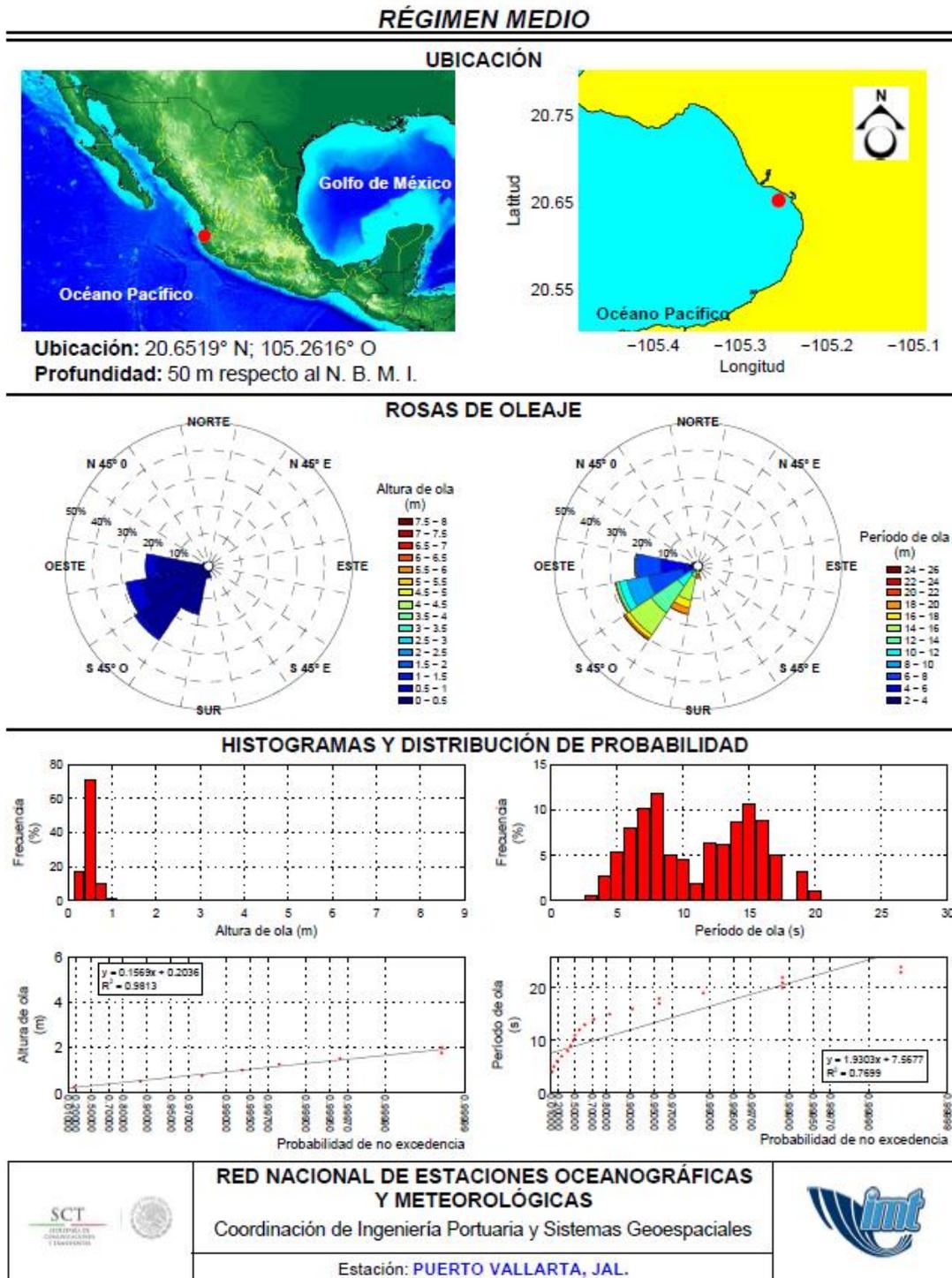
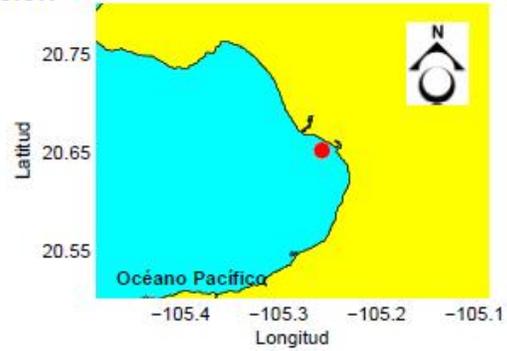


Figura 3.11 Caracterización del oleaje medio para Puerto Vallarta, Jal.

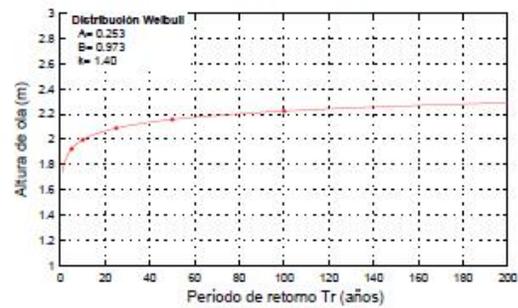
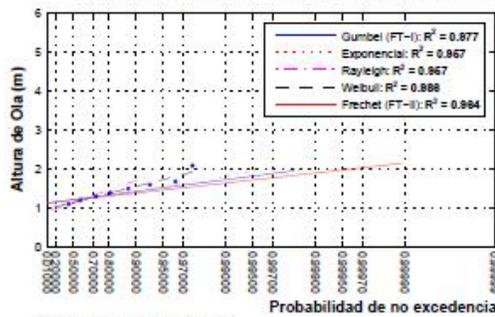
RÉGIMEN EXTREMAL

UBICACIÓN



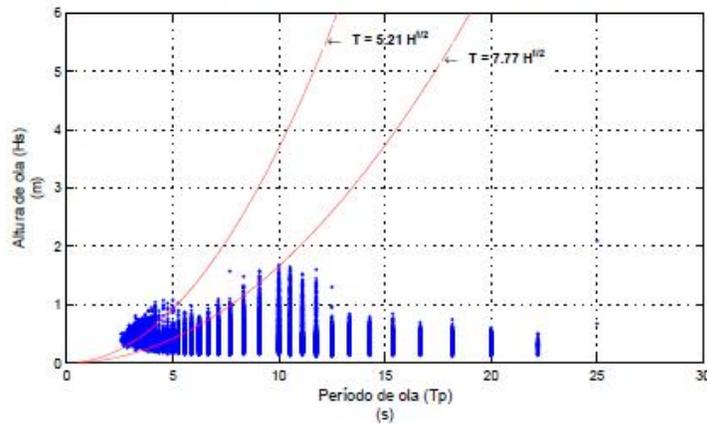
Ubicación: 20.6519° N; 105.2616° O
 Profundidad: 50 m respecto al N. B. M. I.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



*R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: PUERTO VALLARTA, JAL.	

Figura 3.12 Caracterización del oleaje extremo para Puerto Vallarta, Jal.

3.7 Manzanillo Col.

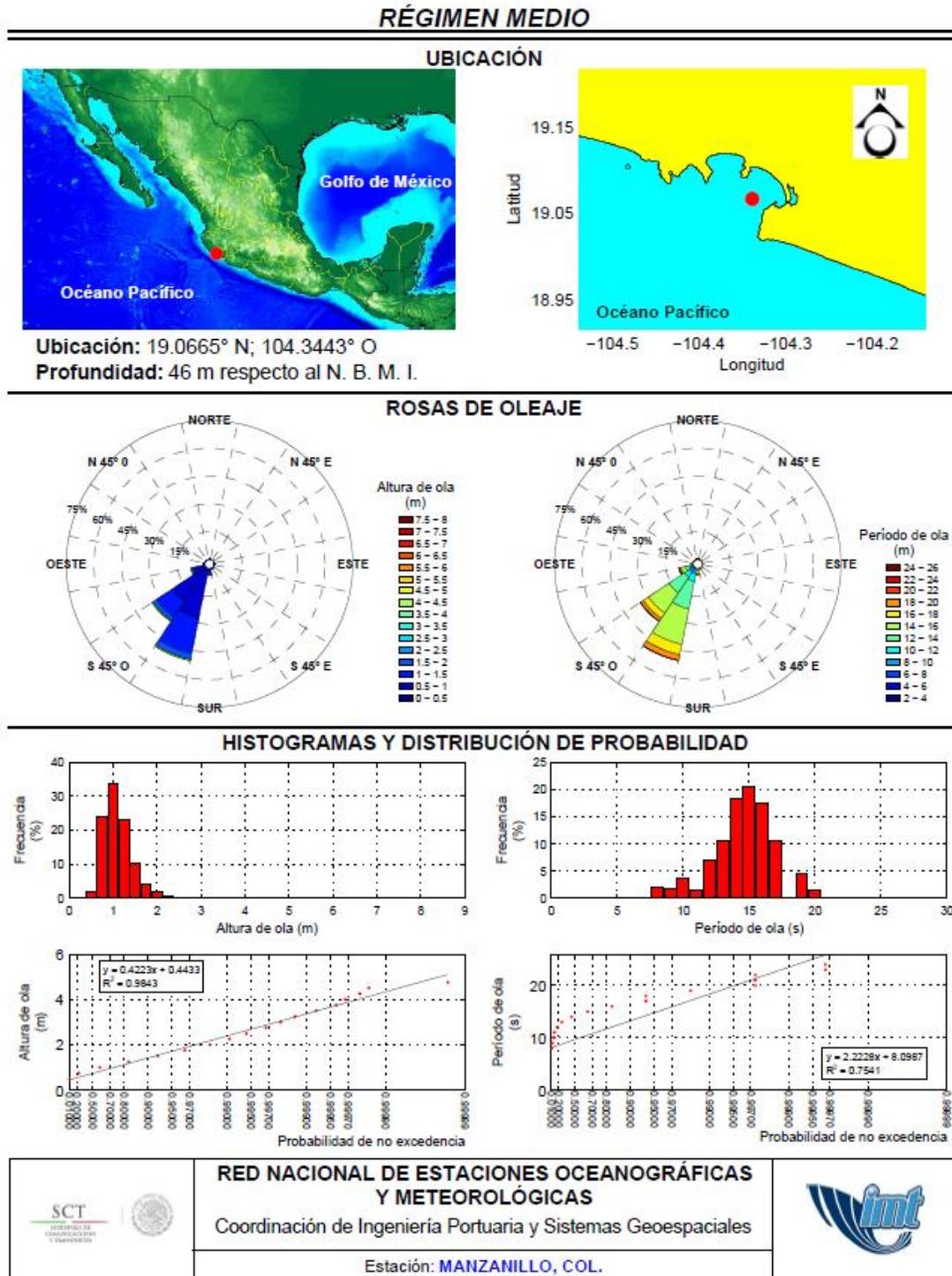


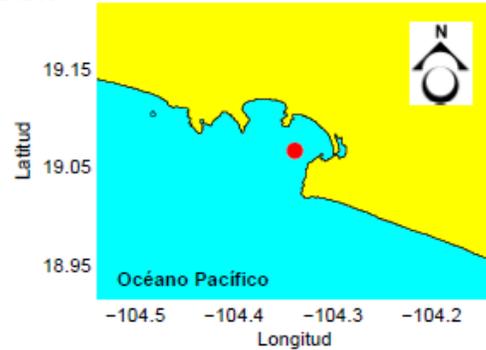
Figura 3.13 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Manzanillo, Col.

RÉGIMEN EXTREMAL

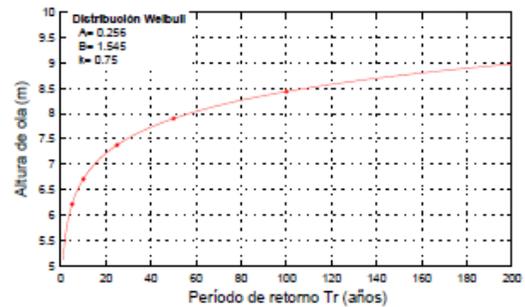
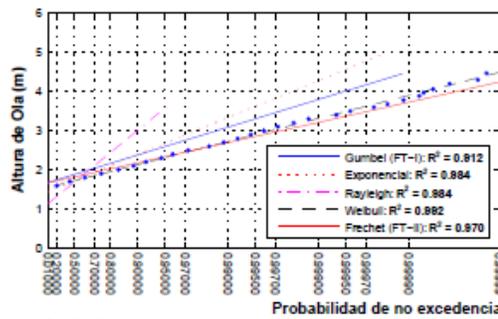
UBICACIÓN



Ubicación: 19.0665° N; 104.3443° O
 Profundidad: 46 m respecto al N. B. M. I.

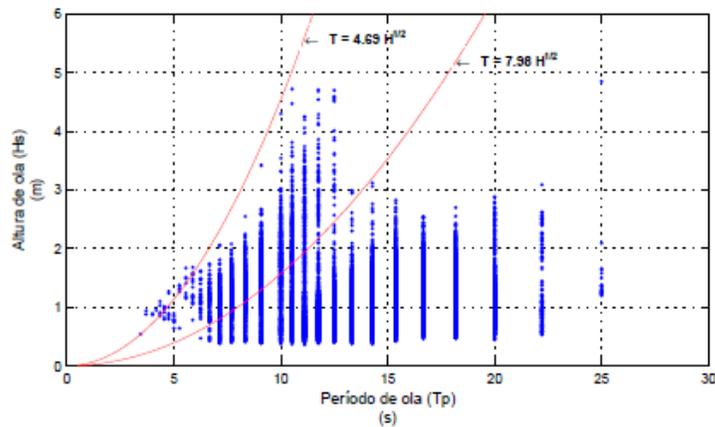


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 SECRETARÍA DE COMERCIO Y FOMENTO	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
Estación: MANZANILLO, COL.		

Figura 3.14 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Manzanillo, Col.

3.8 Cuyutlán Col.

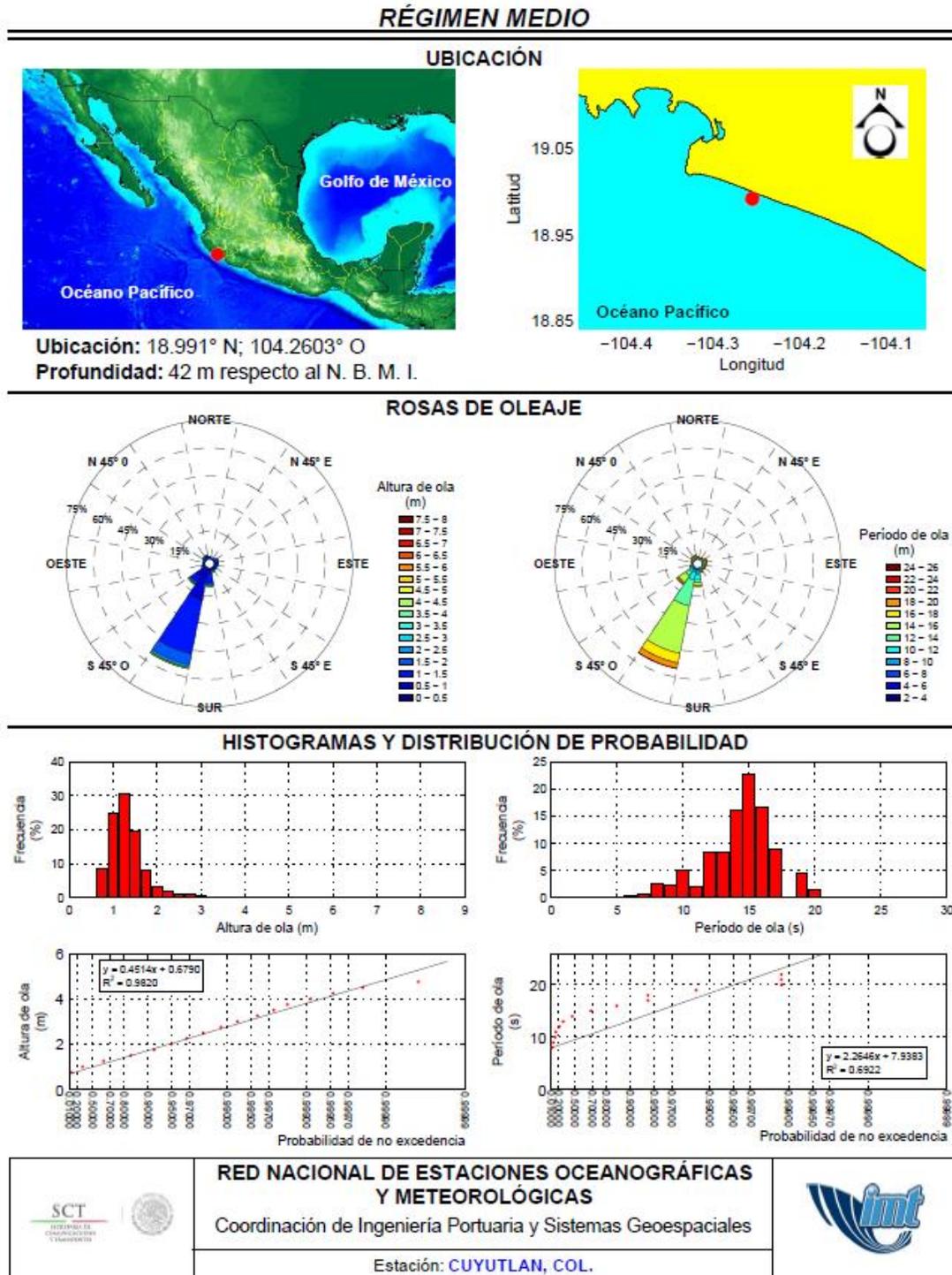


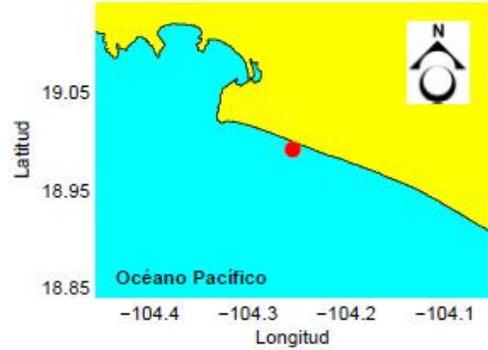
Figura 3.15 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Cuyutlán, Col.

RÉGIMEN EXTREMAL

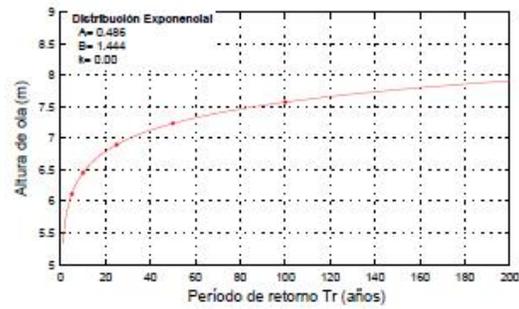
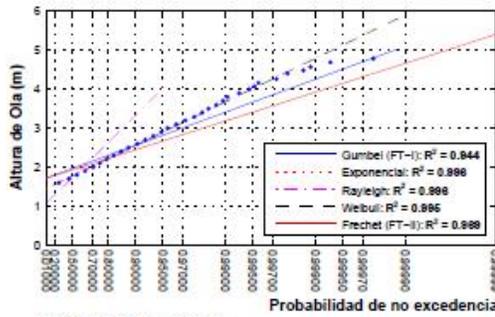
UBICACIÓN



Ubicación: 18.991° N; 104.2603° O
 Profundidad: 42 m respecto al N. B. M. I.

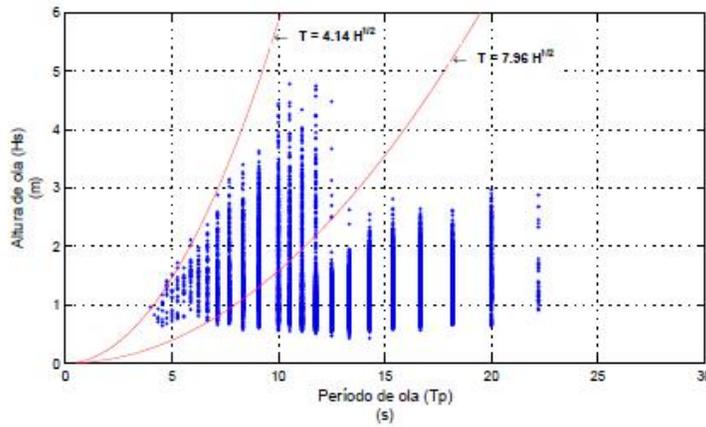


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



 	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales</p> <p>Estación: CUYUTLAN, COL.</p>	
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

Figura 3.16 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Cuyutlán, Col.

3.9 Lázaro Cárdenas Mich.

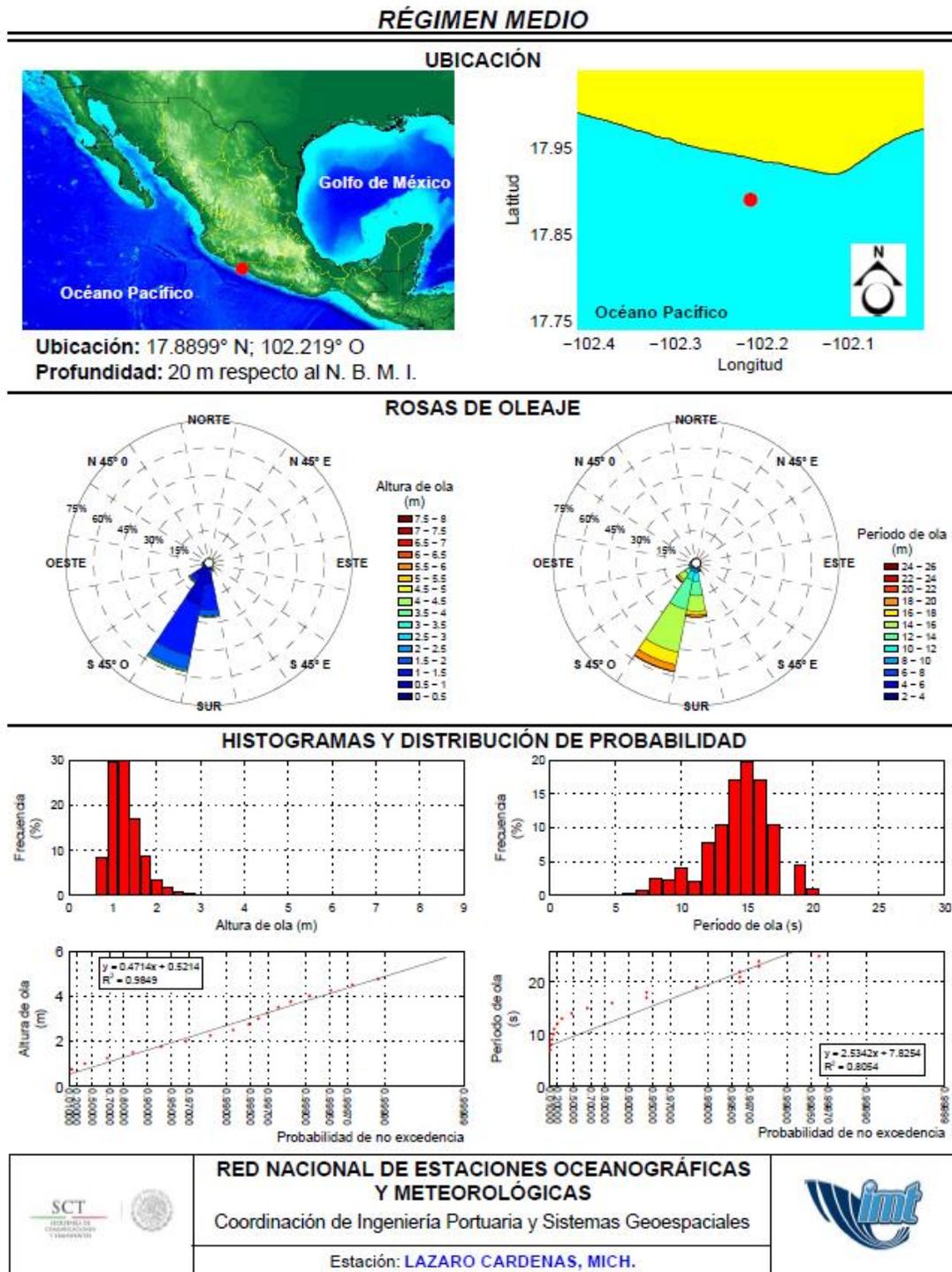


Figura 3.17 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.

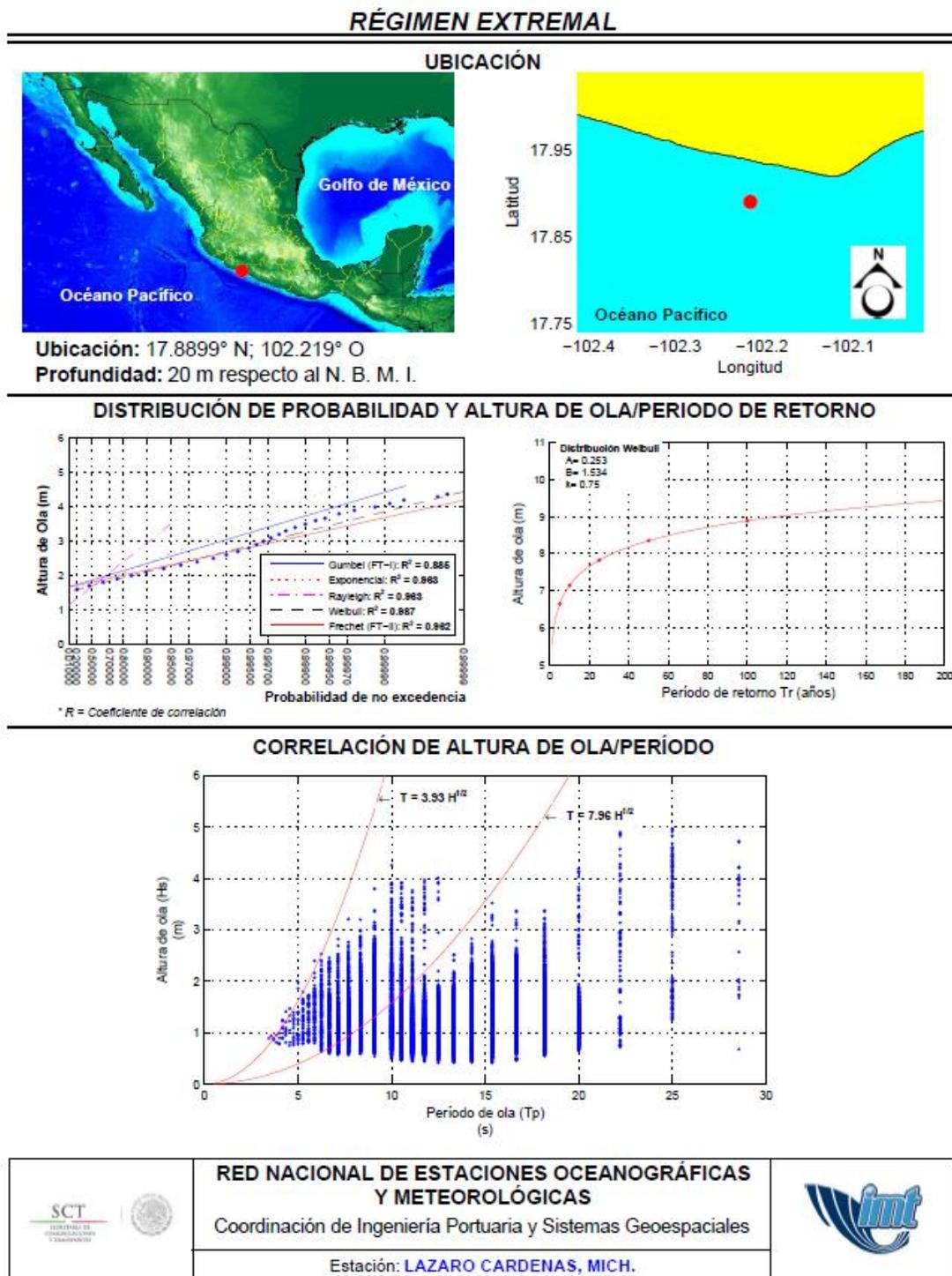


Figura 3.18 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Lázaro Cárdenas, Mich.

3.10 Acapulco Gro.

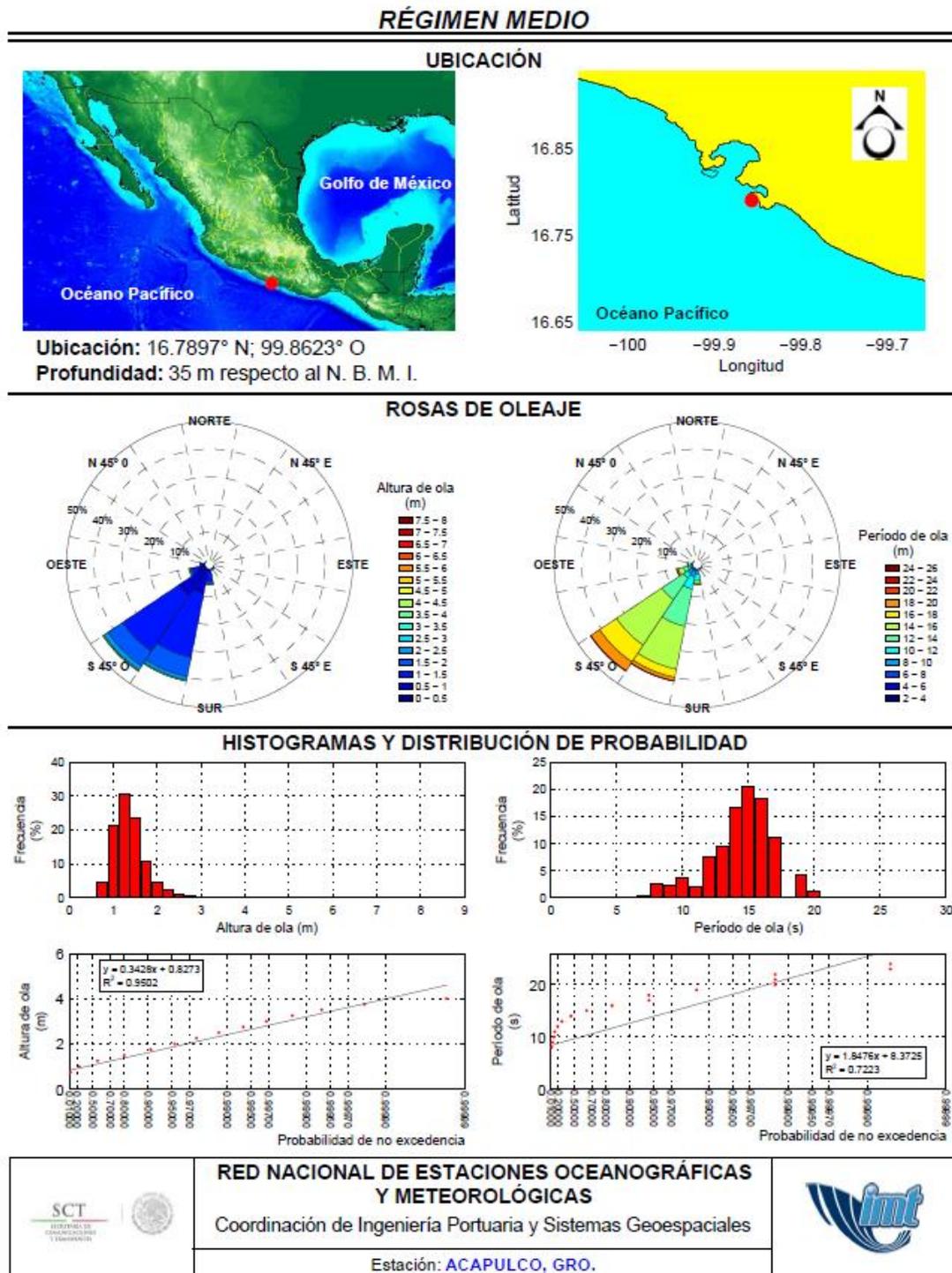


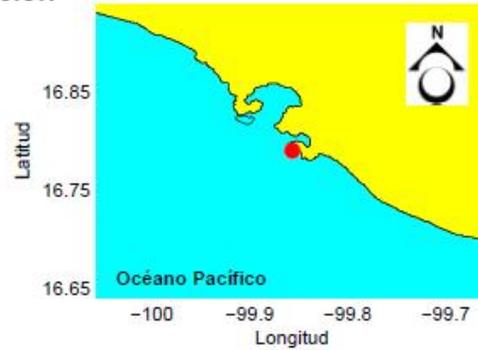
Figura 3.19 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Acapulco, Gro.

RÉGIMEN EXTREMAL

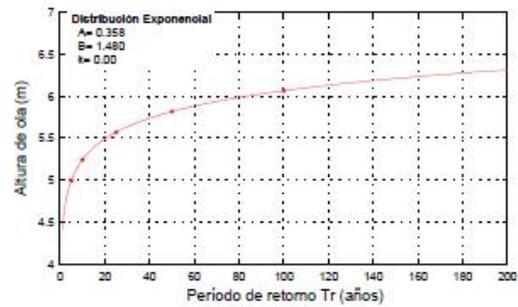
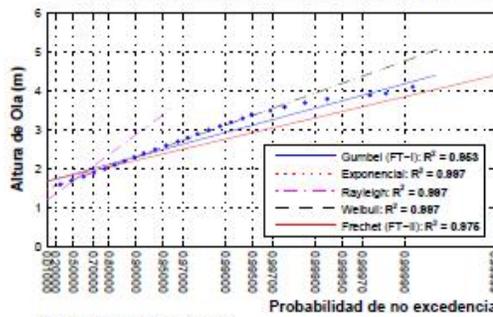
UBICACIÓN



Ubicación: 16.7897° N; 99.8623° O
 Profundidad: 35 m respecto al N. B. M. I.

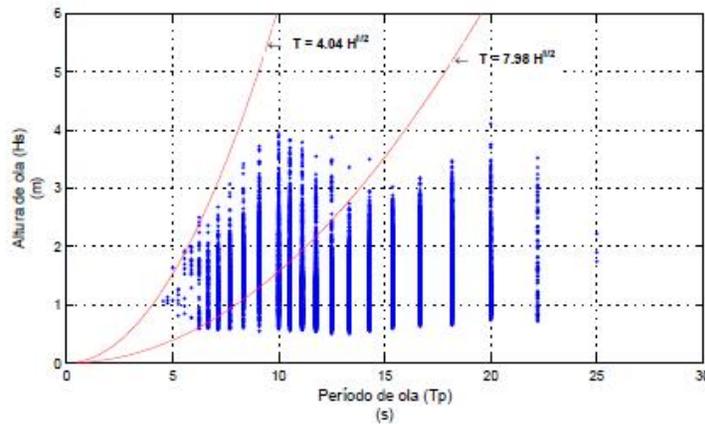


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: ACAPULCO, GRO.	

Figura 3.20 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Acapulco, Gro.

3.11 Huatulco Oax.

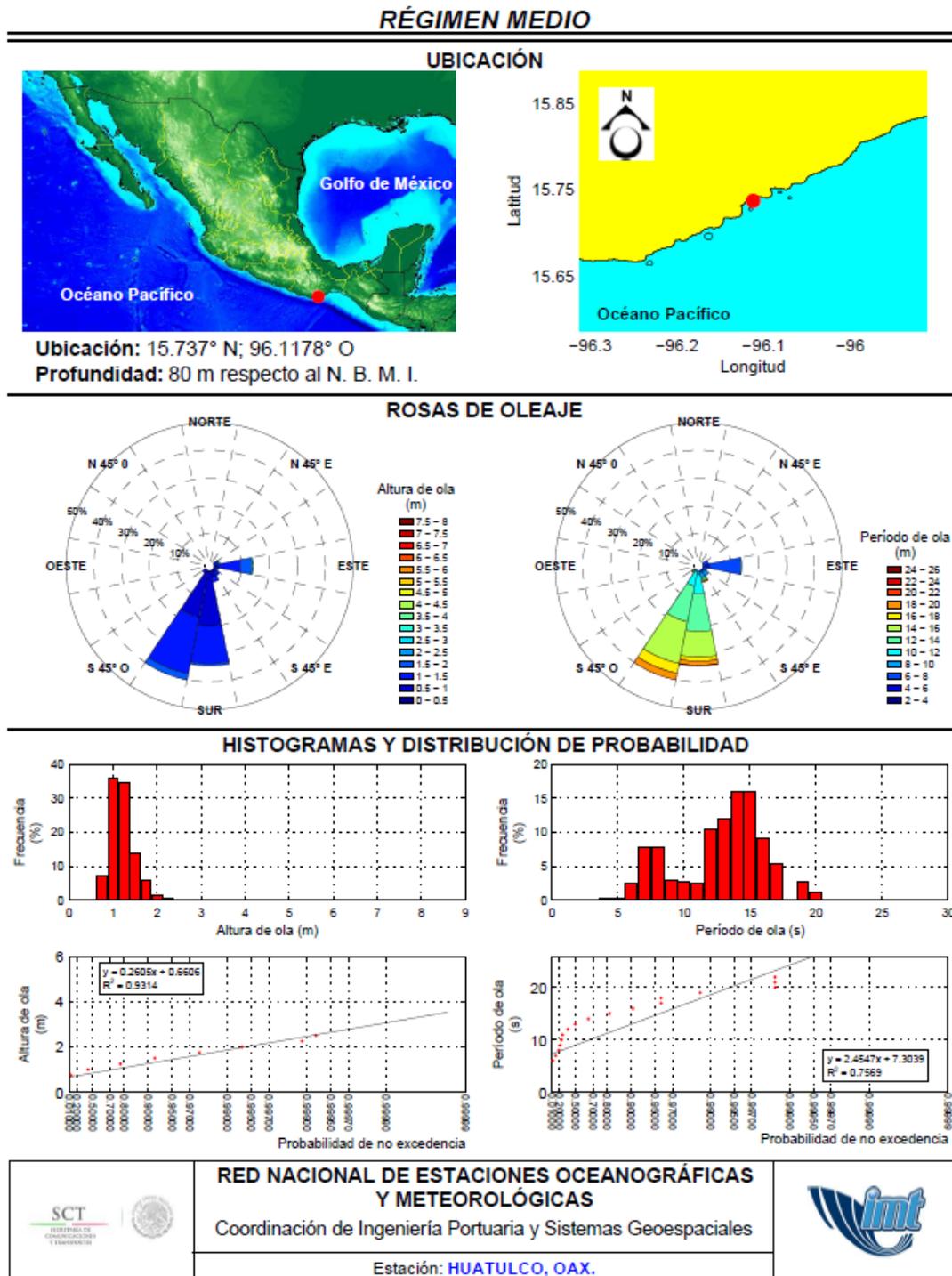
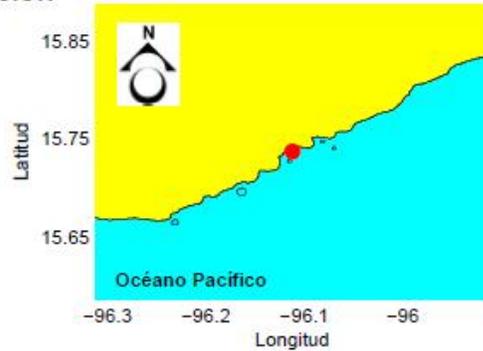


Figura 3.21 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Huatulco, Oax.

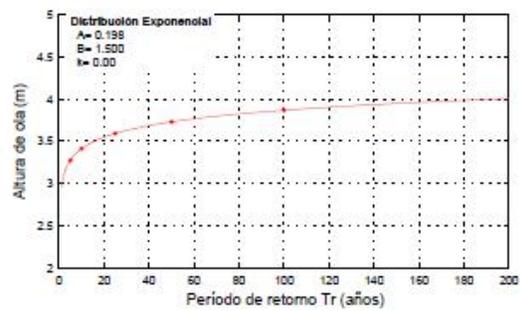
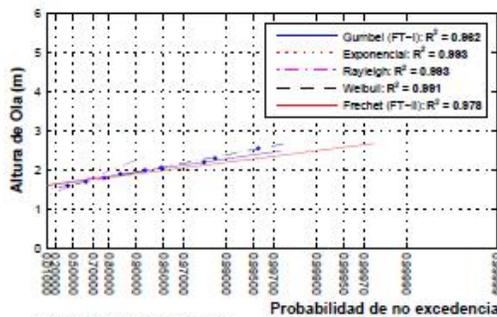
RÉGIMEN EXTREMAL

UBICACIÓN



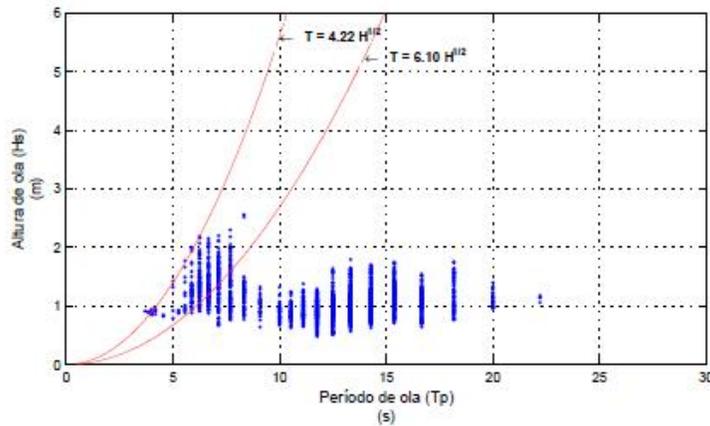
Ubicación: 15.737° N; 96.1178° O
Profundidad: 80 m respecto al N. B. M. I.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERÍODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



 	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: HUATULCO, OAX.	

Figura 3.22 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Huatulco, Oax.

3.12 Salina Cruz Oax.

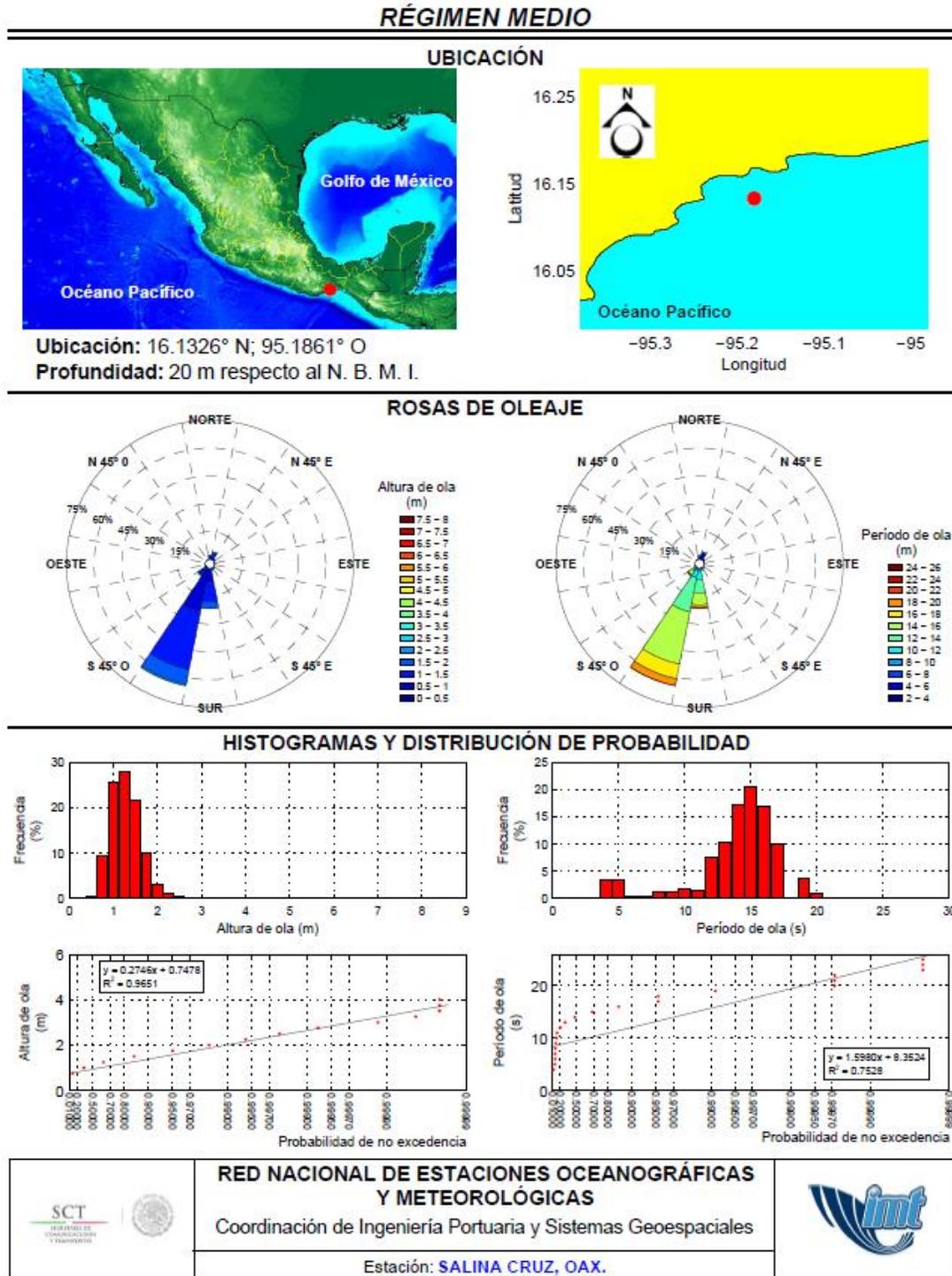
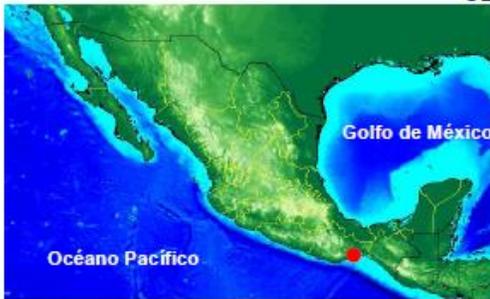


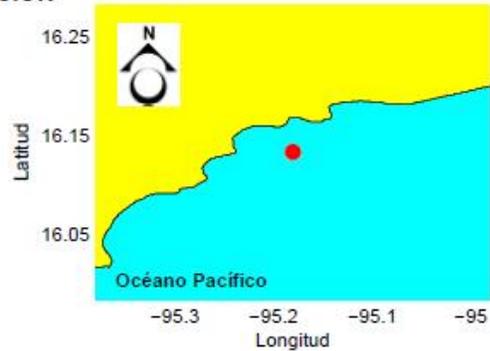
Figura 3.23 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Salina Cruz, Oax.

RÉGIMEN EXTREMAL

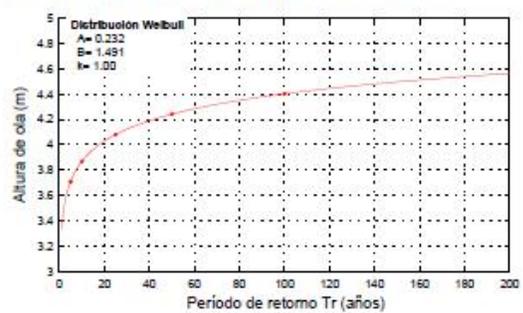
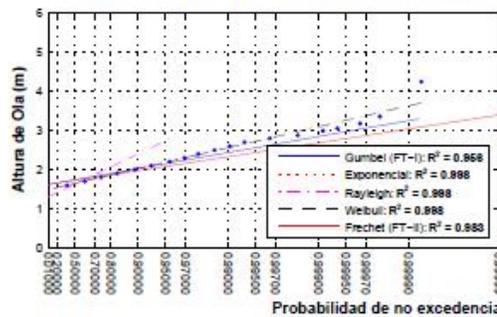
UBICACIÓN



Ubicación: 16.1326° N; 95.1861° O
 Profundidad: 20 m respecto al N. B. M. I.

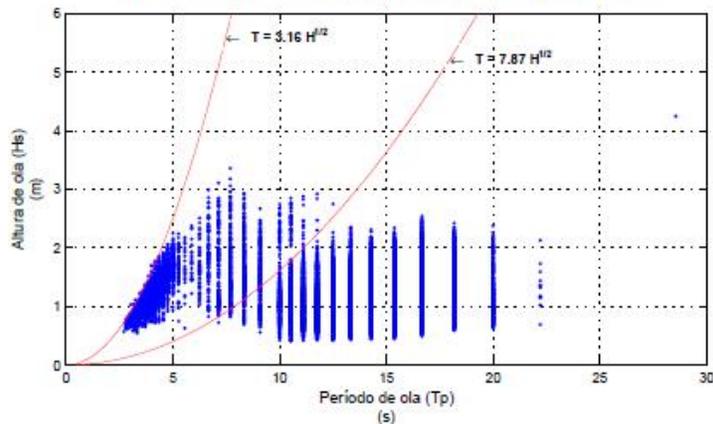


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 SCT SECRETARÍA DE COMERCIO Y TRANSPORTES	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales Estación: SALINA CRUZ, OAX.	
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

Figura 3.24 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Salina Cruz, Oax.

3.13 Puerto Chiapas Chis.

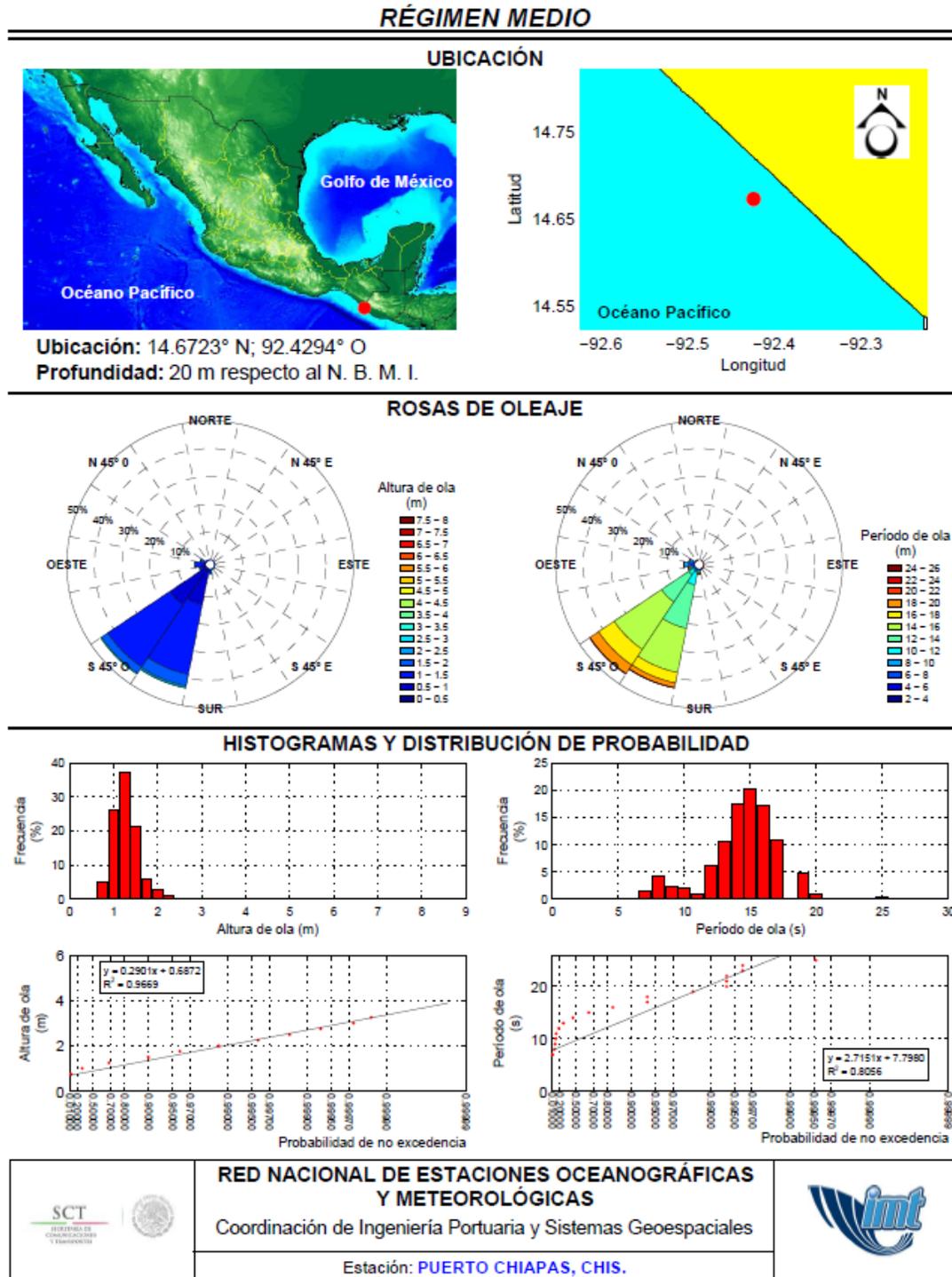


Figura 3.25 Caracterización del oleaje medio para Puerto Chiapas, Chis.

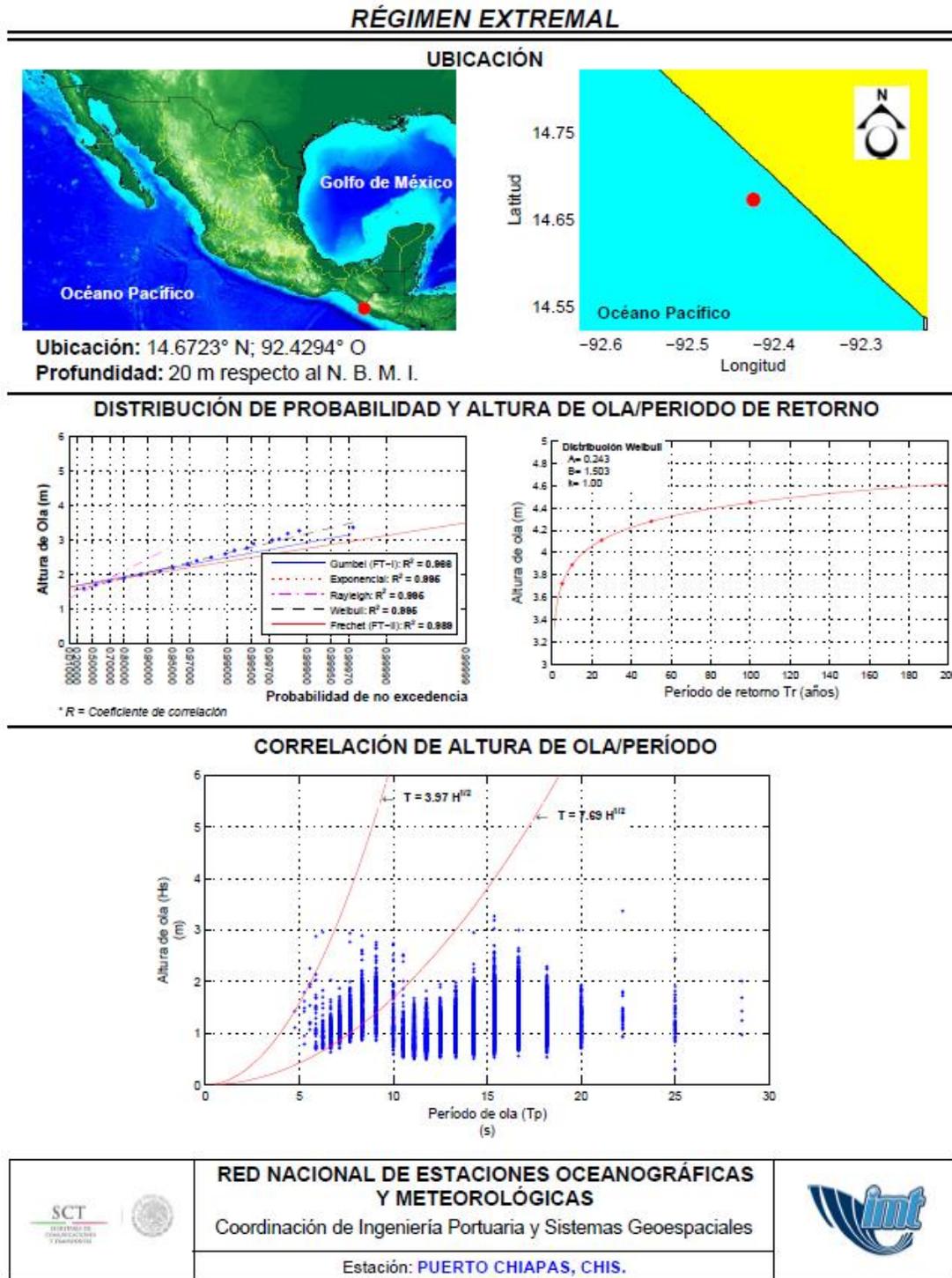


Figura 3.26 Caracterización del oleaje extremo para Puerto Chiapas, Chis.

3.14 Loreto B. C. S.

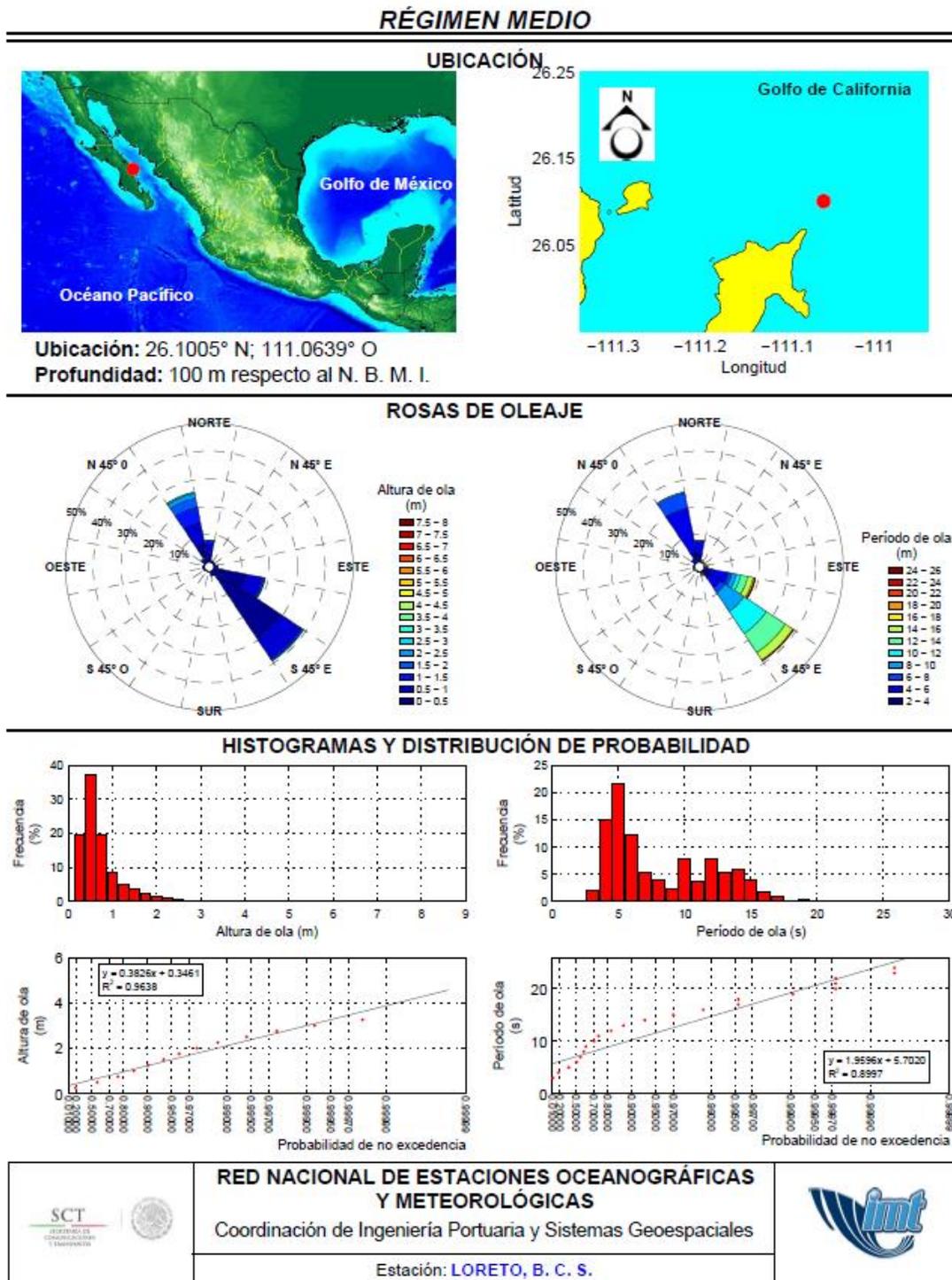
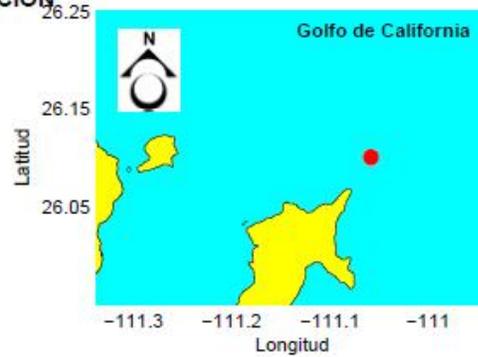


Figura 3.27 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Loreto, B. C. S.

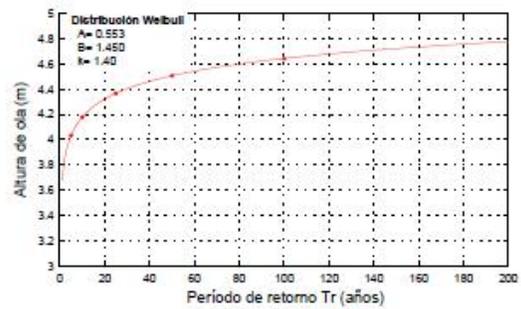
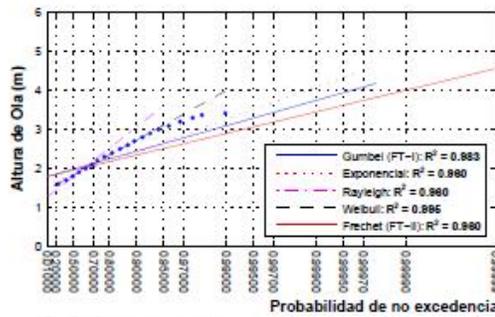
RÉGIMEN EXTREMAL

UBICACIÓN



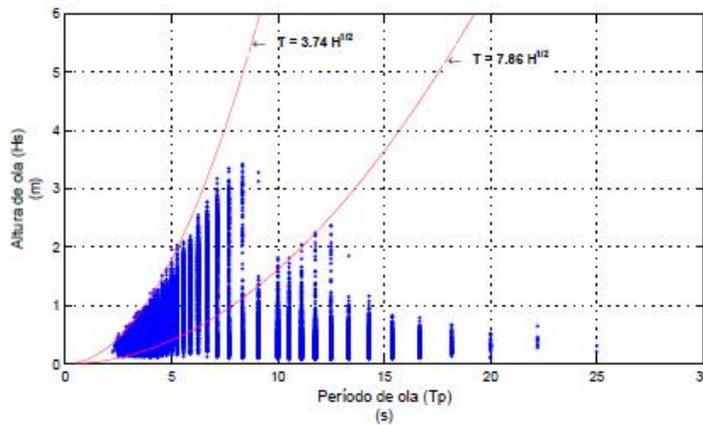
Ubicación: 26.1005° N; 111.0639° O
Profundidad: 100 m respecto al N. B. M. I.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales</p>	
Estación: LORETO, B. C. S.		

Figura 3.28 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Loreto, B. C. S.

3.15 Puerto Peñasco Son.

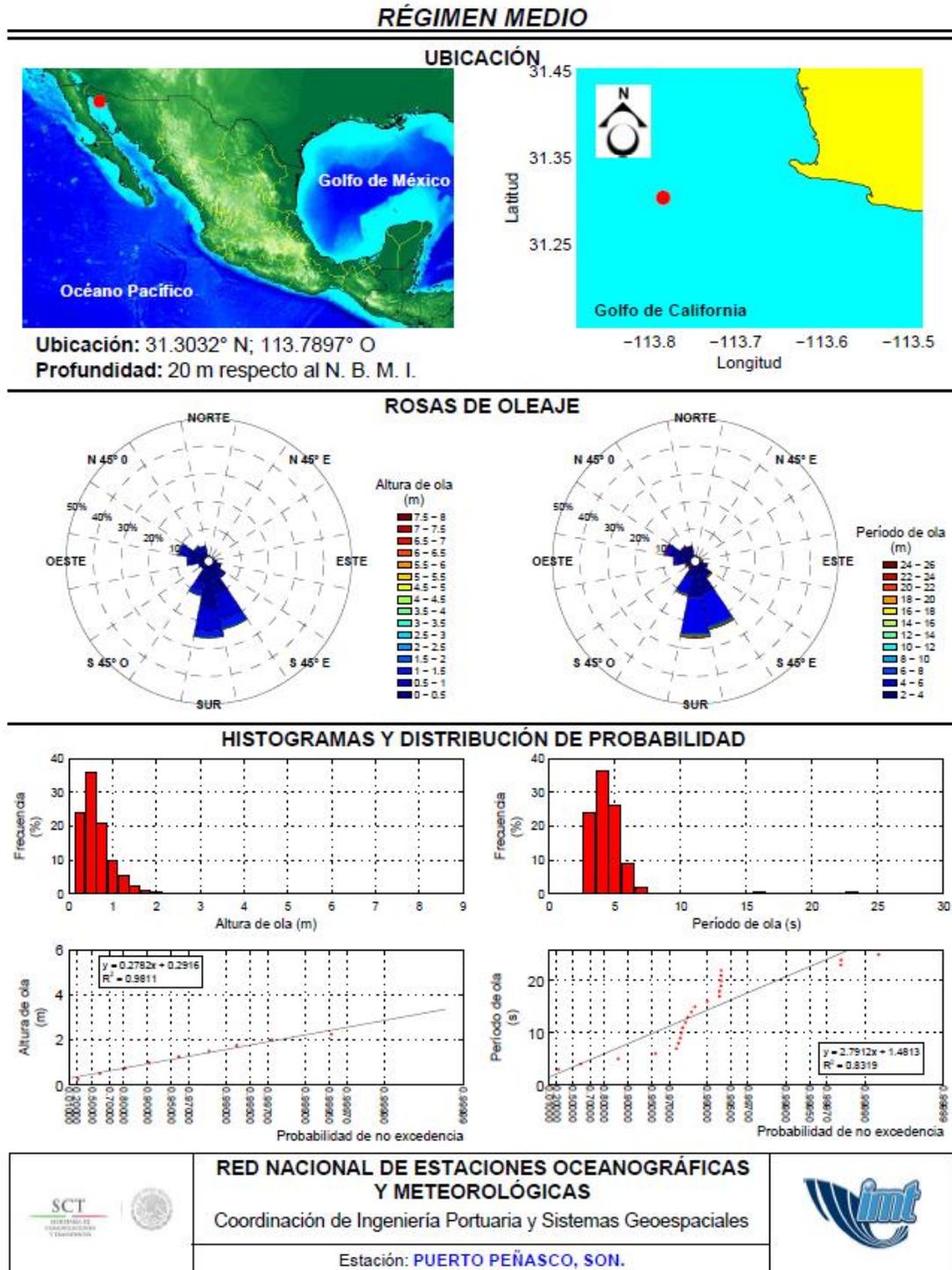
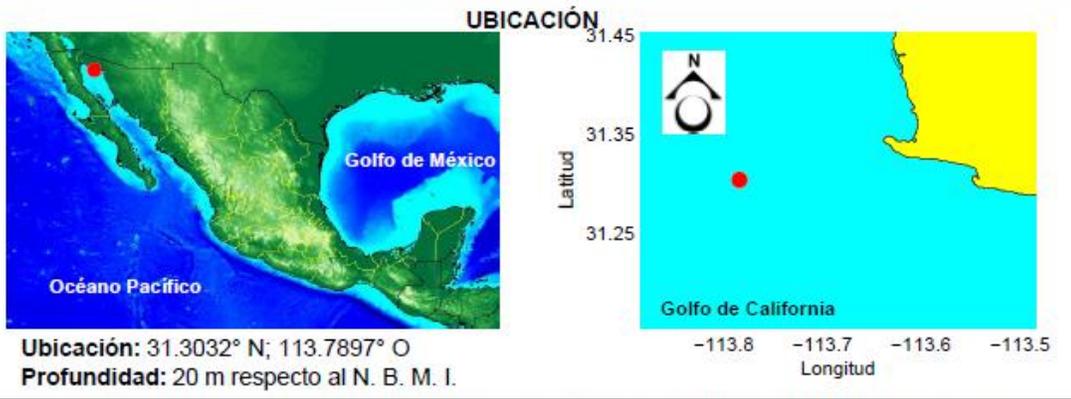
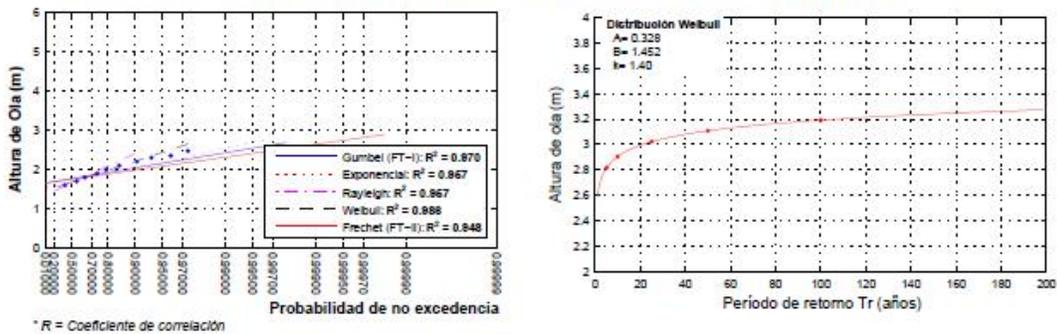


Figura 3.29 Caracterización del oleaje medio para Puerto Peñasco, Son.

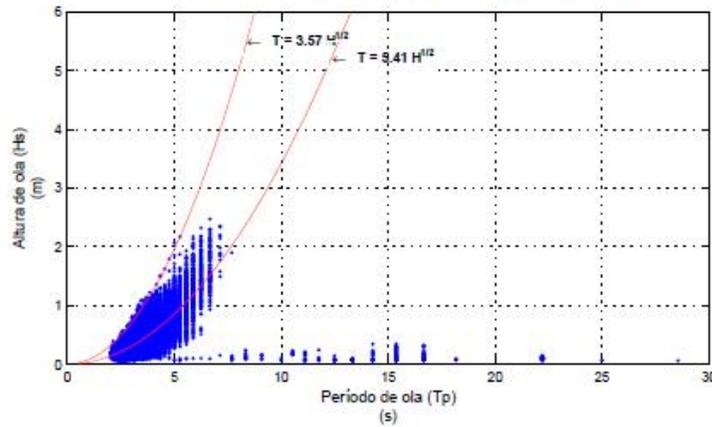
RÉGIMEN EXTREMAL



DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 SCT SECRETARÍA DE COMERCIO Y TRANSPORTES	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS</p> <p>Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales</p> <p>Estación: PUERTO PEÑASCO, SON.</p>	
-------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Figura 3.30 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Peñasco, Son.

3.16 Bahía de Kino Son.

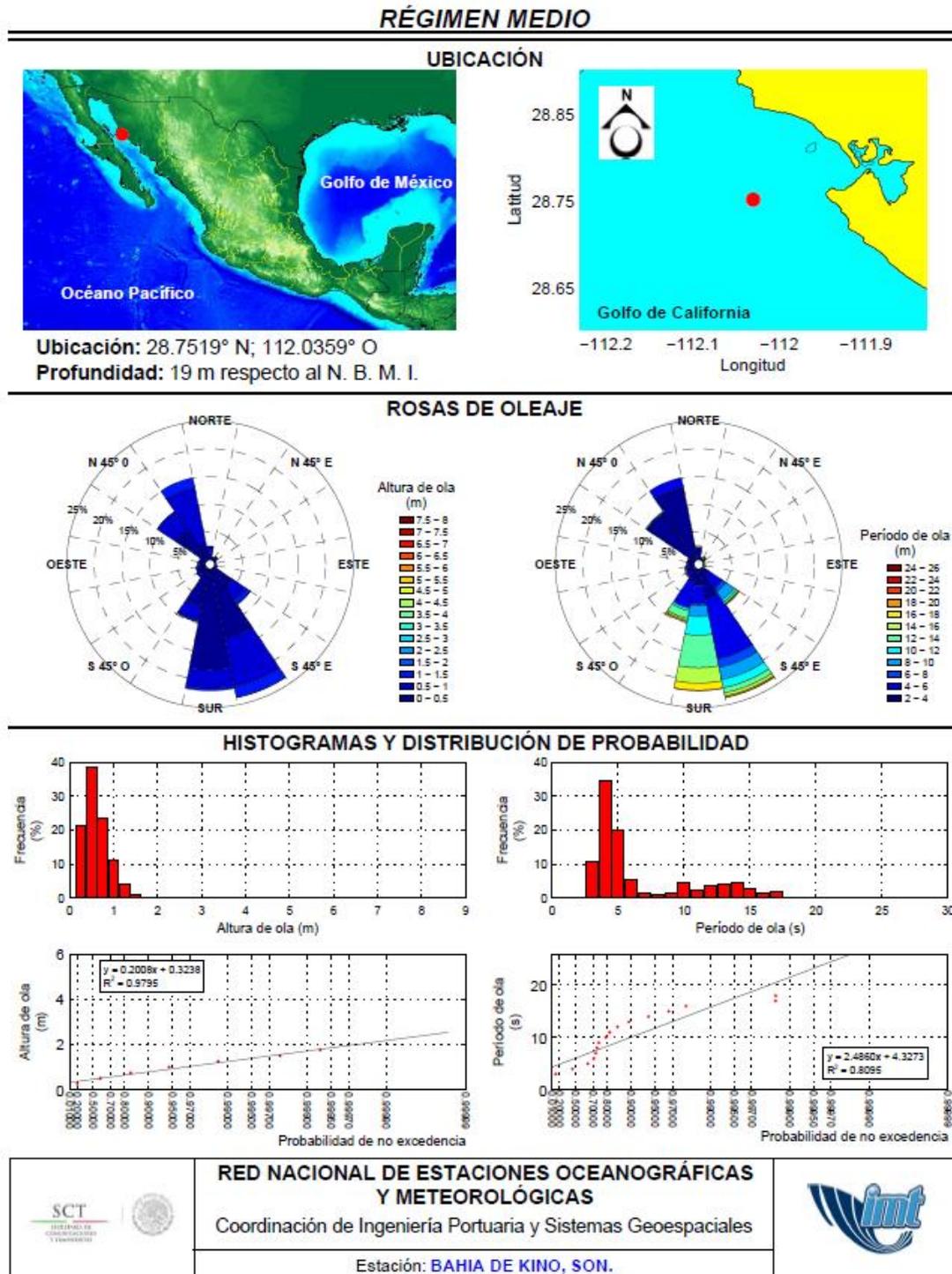


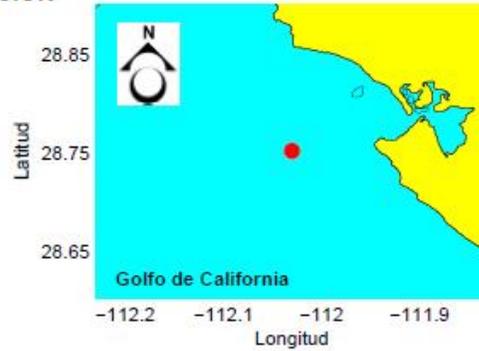
Figura 3.31 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Bahía de Kino, Son.

RÉGIMEN EXTREMAL

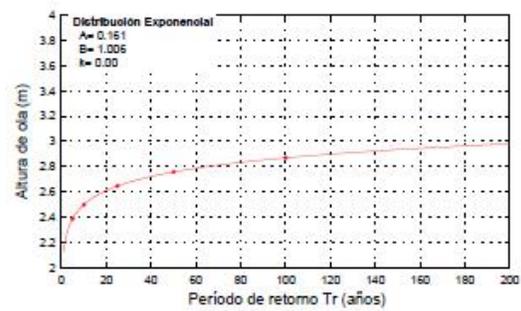
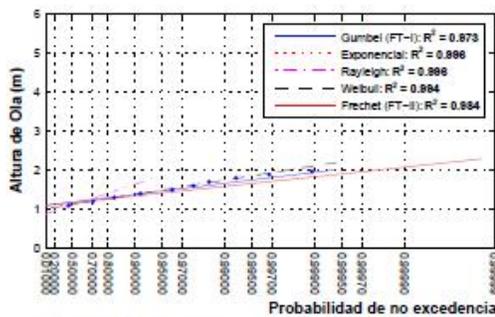
UBICACIÓN



Ubicación: 28.7519° N; 112.0359° O
 Profundidad: 19 m respecto al N. B. M. I.

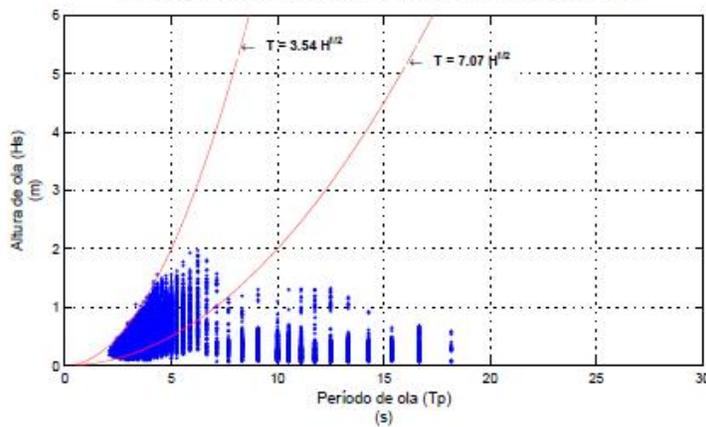


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales Estación: BAHÍA DE KINO, SON.	
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Figura 3.32 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Bahía de Kino, Son.

3.17 Guaymas Son.

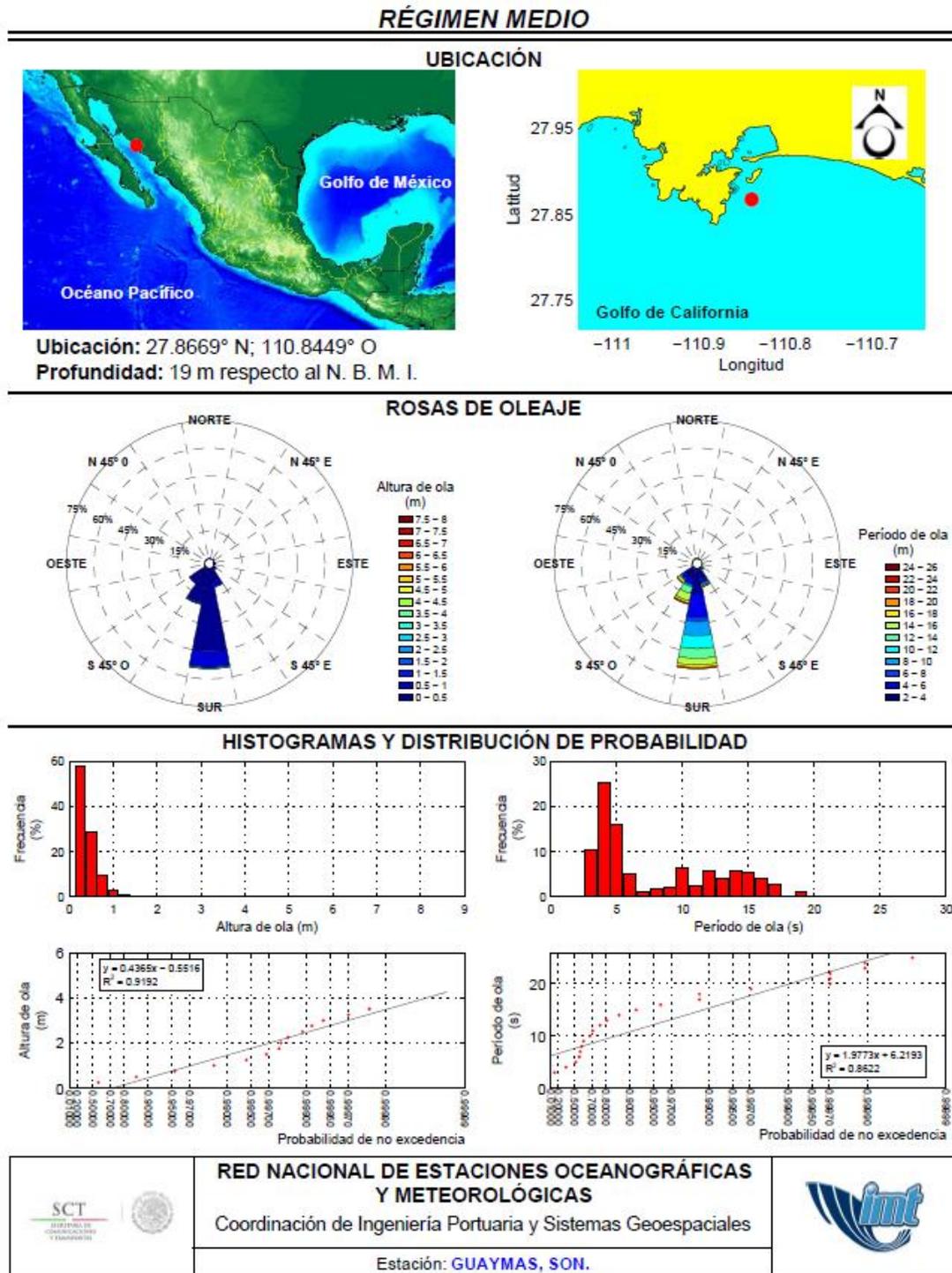


Figura 3.33 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Guaymas, Son.

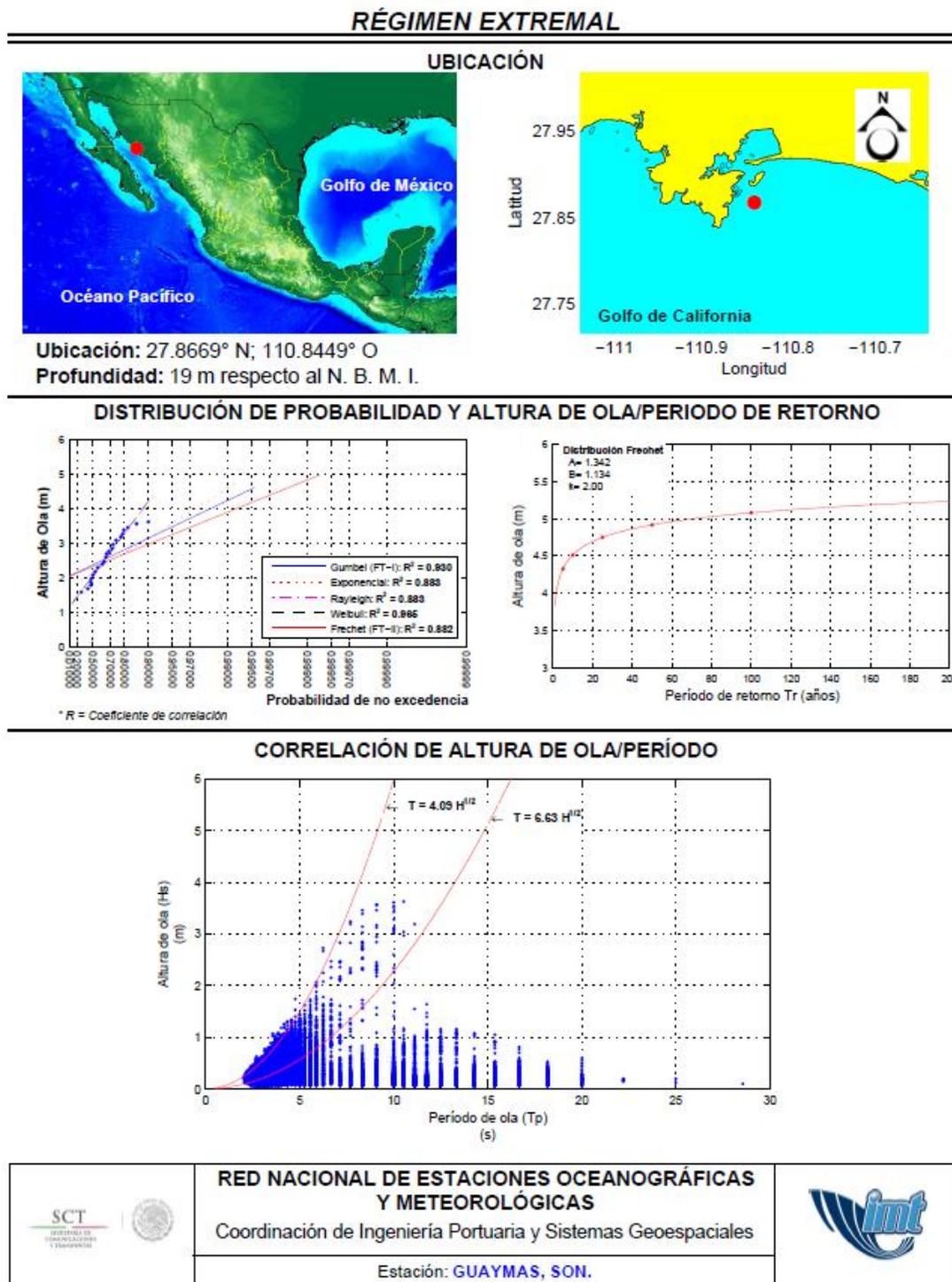


Figura 3.34 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Guaymas, Son.

3.18 Yavaros Son.

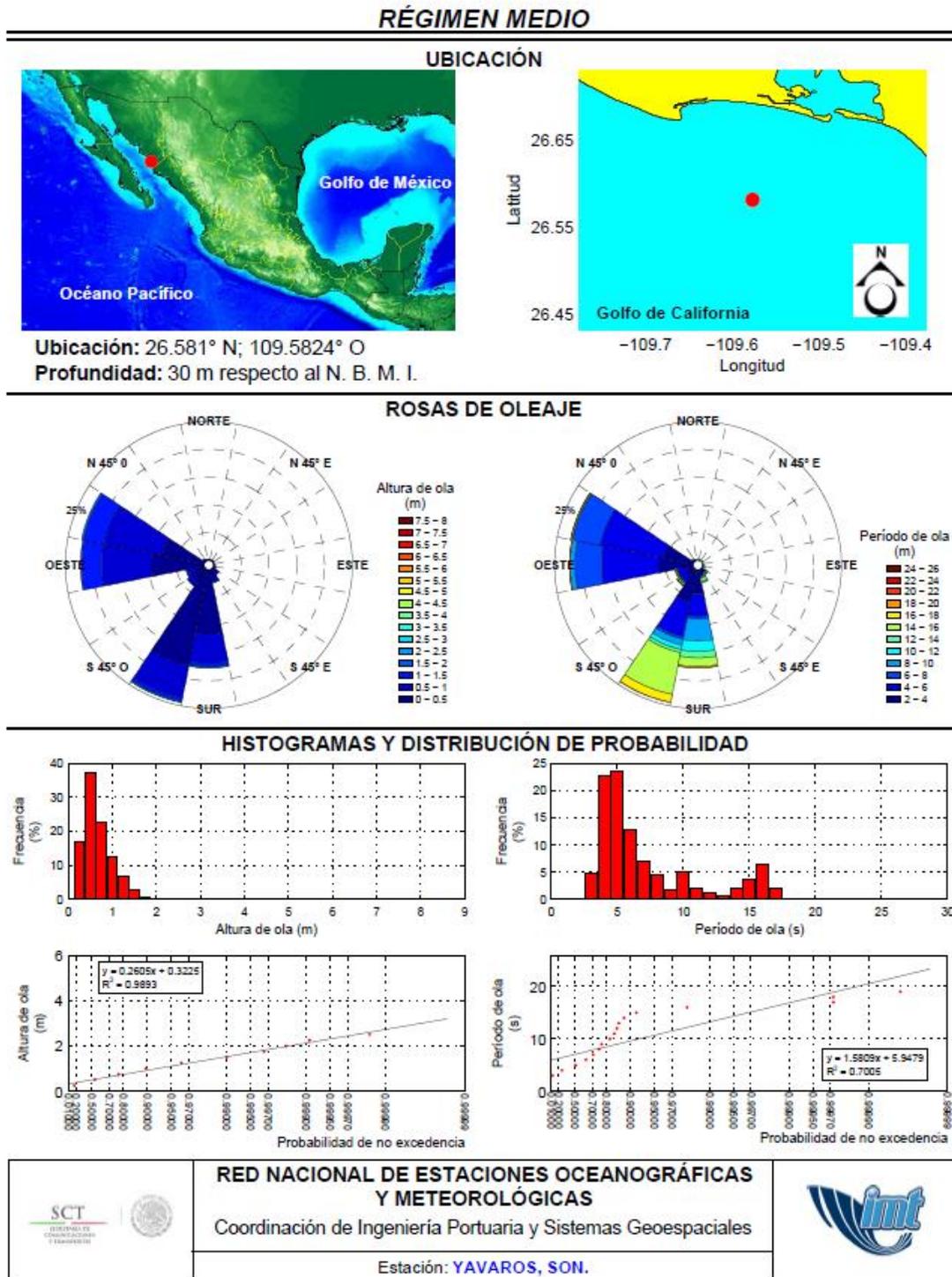


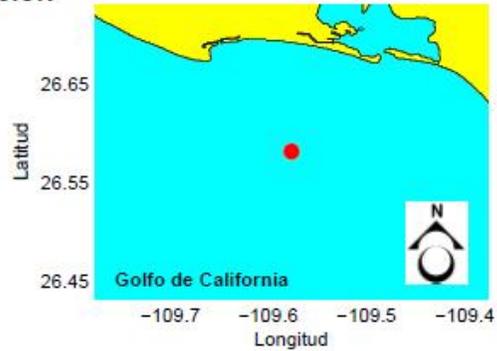
Figura 3.35 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Yavaros, Son.

RÉGIMEN EXTREMAL

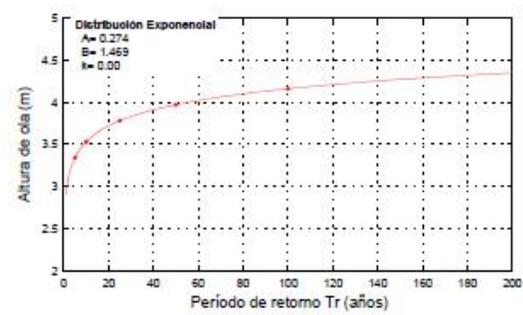
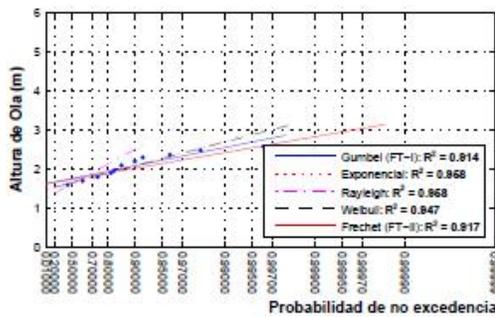
UBICACIÓN



Ubicación: 26.581° N; 109.5824° O
 Profundidad: 30 m respecto al N. B. M. I.

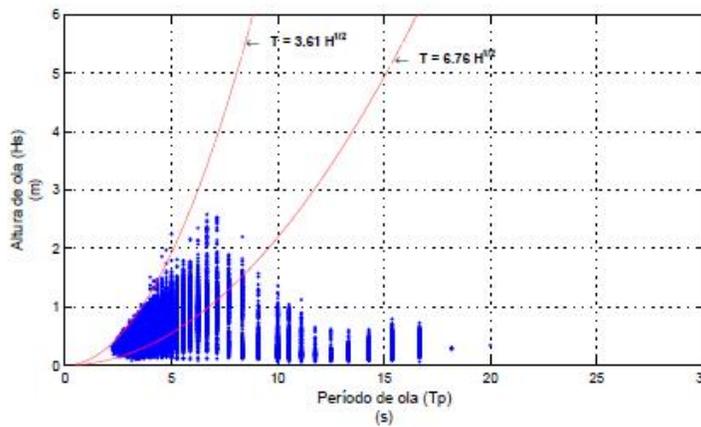


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales Estación: YAVAROS, SON.	
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Figura 3.36 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Yavaros, Son.

3.19 Topolobampo Son.

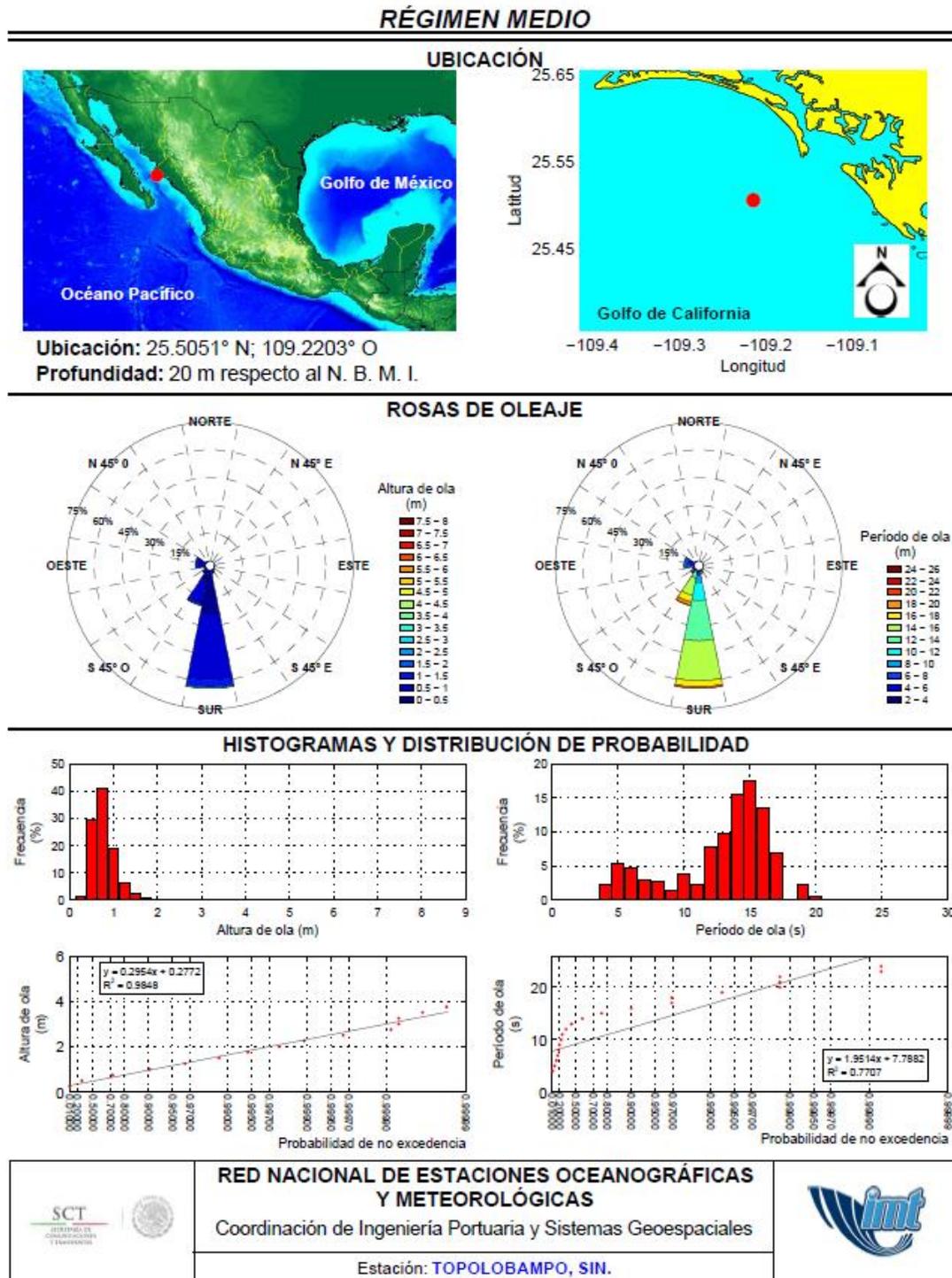


Figura 3.37 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Topolobampo, Son.

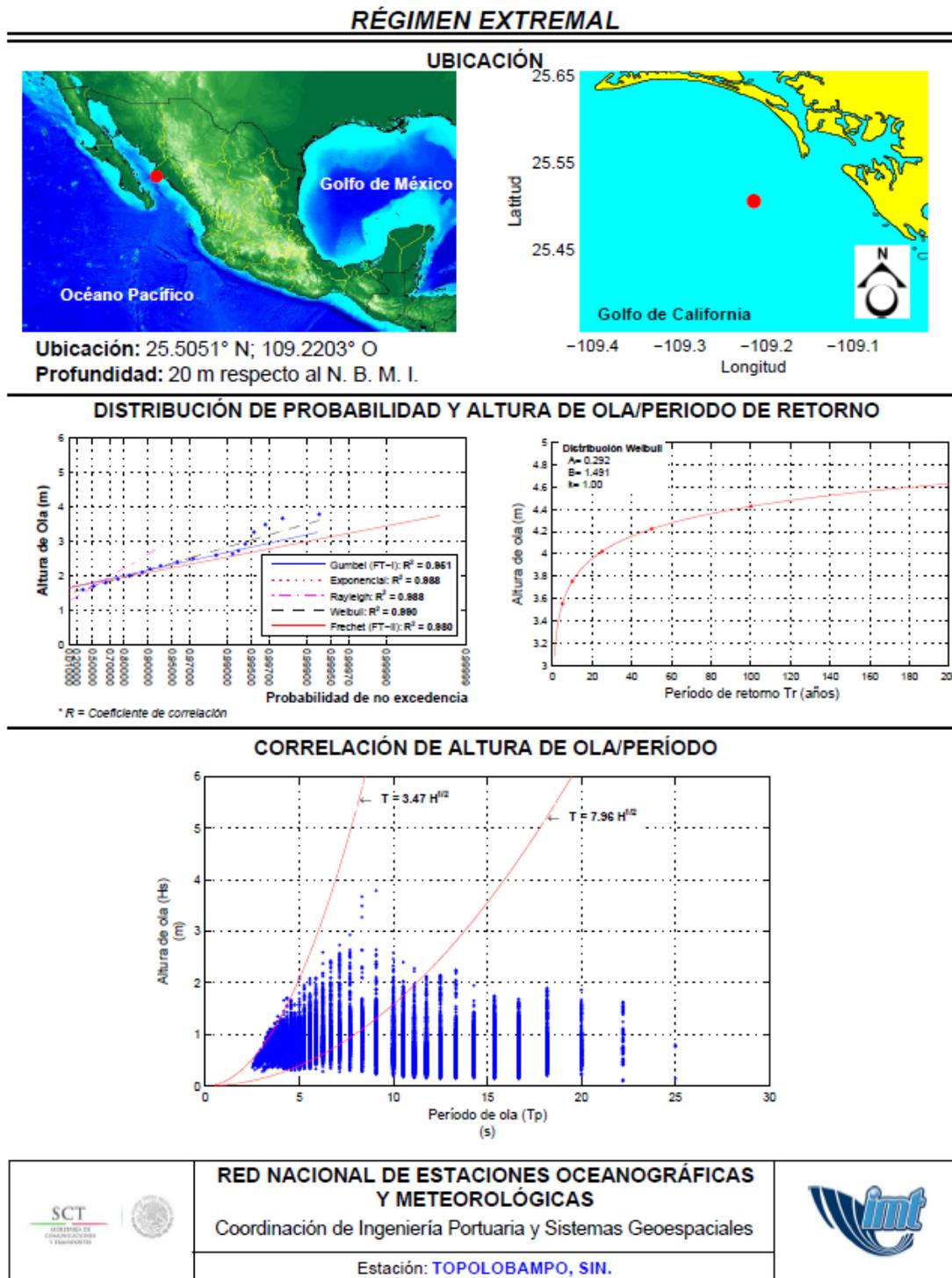


Figura 3.38 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Topolobampo, Son.

3.20 Mezquital Tamps.

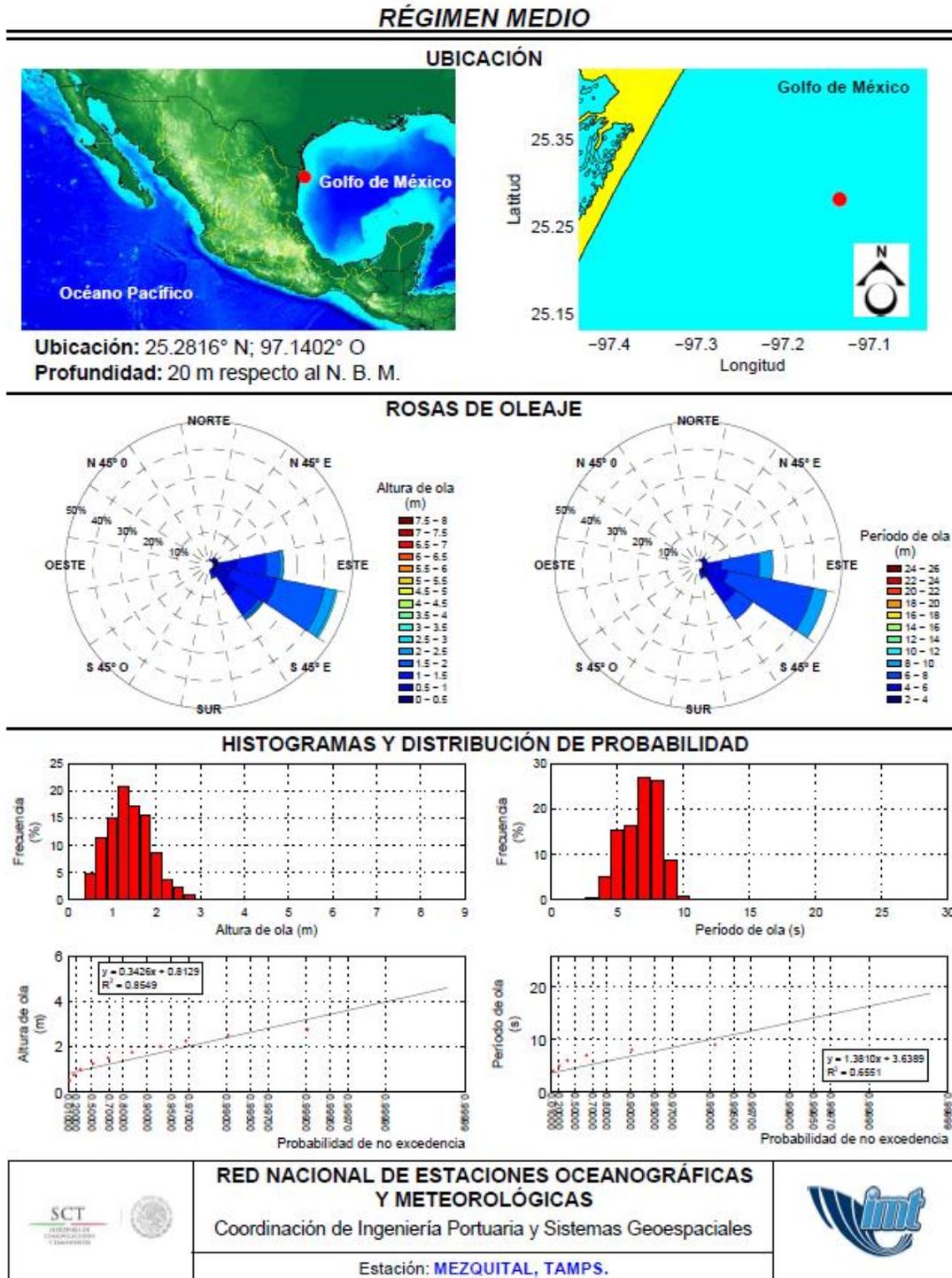
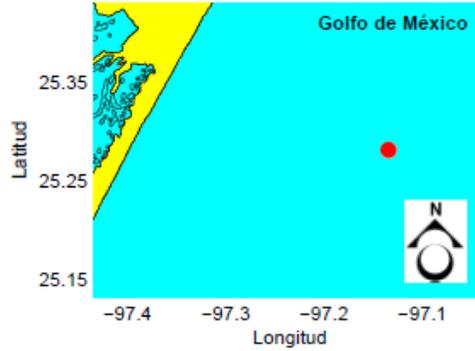


Figura 3.39 Caracterización del oleaje medio para el puerto de El Mezquital, Tamps.

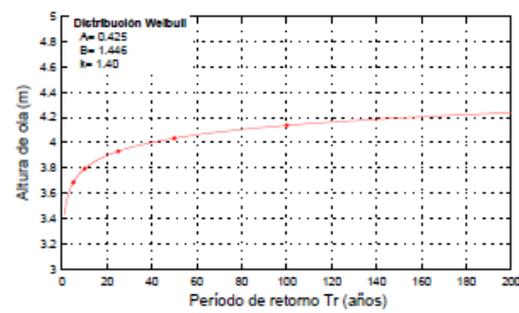
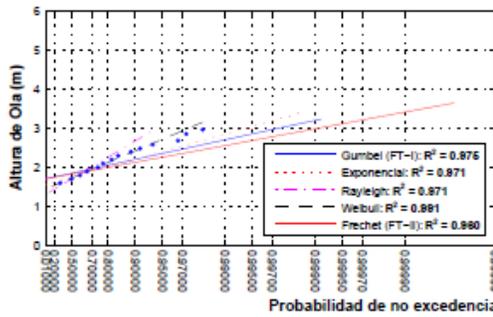
RÉGIMEN EXTREMAL

UBICACIÓN



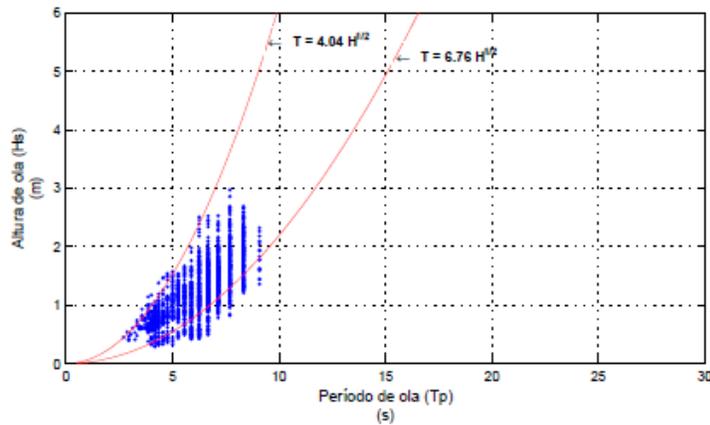
Ubicación: 25.2816° N; 97.1402° O
 Profundidad: 20 m respecto al N. B. M.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales</p>	
Estación: MEZQUITAL, TAMPS.		

Figura 3.40 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de El Mezquital, Tamps.

3.21 Altamira Tamps.

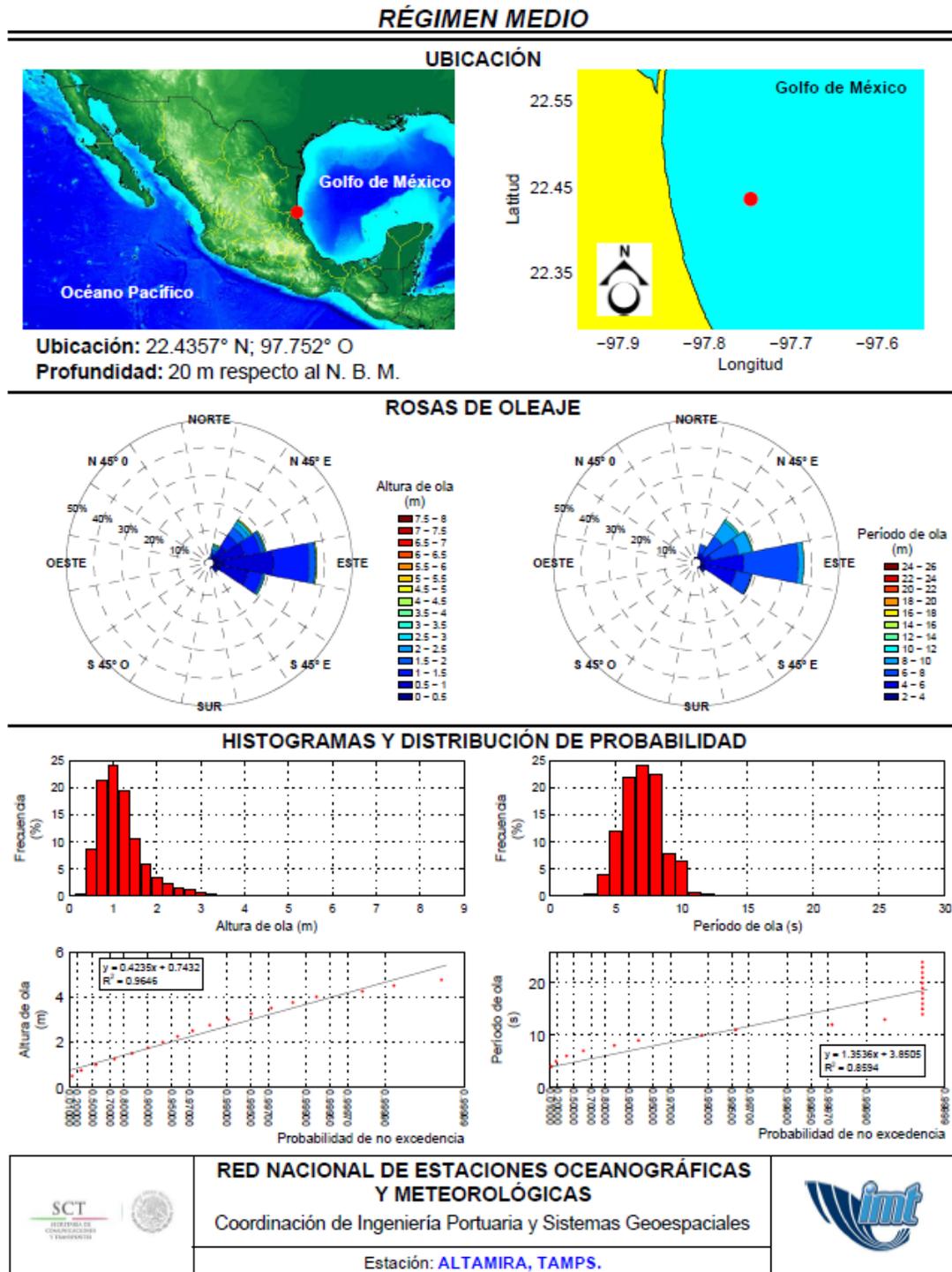


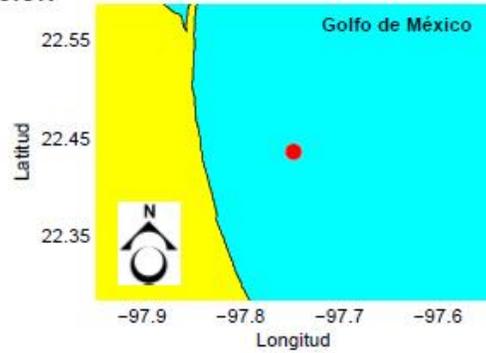
Figura 3.41 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Altamira, Tamps.

RÉGIMEN EXTREMAL

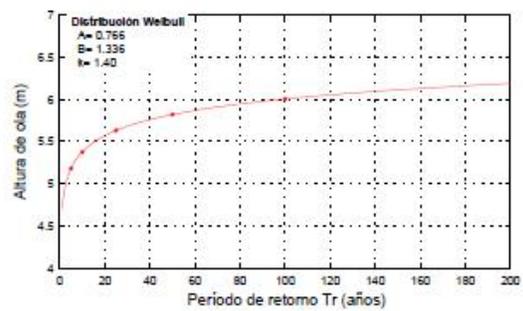
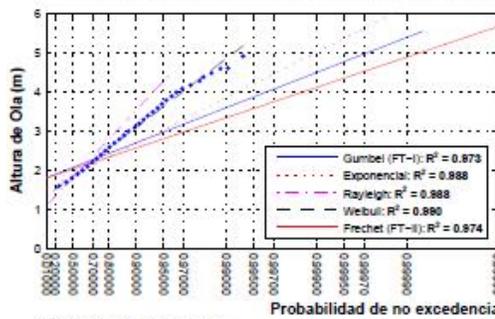
UBICACIÓN



Ubicación: 22.4357° N; 97.752° O
 Profundidad: 20 m respecto al N. B. M.

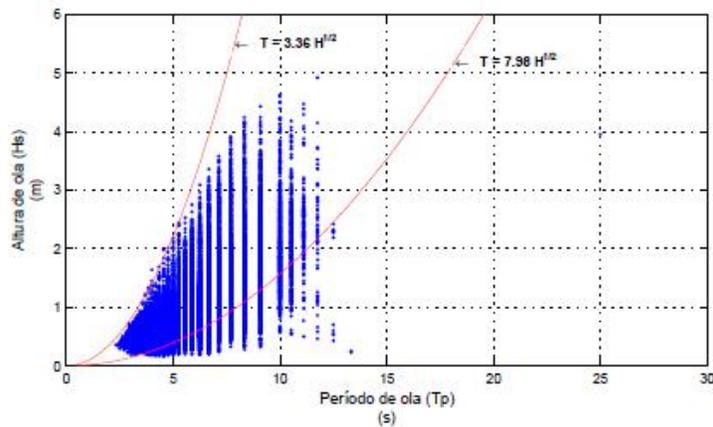


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales Estación: ALTAMIRA, TAMPS.</p>	
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Figura 3.42 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Altamira, Tamps.

3.22 Tampico Tamps.

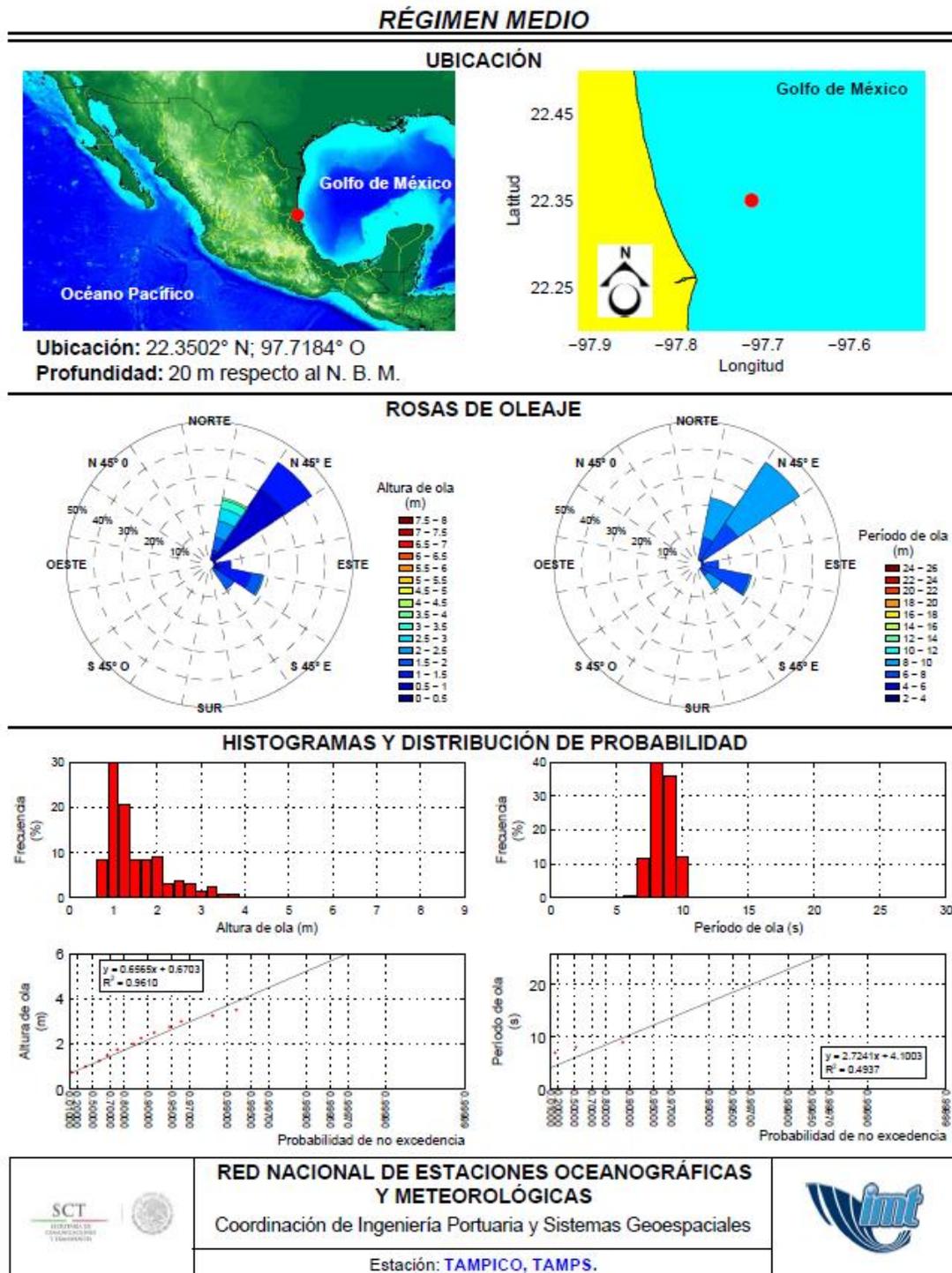
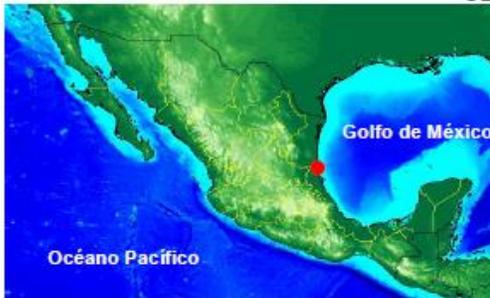


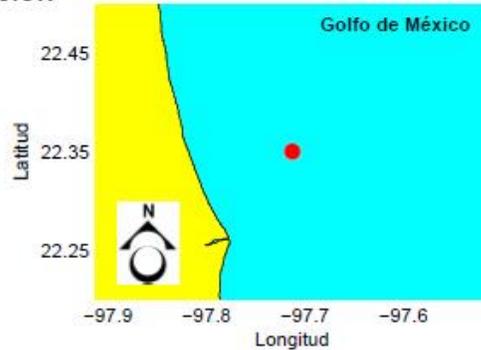
Figura 3.43 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Tampico, Tamps.

RÉGIMEN EXTREMAL

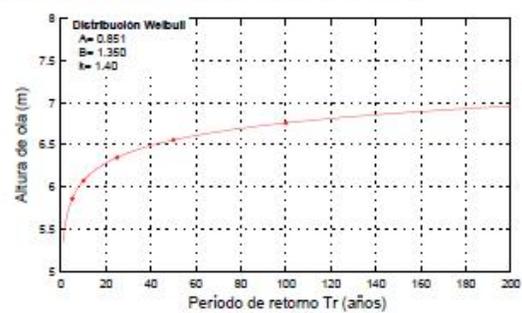
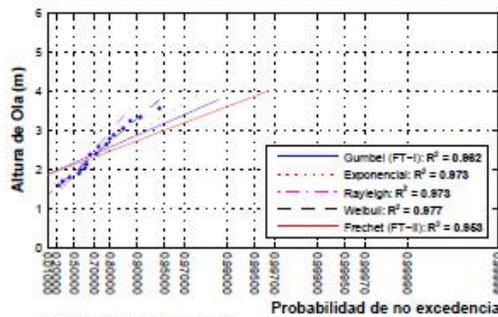
UBICACIÓN



Ubicación: 22.3502° N; 97.7184° O
 Profundidad: 20 m respecto al N. B. M.

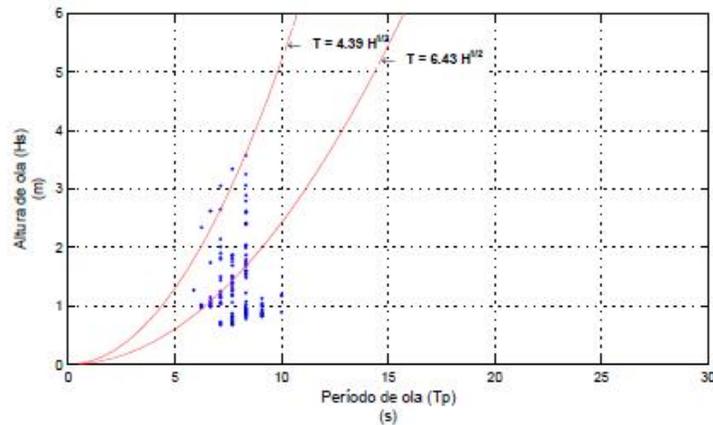


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: TAMPICO, TAMPS.	

Figura 3.44 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Tampico, Tamps.

3.23 Tuxpan Ver.

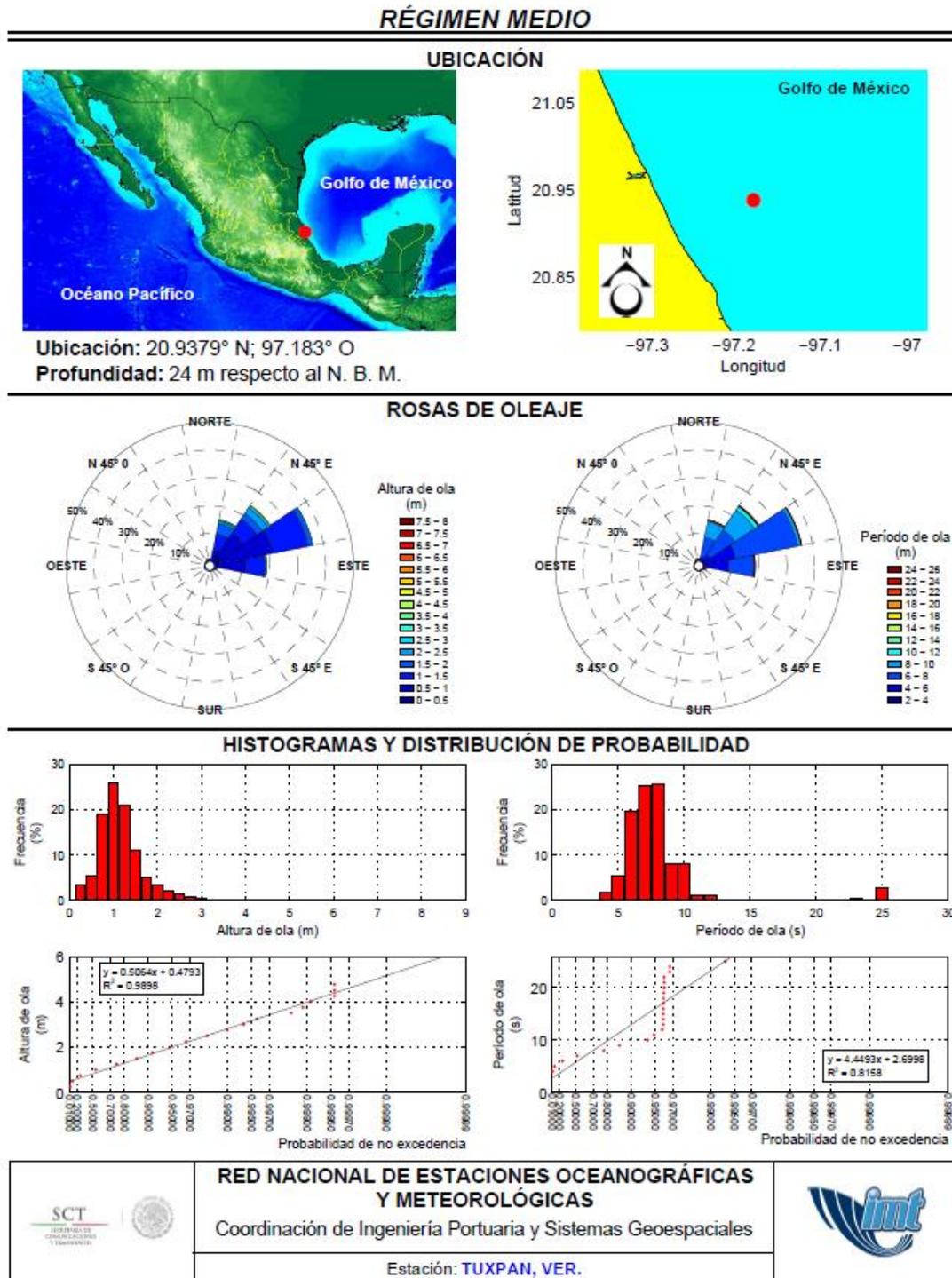
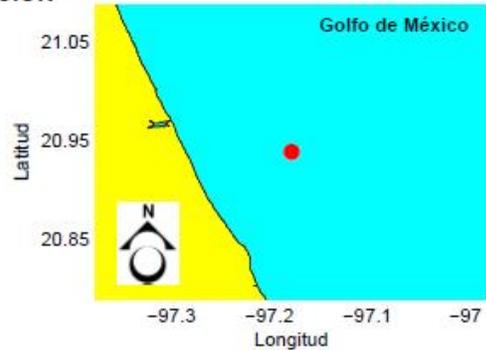


Figura 3.45 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Tuxpan, Ver.

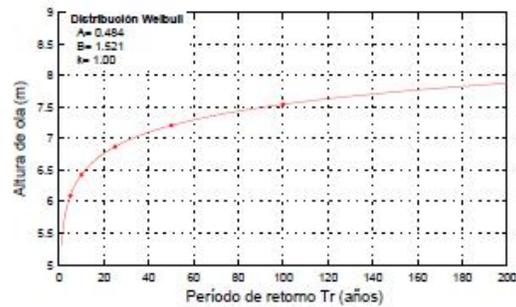
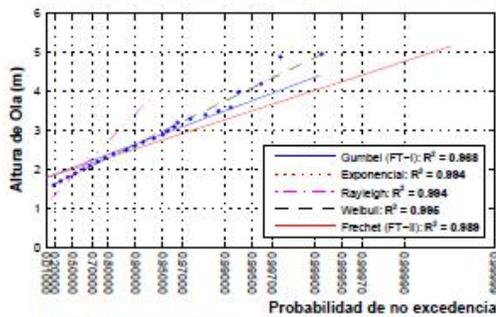
RÉGIMEN EXTREMAL

UBICACIÓN



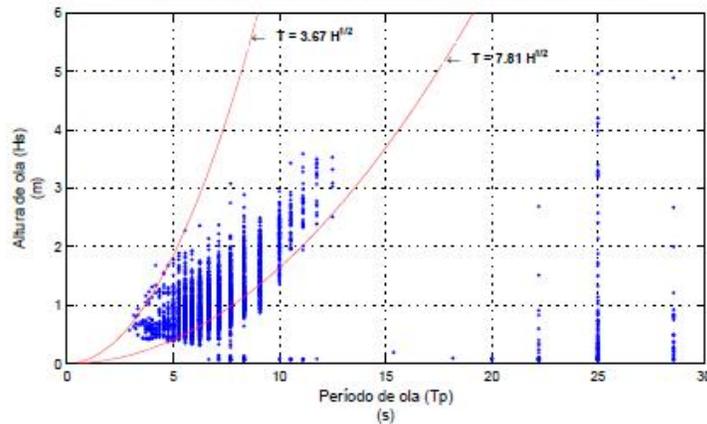
Ubicación: 20.9379° N; 97.183° O
 Profundidad: 24 m respecto al N. B. M.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERÍODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales</p> <p>Estación: TUXPAN, VER.</p>	
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Figura 3.46 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Tuxpan, Ver.

3.24 Tecolutla Ver.

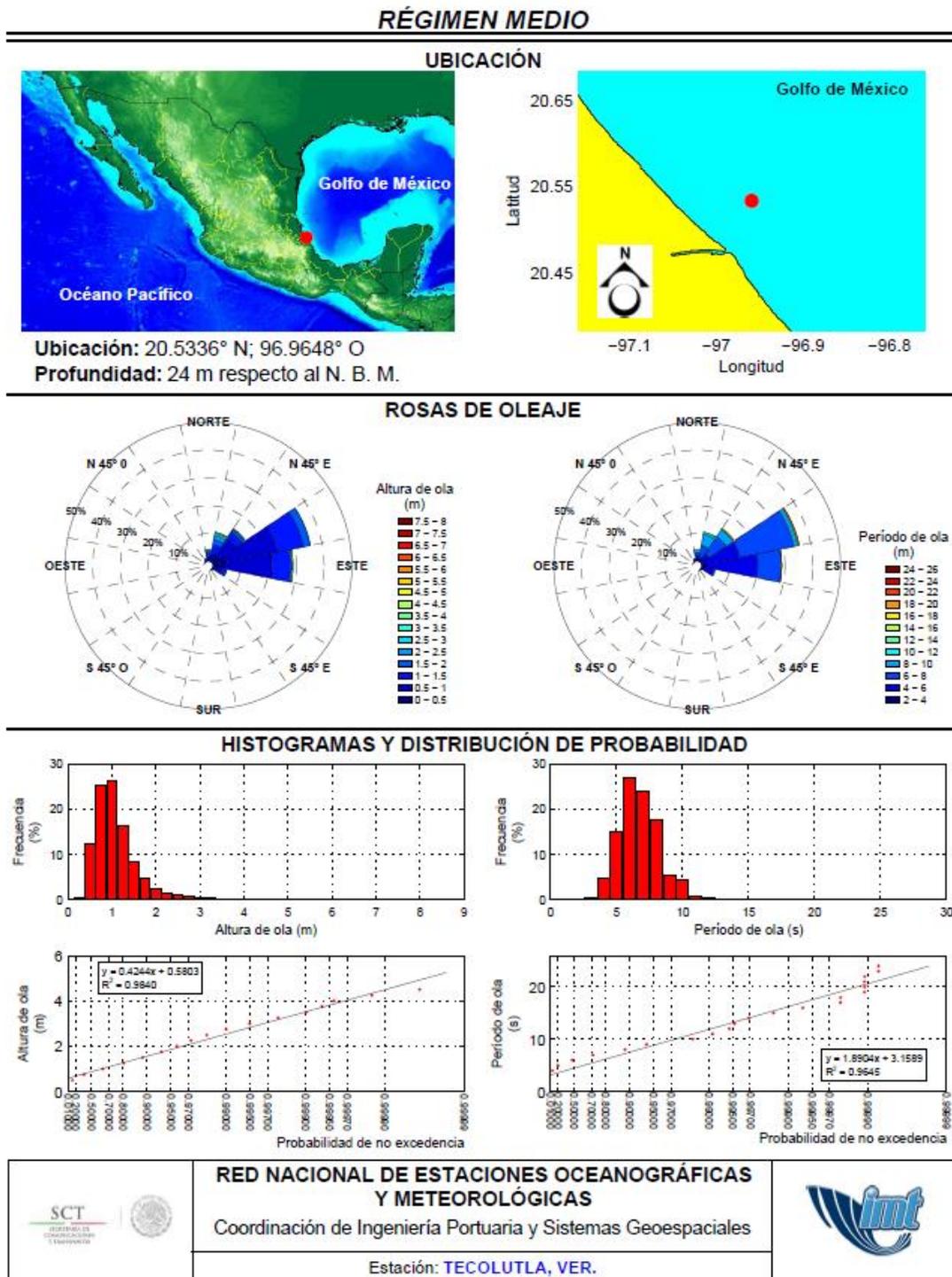


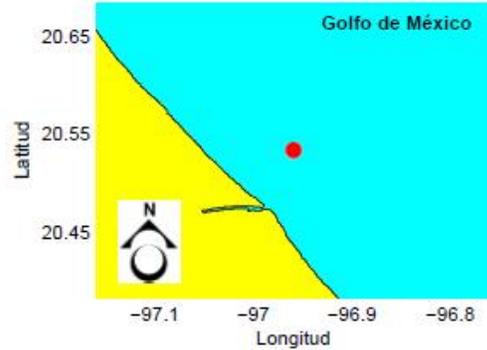
Figura 3.47 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Tecolutla, Ver.

RÉGIMEN EXTREMAL

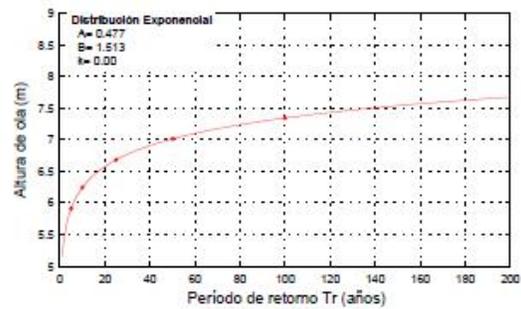
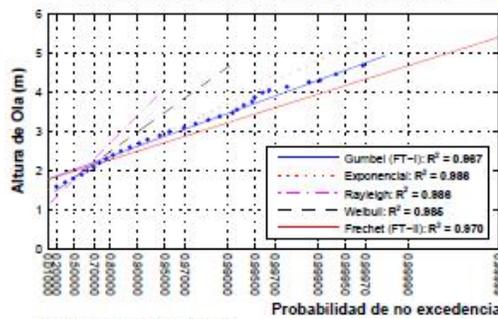
UBICACIÓN



Ubicación: 20.5336° N; 96.9648° O
 Profundidad: 24 m respecto al N. B. M.

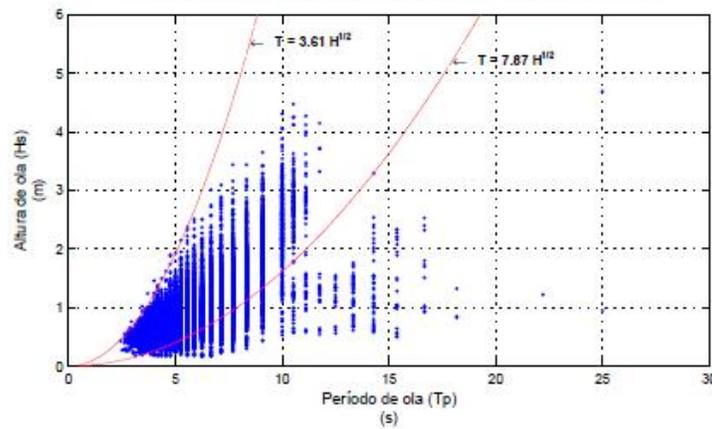


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geospaciales</p> <p>Estación: TECOLUTLA, VER.</p>	
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

Figura 3.48 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Tecolutla, Ver.

3.25 Bahía de Vergara Ver.

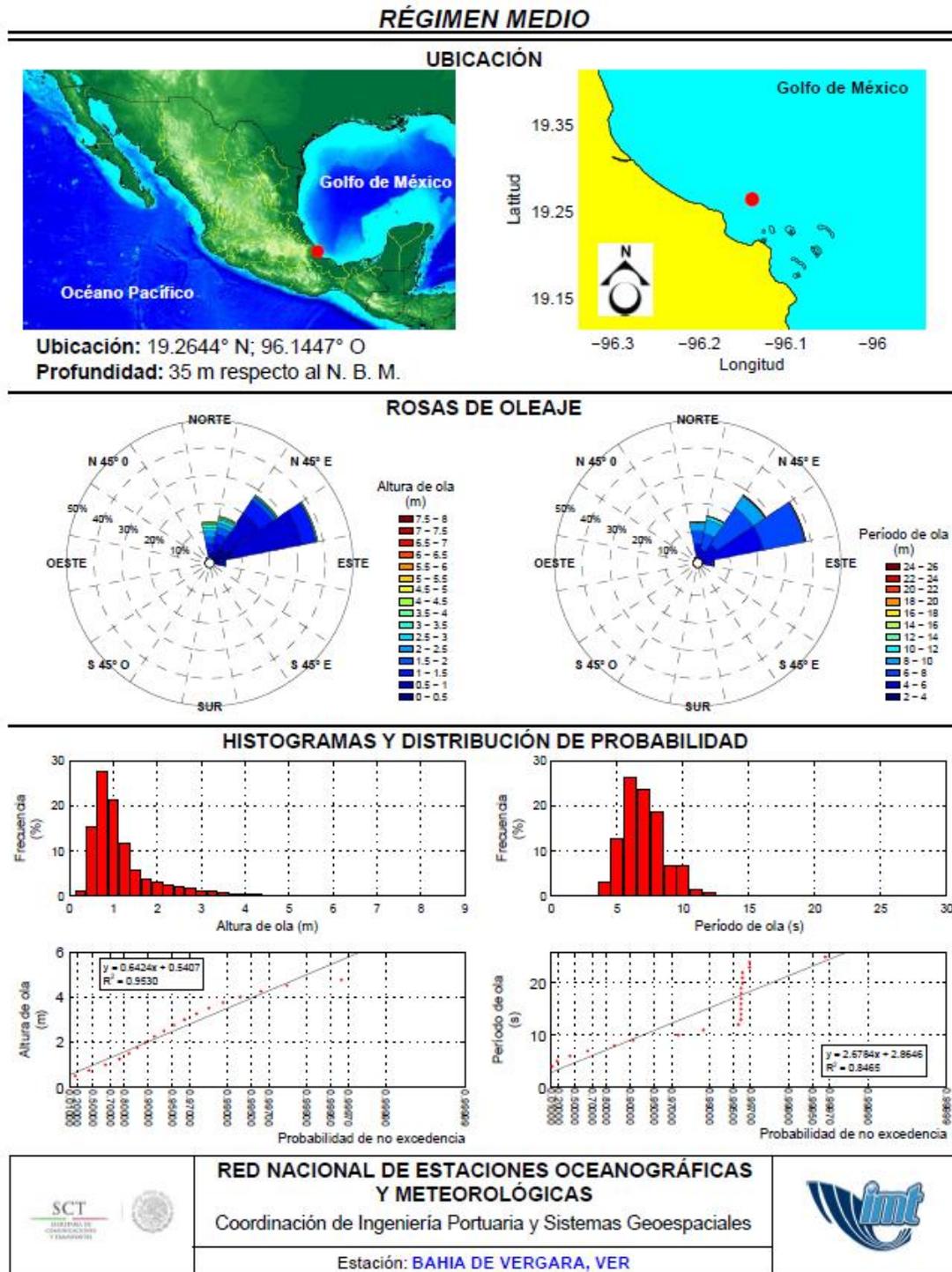


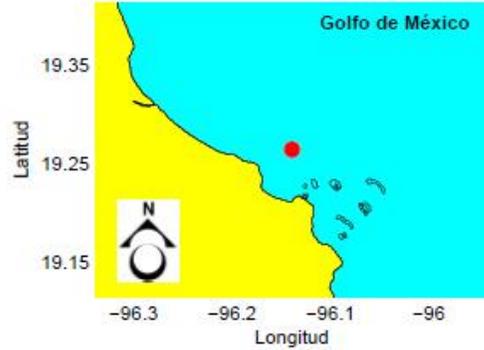
Figura 3.49 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Bahía de Vergara, Ver.

RÉGIMEN EXTREMAL

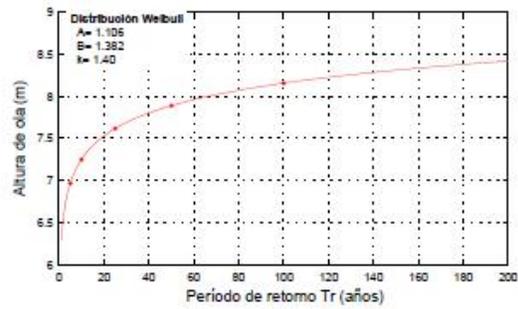
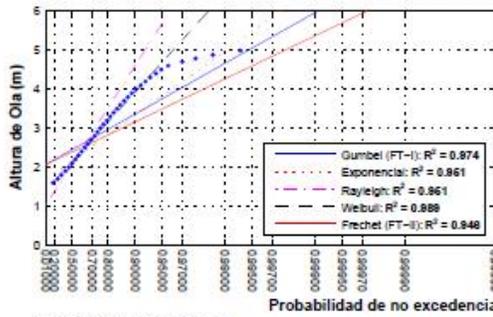
UBICACIÓN



Ubicación: 19.2644° N; 96.1447° O
 Profundidad: 35 m respecto al N. B. M.

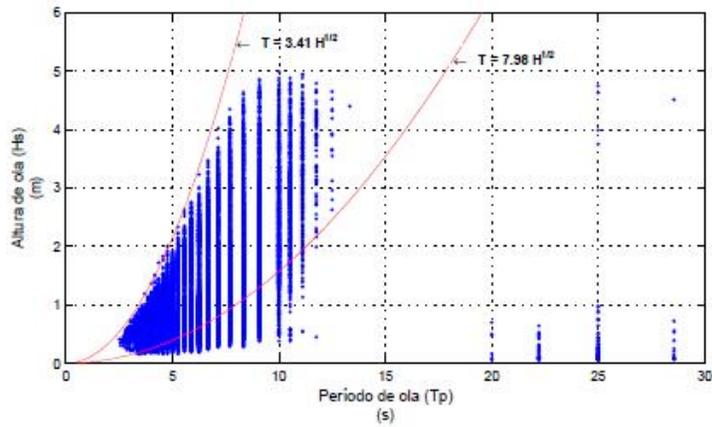


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 SCT SECRETARÍA DE COMERCIO Y TURISMO	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
Estación: BAHIA DE VERGARA, VER		

Figura 3.50 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Bahía de Vergara, Ver.

3.26 Veracruz Ver.

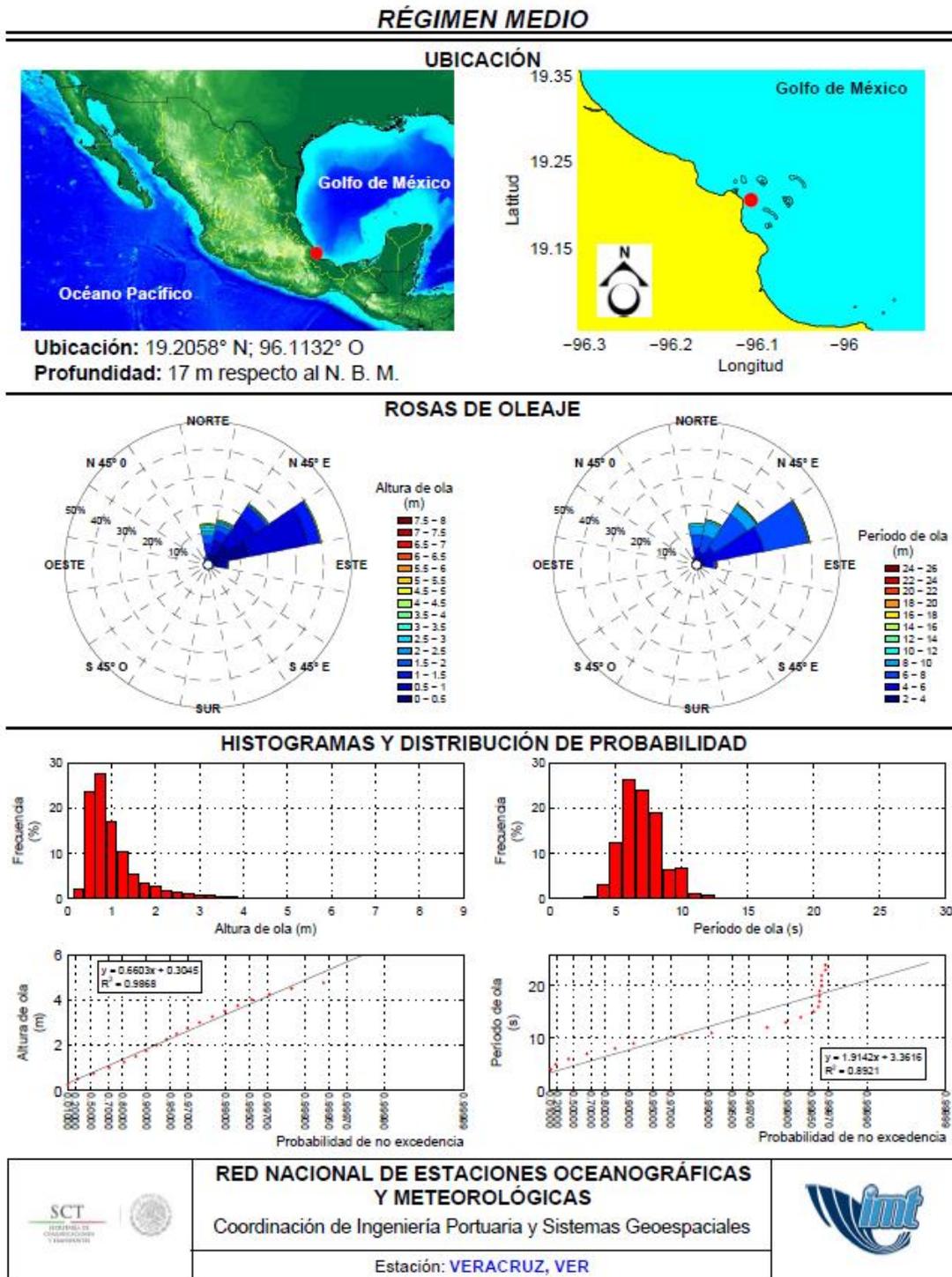


Figura 3.51 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Veracruz, Ver.

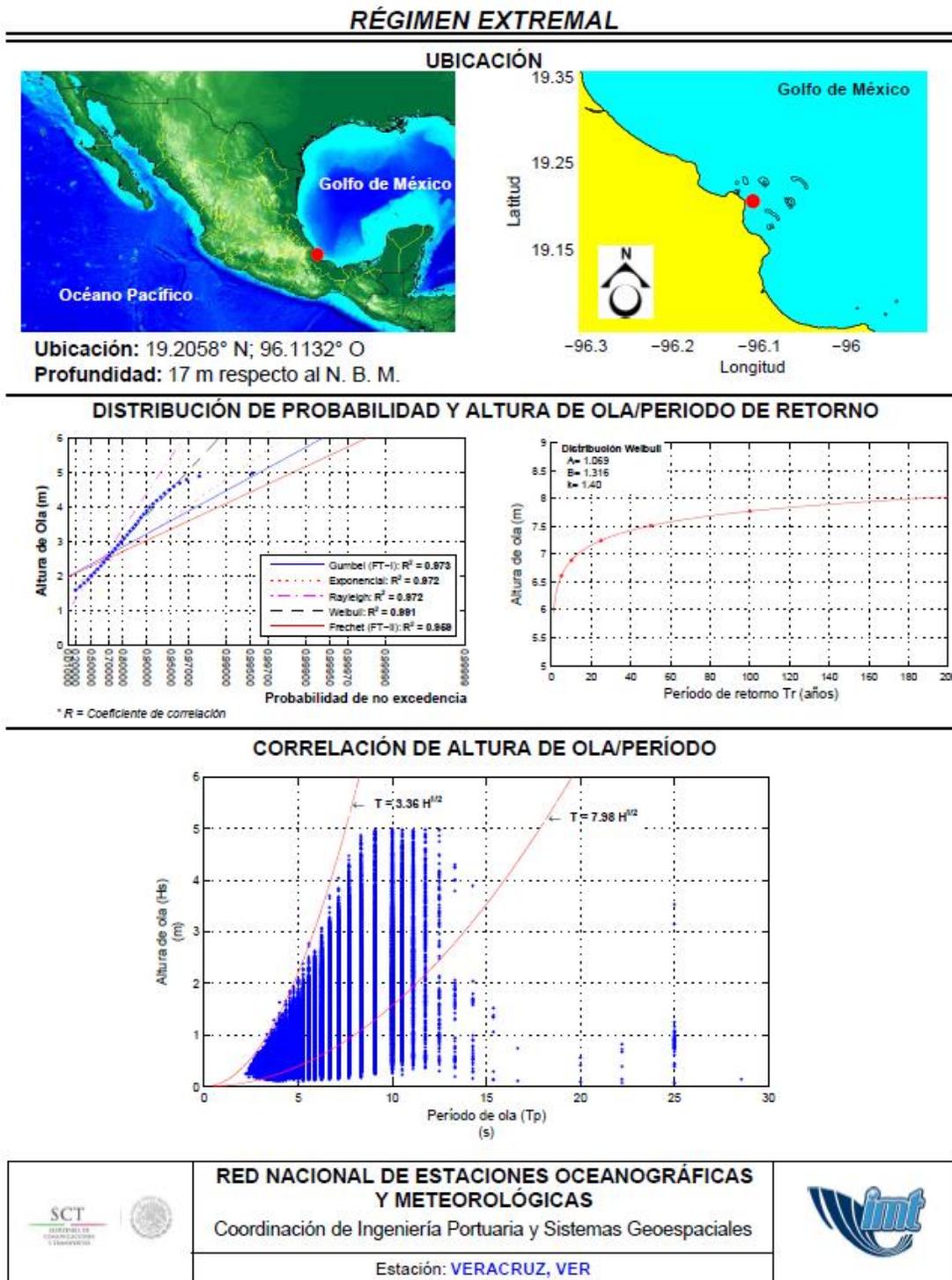


Figura 3.52 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Veracruz, Ver.

3.27 Dos Bocas Ver.

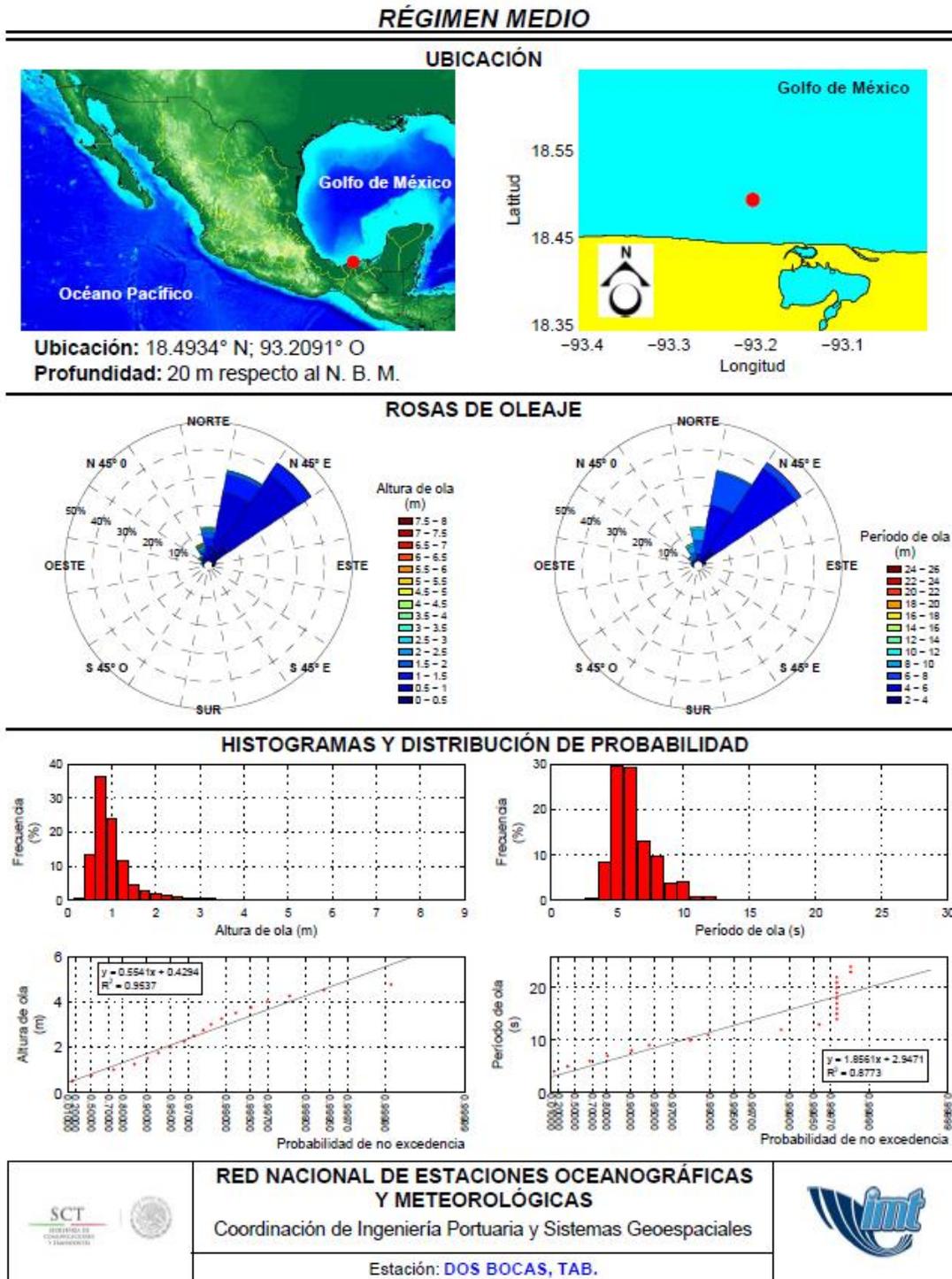


Figura 3.53 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Dos Bocas, Tab.

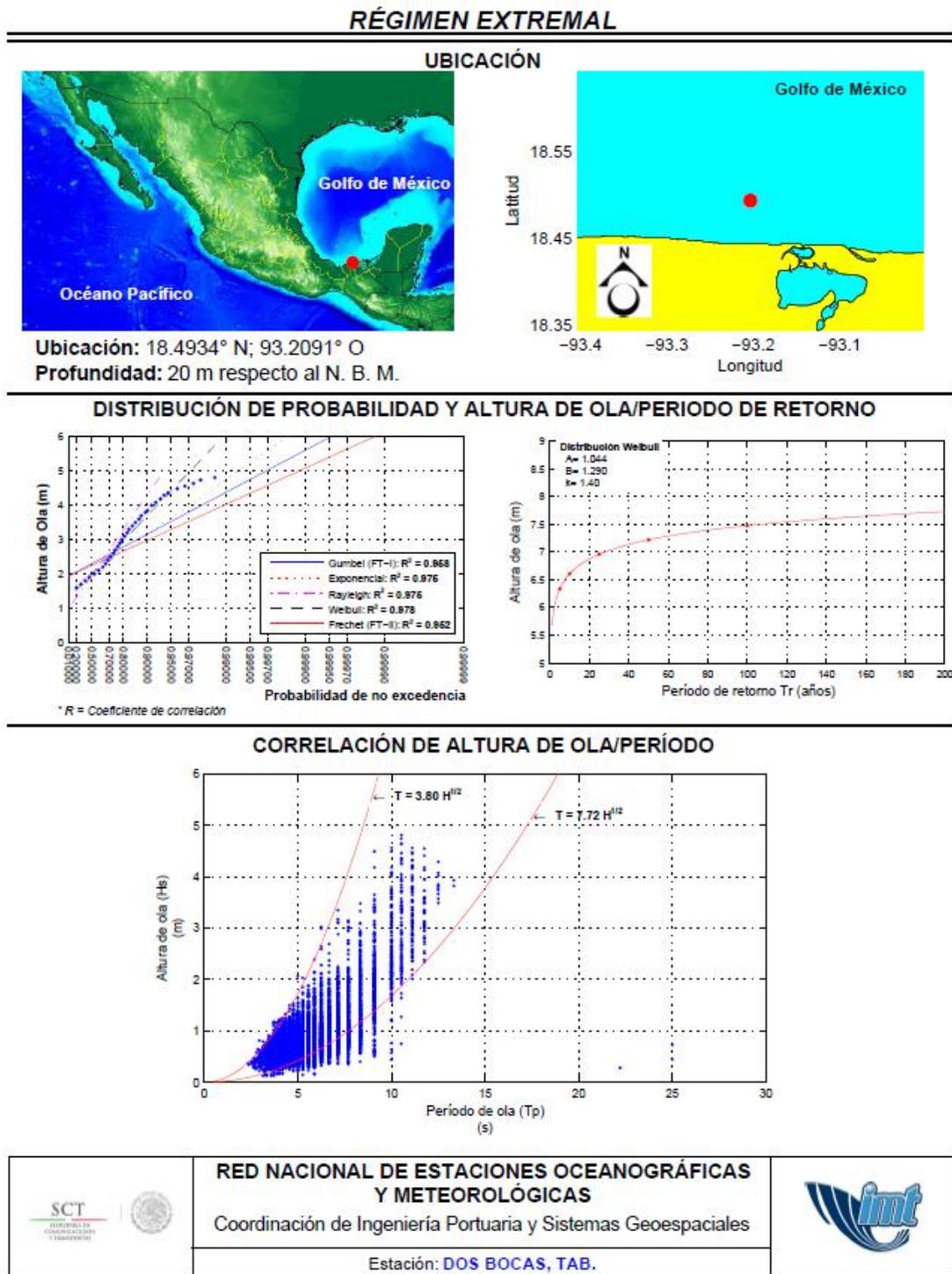


Figura 3.54 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Dos Bocas, Tab.

3.28 Frontera Tab.

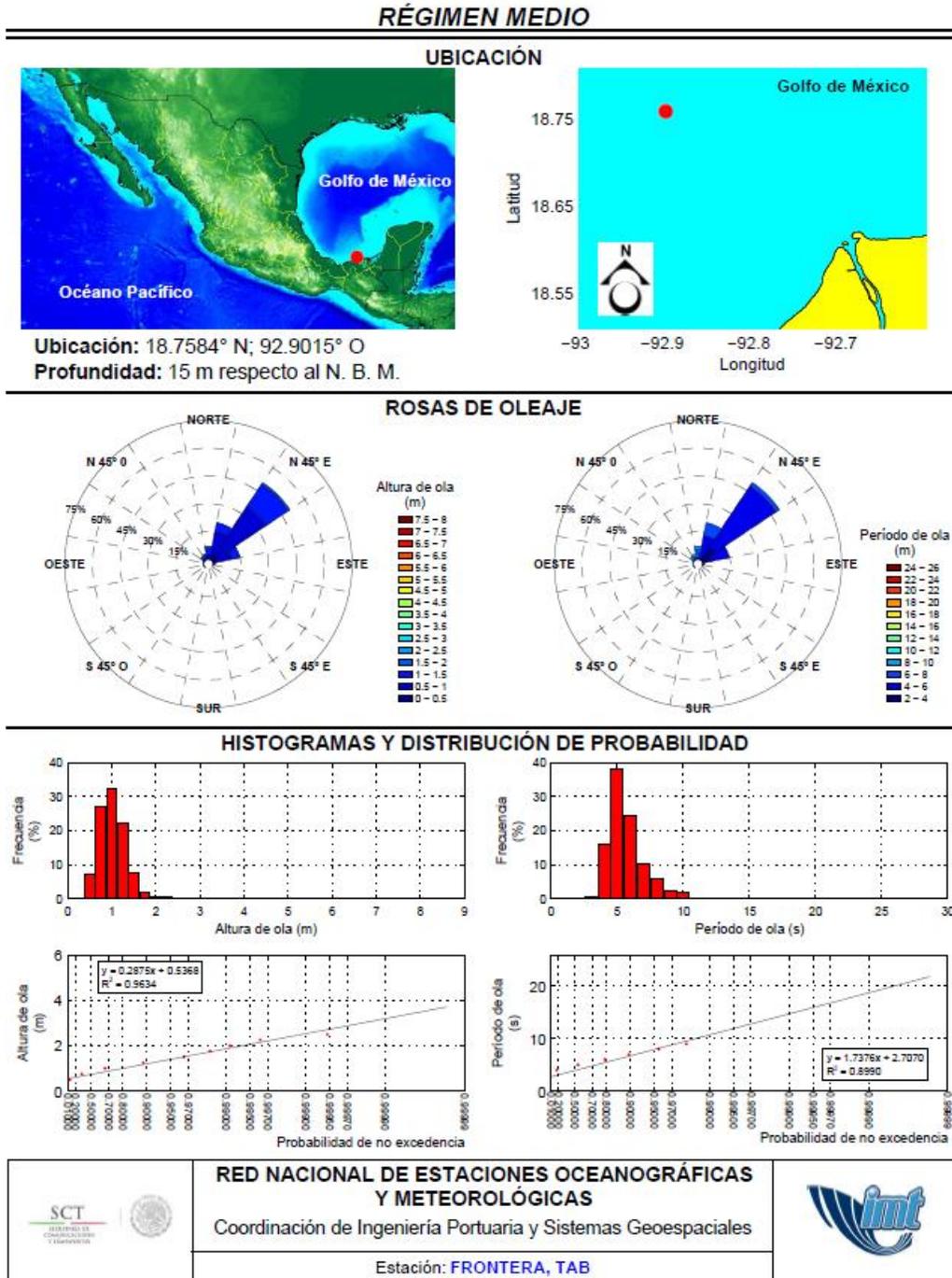


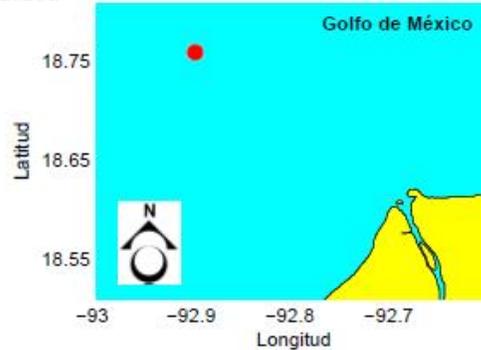
Figura 3.55 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Frontera, Tab.

RÉGIMEN EXTREMAL

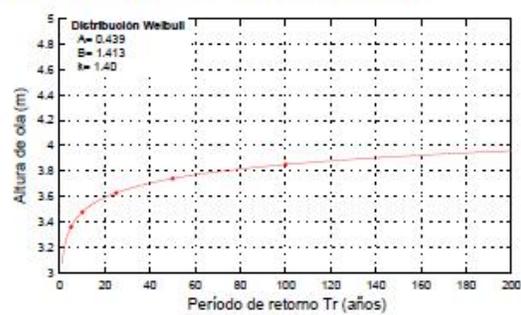
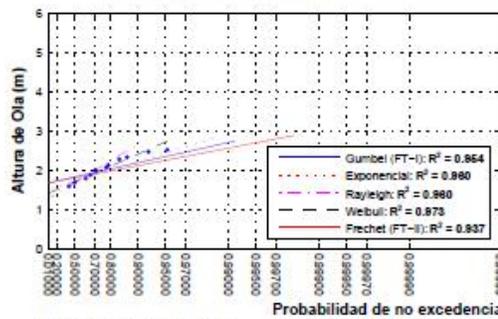
UBICACIÓN



Ubicación: 18.7584° N; 92.9015° O
 Profundidad: 15 m respecto al N. B. M.

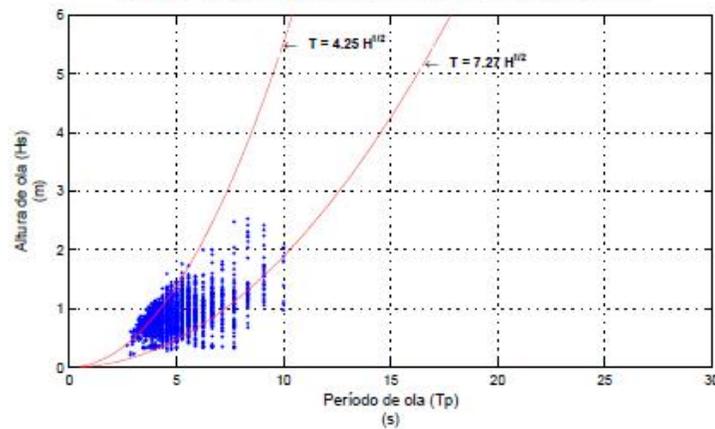


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES		RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales Estación: FRONTERA, TAB	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

Figura 3.56 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Frontera, Tab.

3.29 Seybaplaya Tab.

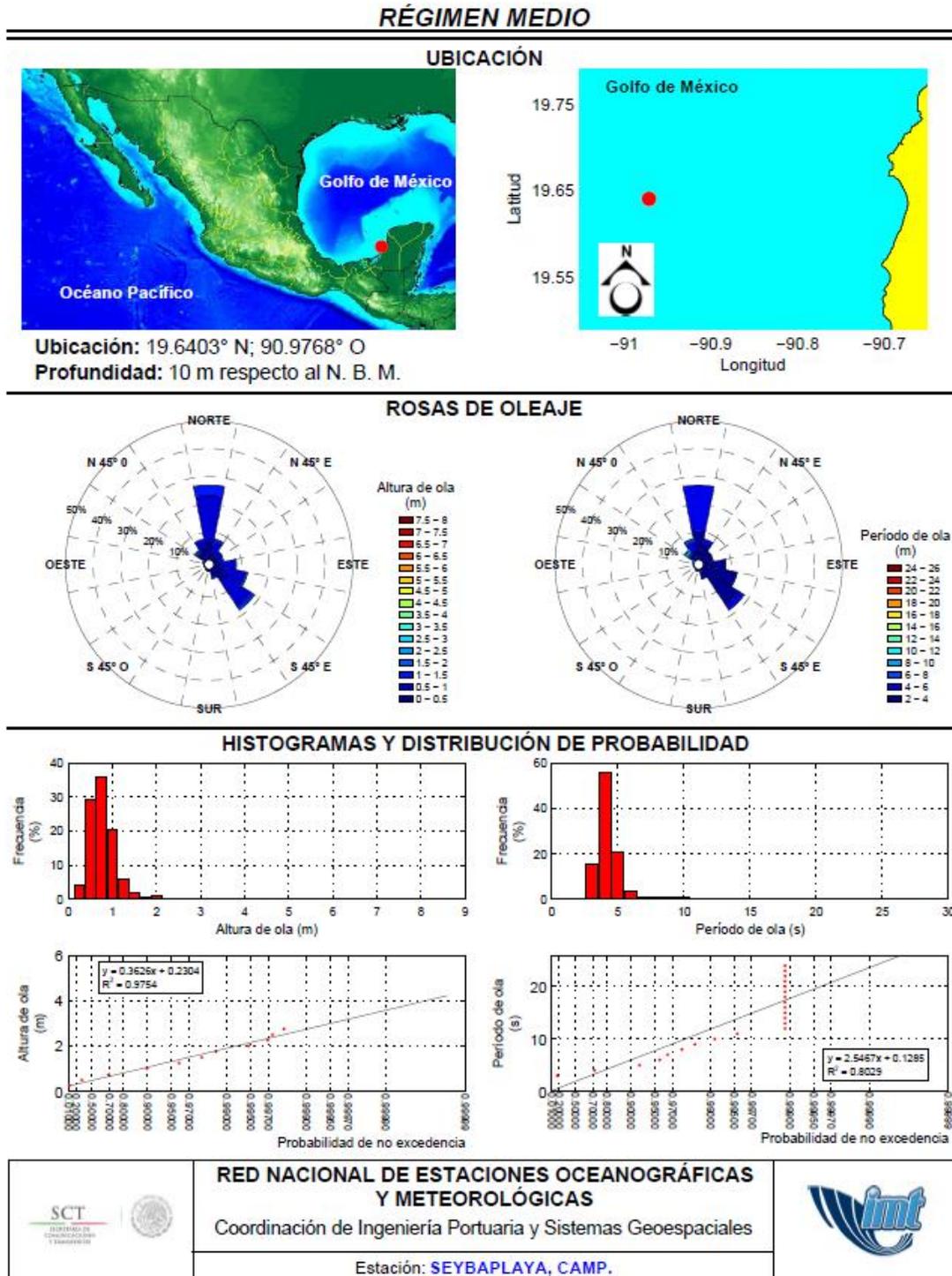
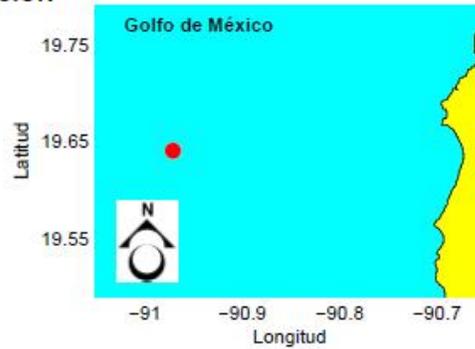
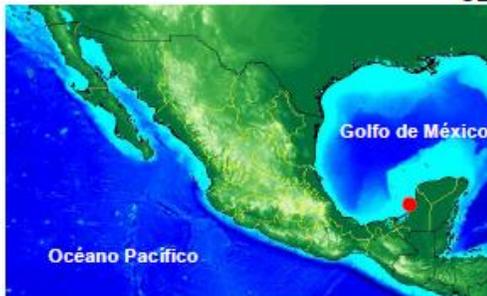


Figura 3.57 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Seybaplaya, Camp.

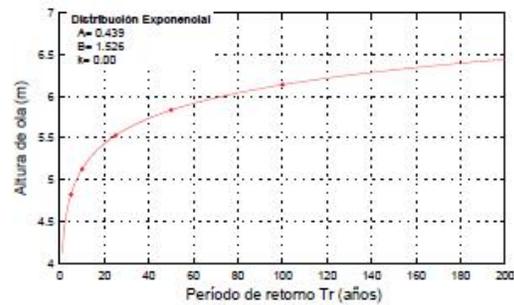
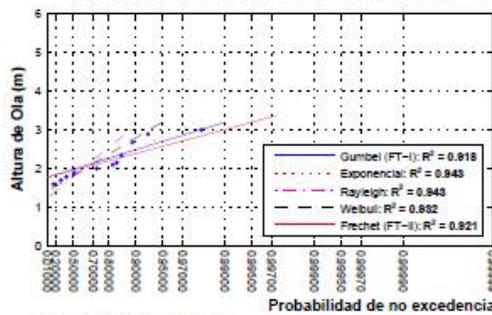
RÉGIMEN EXTREMAL

UBICACIÓN



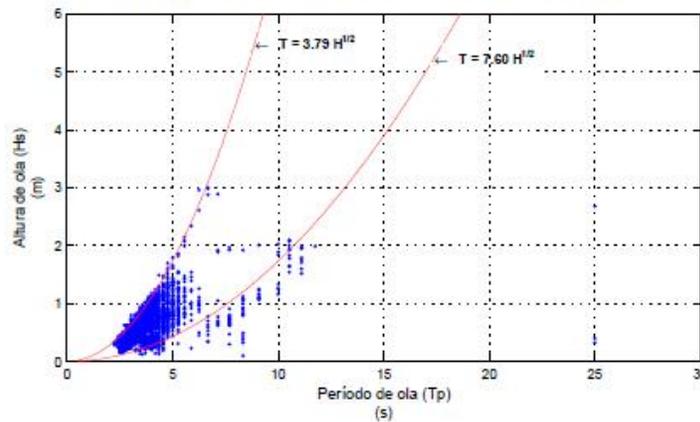
Ubicación: 19.6403° N; 90.9768° O
 Profundidad: 10 m respecto al N. B. M.

DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: SEYBAPLAYA, CAMP.	

Figura 3.58 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Seybaplaya, Camp.

3.30 Progreso Yuc.

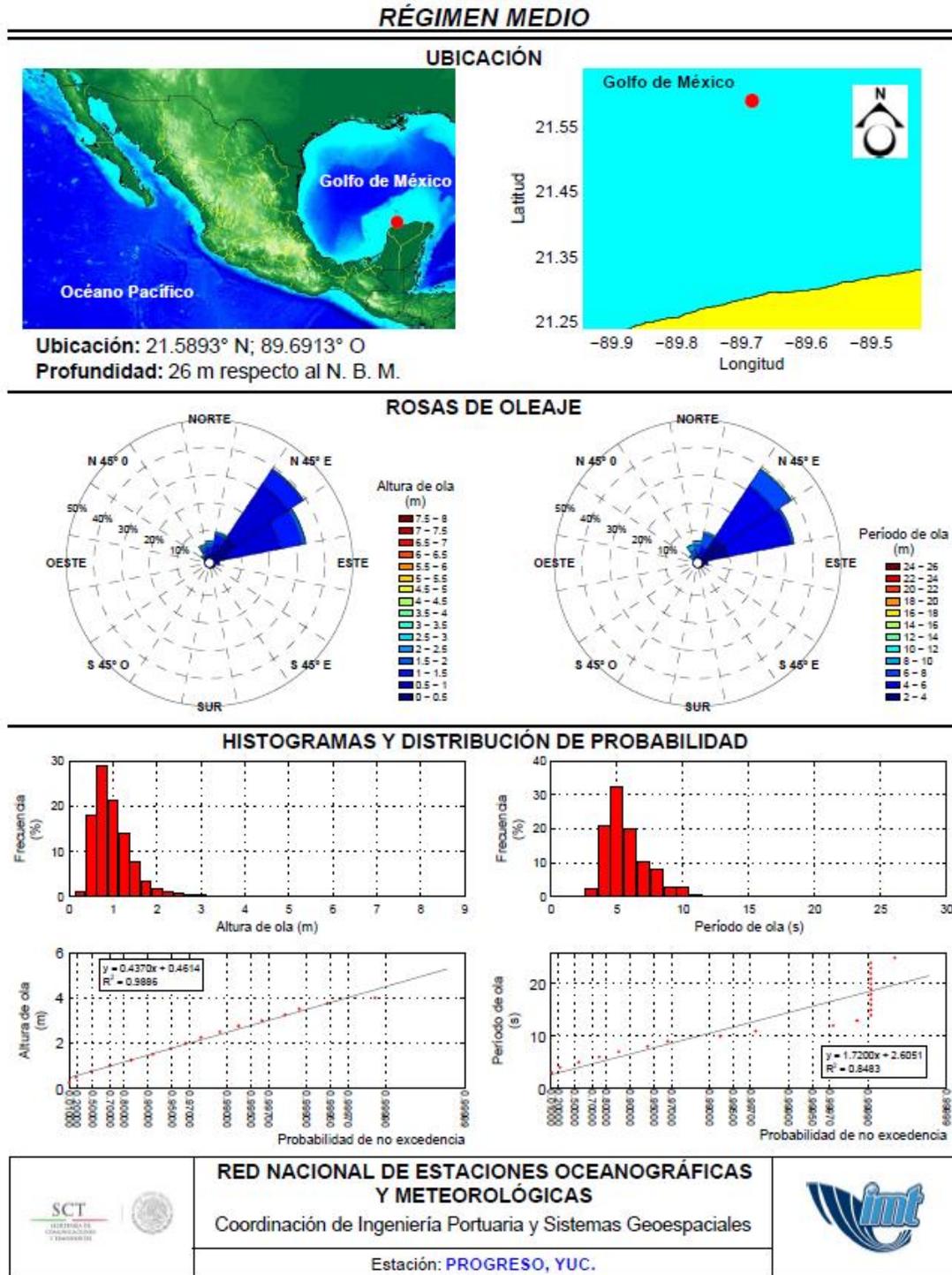
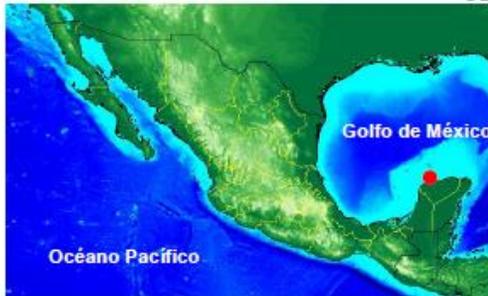


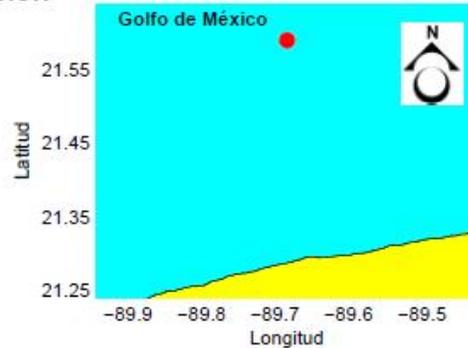
Figura 3.59 Caracterización del oleaje medio para Puerto Progreso, Yuc.

RÉGIMEN EXTREMAL

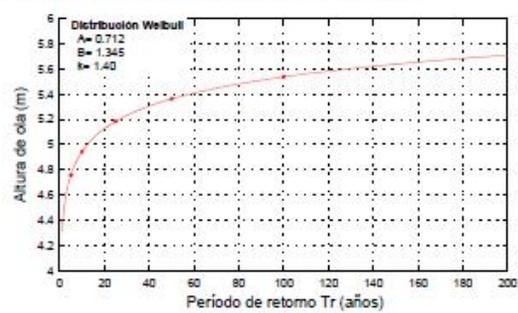
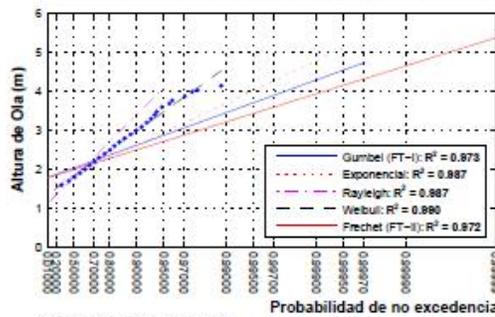
UBICACIÓN



Ubicación: 21.5893° N; 89.6913° O
 Profundidad: 26 m respecto al N. B. M.

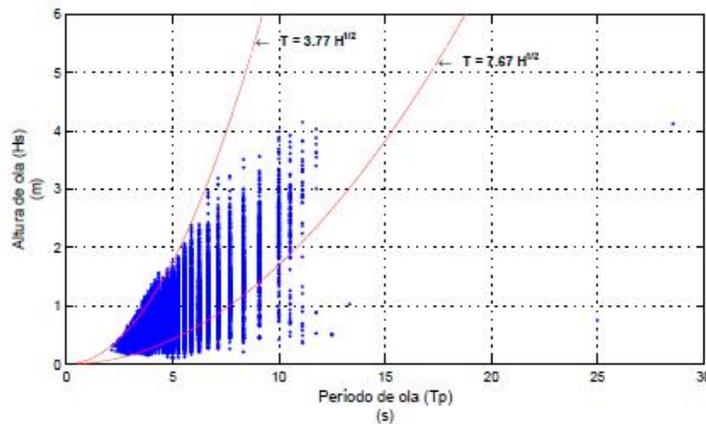


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
Estación: PROGRESO, YUC.		

Figura 3.60 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Progreso, Yuc.

3.31 Puerto Juárez Q. Roo.

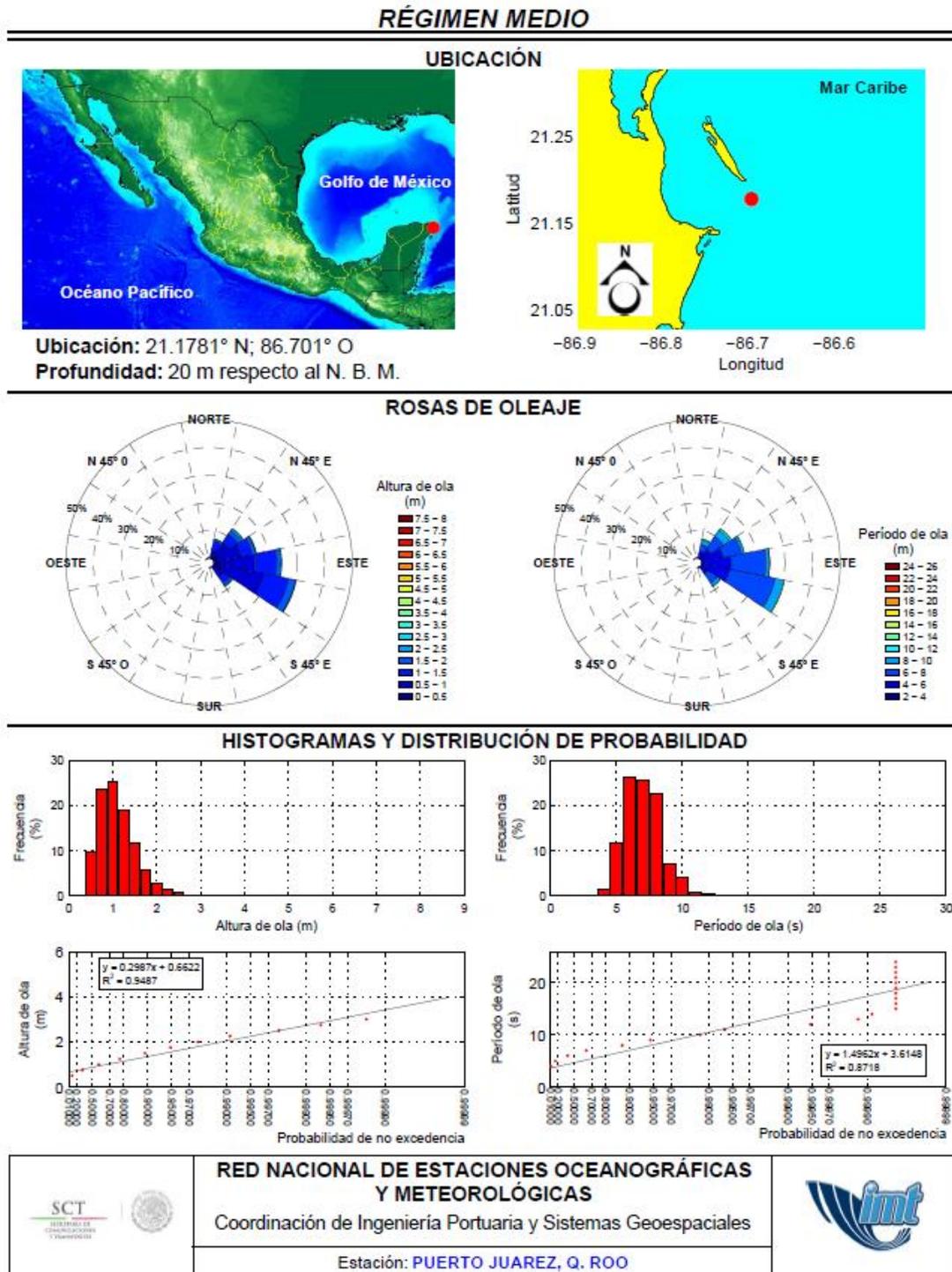


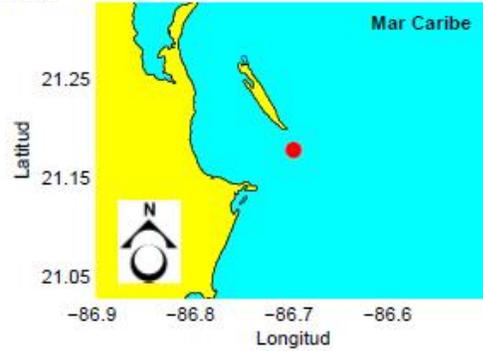
Figura 3.61 Caracterización del oleaje medio para Puerto Juárez, Q. Roo.

RÉGIMEN EXTREMAL

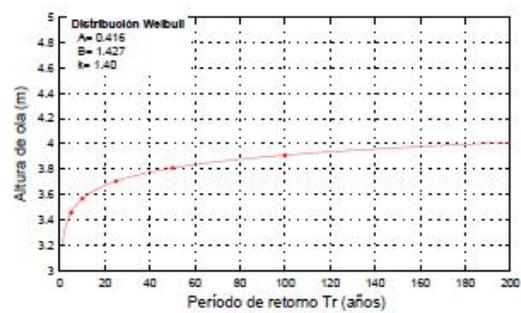
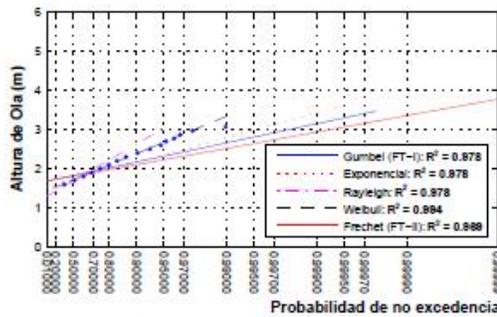
UBICACIÓN



Ubicación: 21.1781° N; 86.701° O
 Profundidad: 20 m respecto al N. B. M.

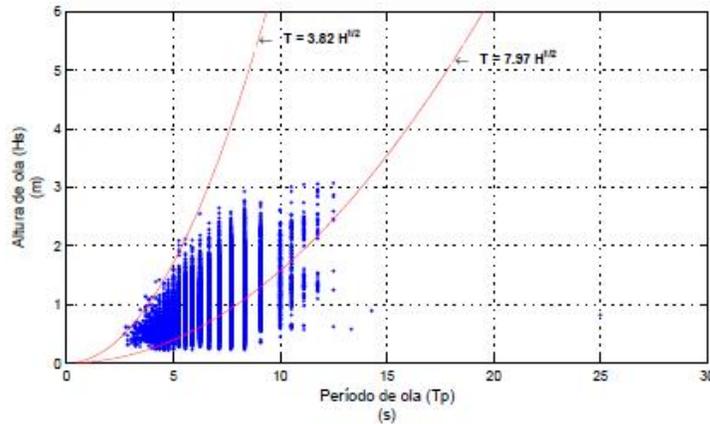


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



 	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
	Estación: PUERTO JUÁREZ, Q. ROO	

Figura 3.62 Caracterización del oleaje extremal para Puerto Juárez, Q. Roo.

3.32 Cozumel Q. Roo.

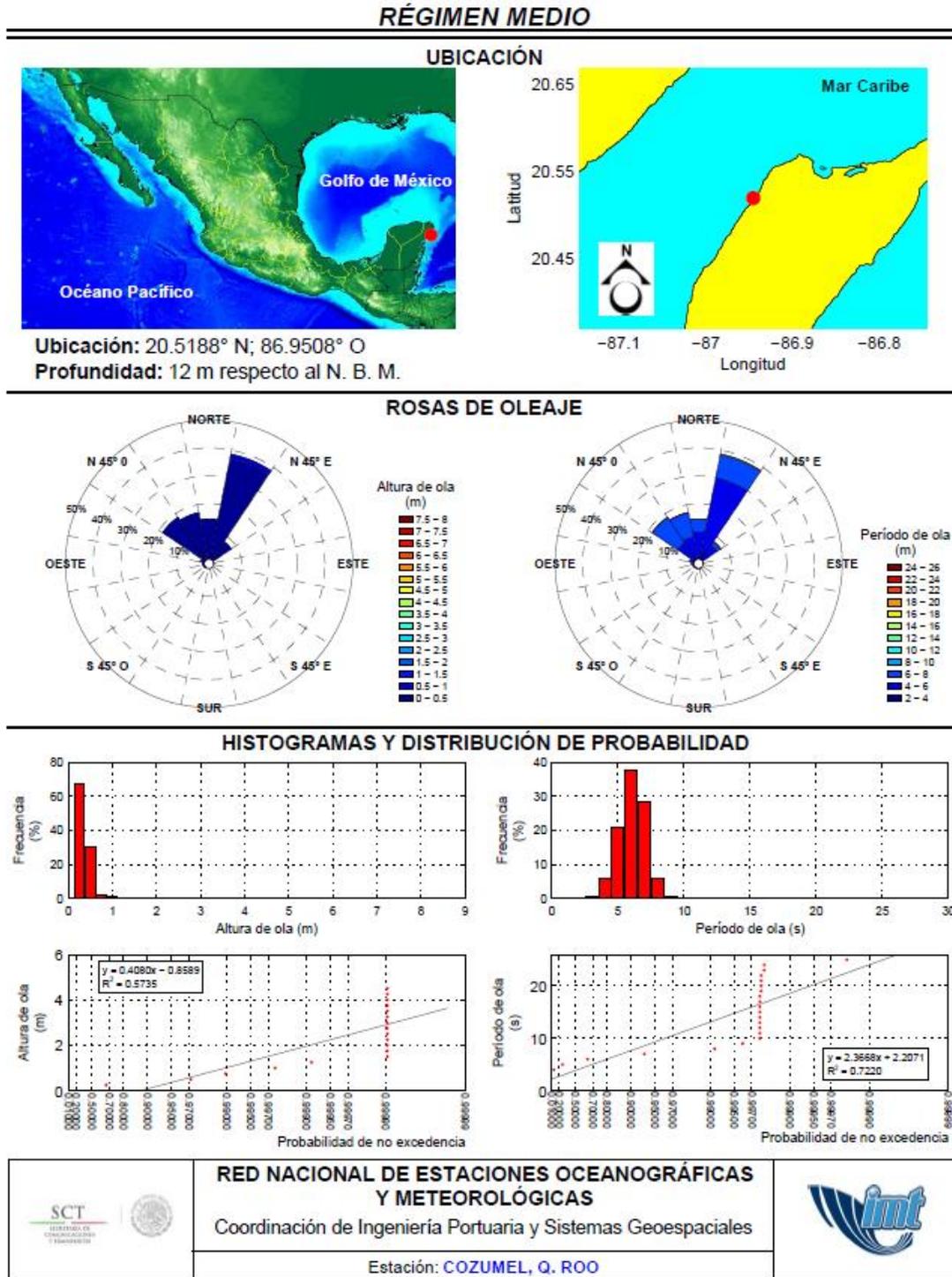


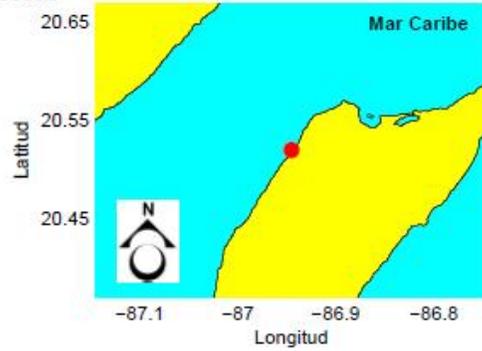
Figura 3.63 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Cozumel, Q. Roo.

RÉGIMEN EXTREMAL

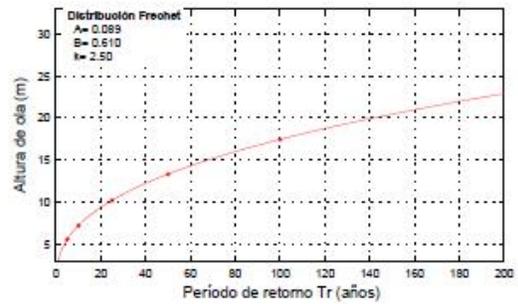
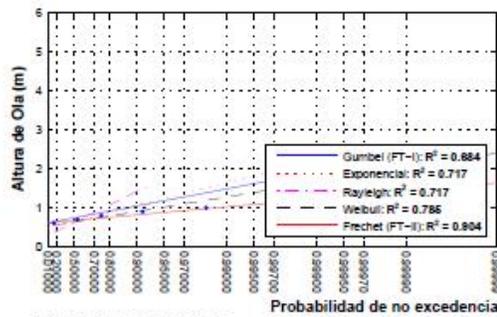
UBICACIÓN



Ubicación: 20.5188° N; 86.9508° O
 Profundidad: 12 m respecto al N. B. M.

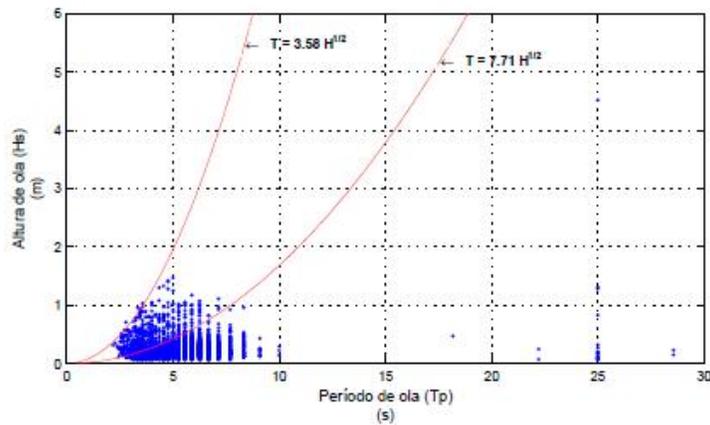


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERIODO



 SCT SECRETARÍA DE COMERCIO Y TRANSPORTES	RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales	
Estación: COZUMEL, Q. ROO		

Figura 3.64 Caracterización del oleaje extremo para el puerto de Cozumel, Q. Roo.

3.33 Mahahual Q. Roo.

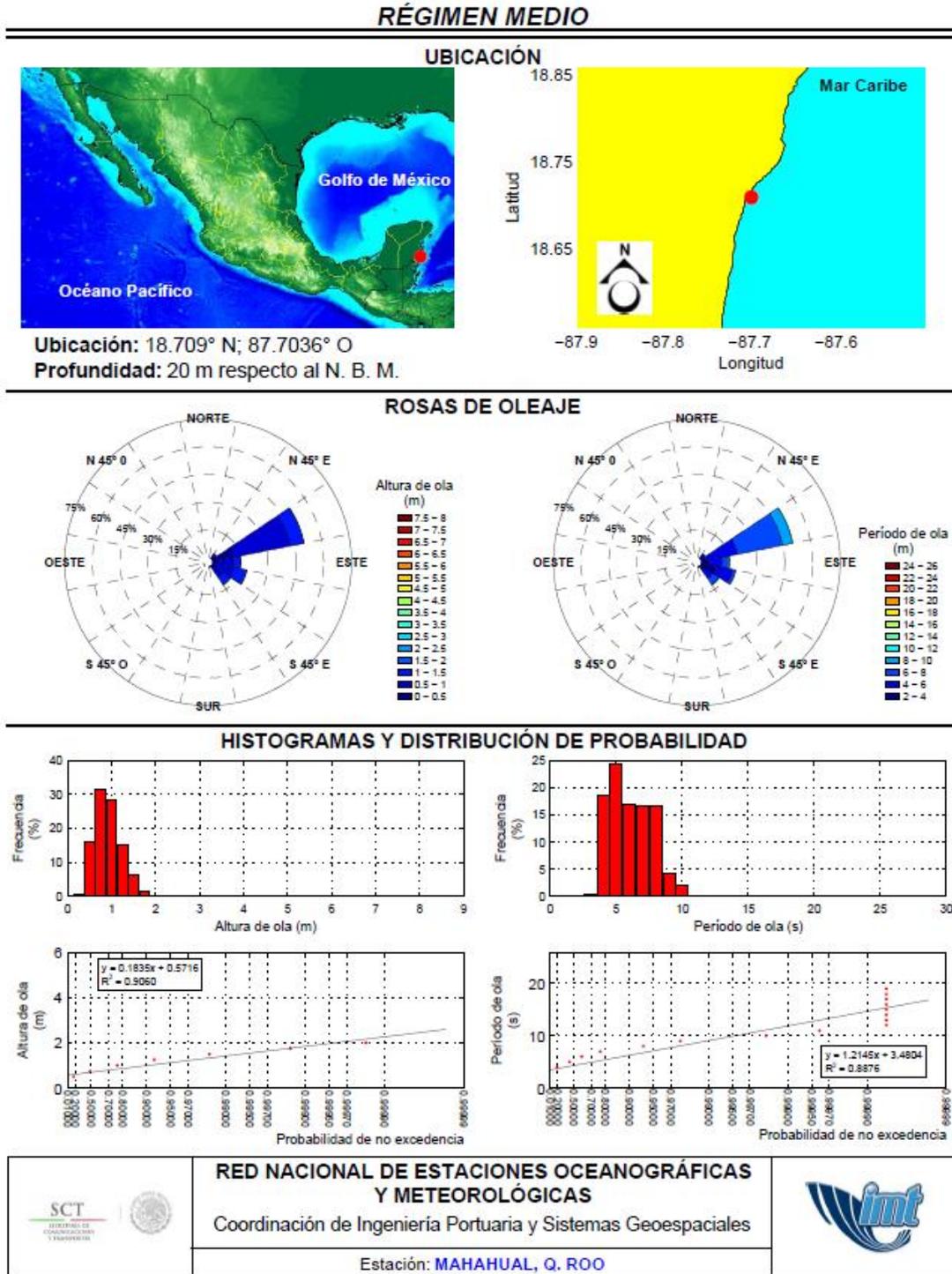
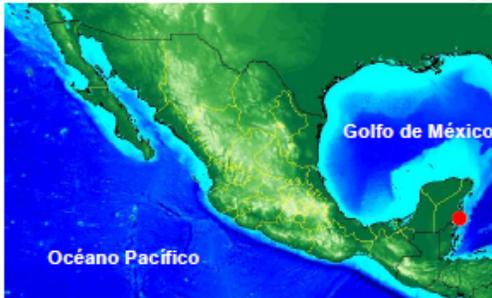


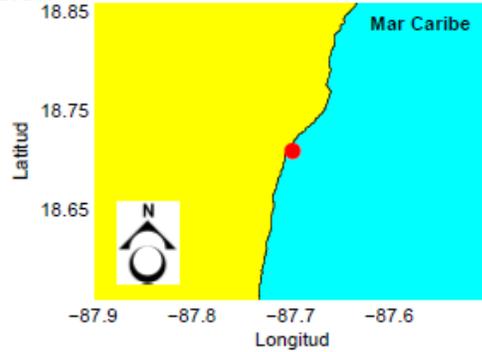
Figura 3.65 Caracterización del oleaje medio para el puerto de Mahahual, Q. Roo.

RÉGIMEN EXTREMAL

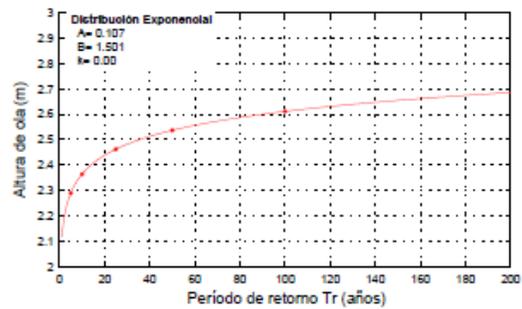
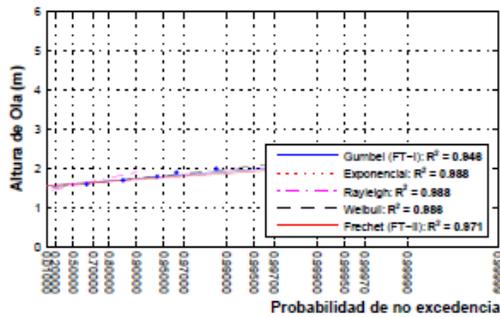
UBICACIÓN



Ubicación: 18.709° N; 87.7036° O
 Profundidad: 20 m respecto al N. B. M.

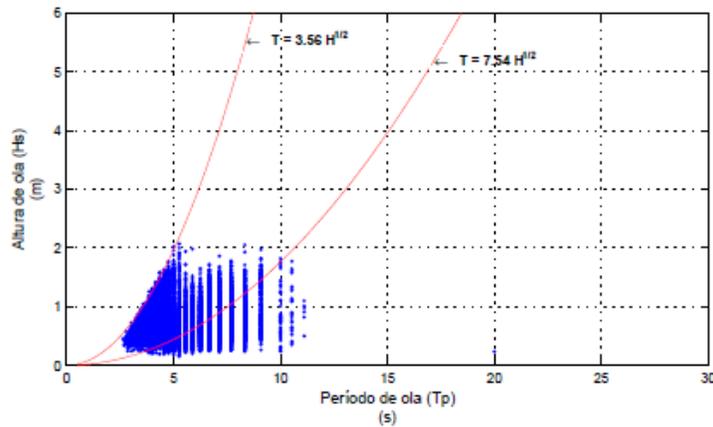


DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y ALTURA DE OLA/PERIODO DE RETORNO



* R = Coeficiente de correlación

CORRELACIÓN DE ALTURA DE OLA/PERÍODO



	<p>RED NACIONAL DE ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales Estación: MAHAHUAL, Q. ROO</p>	
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Figura 3.66 Caracterización del oleaje extremal para el puerto de Mahahual, Q. Roo.

Conclusiones

En este estudio la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales del Instituto Mexicano del Transporte realizó la caracterización de las mediciones del oleaje (estado de mar) que se han registrado con las boyas medidoras de oleaje direccional de la Red Nacional Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM), en 35 puertos mexicanos tanto del litoral del Océano Pacífico, del Golfo de México, así como del Mar Caribe y el Mar de Cortes. Con el trabajo, se generó información del comportamiento estadístico del oleaje representativo en las costas mexicanas, el cual se presenta de forma gráfica para cada sitio analizado y que servirá para: la planeación, el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de estructuras portuarias.

Los resultados muestran los análisis de la variable altura de ola significativa para dos condiciones conocidas como régimen medio y extremal. Del primero se obtienen las condiciones reinantes o más frecuentes para cada uno de los 35 puertos analizados. En los resultados obtenidos en el análisis extremal se prevé el comportamiento del oleaje extremo de magnitud variable estimando los periodos de retorno. En este análisis extremal se utilizó el método de máximos sobre un umbral, definiendo dicho límite con alturas de ola H_s mayores a 1.50 m. En este caso se estudiaron cinco distribuciones probabilísticas, Gumbel (FT-I), Exponencial, Rayleigh, Weibull y Frechet (FT-II); y se aplicó un parámetro de correlación para conocer cuál de las distribuciones se aproximó lo más posible a los datos medidos con las boyas. En los resultados también se incluye la gráfica del periodo de retorno con la distribución de probabilidad asociada y la correlación de altura de ola periodo de retorno para distinguir la ocurrencia de oleaje local con respecto a las ondas lejanas (mar de fondo).

Régimen Medio

Para representar las condiciones reinantes obtenidas mediante el análisis denominado régimen medio, los resultados se representan gráficamente en forma de rosas direccionales de oleaje, que muestran la distribución de la altura de ola significativa-dirección así como la distribución periodo pico - dirección, considerando rangos direccionales de 11.25° de amplitud e intervalos de altura de ola de 0.5 m. Con lo anterior, quedan caracterizadas de forma bastante aproximada las alturas de ola y los periodos más frecuentes; así como los eventos más severos registrados con las boyas a lo largo del litoral nacional, todo en función de la dirección de incidencia. Para este análisis se consideró el total de la muestra disponible en la base de datos de la RENEOM para cada sitio, sin separar oleaje local con respecto a las ondas lejanas.

Asimismo, como parte de la determinación del régimen medio, se presentan los histogramas de altura de ola y del periodo de ola, con los cuales, es posible conocer la frecuencia de acción de estas dos variables para cada sitio analizado. En los histogramas, la altura de ola está en metros, la variable periodo en segundos y en tanto por ciento la frecuencia de acción.

En esta misma sección, también se presenta la gráfica de la probabilidad de excedencia que permite determinar la probabilidad de presentarse una determinada altura de ola. Esta gráfica, de probabilidad, no separa eventos por dirección de incidencia, por lo que, la probabilidad de cada valor incluye muestras extraídas de todas las direcciones incidentes y esta probabilidad se obtiene como cociente entre la suma del número de observaciones en todas las direcciones y el número de observaciones válidas para cada familia definida.

A pesar de que las muestras de las características del oleaje en las que se basa este estudio no abarcan un periodo suficiente de observación, los regímenes medios obtenidos, en cualquier caso, pueden considerarse suficientemente satisfactorios para su utilización práctica.

Régimen Extremal

Como se indicó anteriormente, en este trabajo se estudiaron cinco distribuciones probabilísticas, Gumbel (FT-I), Exponencial, Rayleigh, Weibull y Frechet (FT-II). Con estas distribuciones se obtuvieron curvas con las que se buscó ajustar las mediciones a alguna de ellas. Los resultados muestran que ninguna de las cinco distribuciones ajusto satisfactoriamente el total de las mediciones; sin embargo, la distribución Exponencial y la Weibull representan satisfactoriamente una buena parte de la muestra en todos los casos.

Recomendaciones

Los resultados de este estudio deberán tomarse como una guía o fuente de consulta e información para los interesados en la materia y no pretende de manera alguna, suplir el criterio y experiencia del proyectista o consultor, como tampoco imponer criterios de diseño

Bibliografía

- [1] Tucker M. J. and Pitt E. G., “*Waves in ocean engineering*”, Elsevier ocean engineering book series, Vol. 5, Elsevier, USA, (2001)
- [2] Ward Donald L., Thompson Edward F. and Zhang Jun, “*Selection of a design wave height for coastal engineering*”, Advances in coastal structure design, American Society of Civil Engineers (ASCE), pp 116-134, USA, (2003)
- [3] Dirección General de Puertos, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Secretaria General Técnica, “Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM) 0.3-91 Oleaje Anejo I. Clima Marítimo en el Litoral Español”, España, (1992)
- [4] Castillo Ron Enrique, “Estadística de Valores Extremos Distribuciones Asintóticas”, Estadística Española, Num. 116, pp. 5-34, España, (1988)
- [5] Ortega Sánchez Joaquín, “Introducción a la teoría de valores extremos”, Octavo Congreso Latinoamericano de Sociedades de Estadística, Montevideo Uruguay, (2008)
- [6] Palisade Corporation, “@Risk Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft Excel”, USA, (2010)
- [7] Silva Casarín Rodolfo, “Análisis y Descripción Estadística del Oleaje”, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), Serie Docencia, SD/49, México, (2005)
- [A] Guide to wave analysis and forecasting, WMO-No. 702, 1998, second edition, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland
- [B] Y. Goda, “Wave Measurements and utilization of wave data”, Sixth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering, Gold Coast Australian, October 1983
- [C] Henk Jan Verhagen, Kees d’Angremond and Ferd van Roode, “Breakwaters and closure dams”, 2nd edition
- [D] Tema 2. Caracterización del oleaje, Ingeniería Marítima, ETSECCPB
- [E] Ibáñez Rosales Alejandro, “Análisis estadístico de valores extremos y aplicaciones”, Universidad de Granada, España, 2011, pp. 33-34

- [F] Elena Maggio Gloria, “Análisis estadístico de valores extremos – Aplicaciones en hidrología”, Noldor, S. R. L., Argentina, <http://www.noldor.com.ar>
- [G] Thompson Edward F., Harris Lee E., Leung Thomas, Moritz Heidi P. and Shak Arthur T. “Hydrodynamic analysis and design conditions”, EM 1110-2-1100 (Part II), USA, 2002



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>