



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE
PARA ISLAS DEL PACÍFICO MEXICANO**

TESIS

que para obtener el título de

OCEANÓLOGO

Presenta

PABLO DUARTE QUIROGA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. FRANCISCO JAVIER OCAMPO TORRES

México, B.C

Marzo, 2004

**EVALUACION DE LA ENERGIA DEL OLEAJE PARA ISLAS DEL PACIFICO
MEXICANO**

TESIS
que para obtener el título de
OCEANÓLOGO
presenta:

Pablo Duarte Quiroga

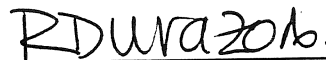
Aprobado por:



Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Director de Tesis



Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal



Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Sinodal

INDICE

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 INTRODUCCIÓN.....	1
I.2 ANTECEDENTES.....	2
I.3 OBJETIVOS.....	3
I.4 METODOLOGÍA.....	4
I.5 LIMITACIONES DEL MÉTODO APLICADO.....	18
 CAPITULO II.- RESULTADOS.....	 19
EVALUACION DEL RECURSO EN ISLAS DEL PACÍFICO MEXICANO	
II.1 CARACTERISTICAS DEL OLEAJE EN EL OCÉANO PACÍFICO.....	19
II.2 CASO I : ISLA GUADALUPE.....	20
II.2.1 Características Generales.....	20
II.2.1.1 Localización.....	20
II.2.1.2 Estadística Poblacional.....	21
II.2.1.3 Consumo de Energía.....	22
II.2.2 Caracterización del Oleaje Local.....	23
II.2.2.1 Variabilidad y Comportamiento Anual.....	23
II.2.2.2 Variabilidad y Comportamiento Estacional.....	27
II.2.2.3 Análisis de Oleaje Extremo.....	34
II.2.3 Estimación de la Energía del Oleaje.....	37
II.2.4 Interacción Ola-Dispositivo Tipo Rebase de Ola.....	45
II.2.5 Interacción Ola-Dispositivo Tipo Oscilante.....	48
II.3 CASO II : ISLA SOCORRO.....	51
II.3.1 Características Generales.....	51
II.3.1.1 Localización.....	51
II.3.1.2 Estadística Poblacional.....	51
II.3.1.3 Consumo de Energía.....	51
II.3.2 Caracterización del Oleaje Local.....	53
II.3.2.1 Variabilidad y Comportamiento Anual.....	53
II.3.2.2 Variabilidad y Comportamiento Estacional.....	57
II.3.2.3 Análisis de Oleaje Extremo.....	64
II.3.3 Estimación de la Energía del Oleaje.....	67
II.3.4 Interacción Ola-Dispositivo Tipo Rebase de Ola.....	75
II.3.5 Interacción Ola-Dispositivo Tipo Oscilante.....	78
II.4 CASO III : ISLA MADRE MARÍA.....	81
II.4.1 Características Generales	81
II.4.1.1 Localización.....	81
II.4.1.2 Estadística Poblacional.....	81

II.4.1.3	<i>Consumo de Energía.....</i>	81
II.4.2	Caracterización del Oleaje Local.....	83
II.4.2.1	<i>Variabilidad y Comportamiento Anual.....</i>	83
II.4.2.2	<i>Variabilidad y Comportamiento Estacional.....</i>	87
II.4.2.3	<i>Análisis de Oleaje Extremo.....</i>	94
II.4.3	Estimación de la Energía del Oleaje.....	97
II.4.4	Interacción Ola-Dispositivo Tipo Rebase de Ola.....	105
II.4.5	Interacción Ola-Dispositivo Tipo Oscilante	108

CAPITULO III.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

III.1	DISCUSIONES.....	111
III.2	CONCLUSIONES.....	120
III.3	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	123

BIBLIOGRAFÍA.....	124
--------------------------	------------

I. LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
$H_s, H_{1/3}$	Altura significativa
Tm_2	Período a partir del segundo momento espectral
θ_m	Dirección media del oleaje
m_0	Energía total del oleaje
$S(f, \theta)$	Espectro direccional en la frecuencia y dirección total
η^2	Varianza de la elevación superficial del n.m.m
η	Elevación superficial del n.m.m
η_{rms}	Raíz cuadrática media de la elevación superficial
f_p	Frecuencia pico
$T_{1/3}$	Período significativo
$\bar{T}$	Promedio del período
$S(f)$	Espectro de frecuencia
$G(f; \theta)$	Distribución direccional
N	Número de olas totales
F_{Hmax}	Frecuencia de la altura de ola máxima
H_{max}	Altura de ola máxima en un registro
R	Excedencia
$\bar{r}$	Promedio de excedencias
N_f	Número de observaciones futuras
n_p	Número de observaciones pasadas
m	Lugar m-ésimo mas grande de las n observaciones pasadas
σ^2	Varianza
r_t	Intervalo de tiempo
$F(H)$	Probabilidad de distribución de la altura de ola
T_R	Intervalo de tiempo entre una ola y otra de la misma altura
L	Tiempo de vida de una estructura
Pe	Probabilidad de reincidencia
H	Altura de ola

Símbolo	Significado
ρ	Densidad del agua de mar (1025 Kg/m ³)
ω	Frecuencia rotacional
a	Amplitud de la ola
k	Número de la ola
g	Gravedad (9.81 m/s ²)
λ	Longitud de onda
E_T	Energía total
E_c	Energía cinética
E_p	Energía potencial
P	Potencia o energía de transporte de la ola
P_d	Densidad de la potencia
η_1	Desplazamiento interno de la superficie libre a partir de su posición en el equilibrio
$\overline{H}_1$	Altura de ola que incide sobre una estructura
v_1	Velocidad del aire adyacente para la superficie libre interna
v_2	Velocidad axial en el pasaje de la turbina
A_1	Área de flujo de la cámara de captura
A_2	Área de flujo del pasaje de la turbina
D_1	Diámetro de la cámara de captura
D_2	Diámetro del pasaje de la turbina
P_n	Potencia disponible para una turbina del tipo columna oscilante
Q	Gasto del volumen del flujo del aire a través de una turbina del tipo columna oscilante
p_o	Presión de escape
p_1	Presión inferior
p_2	Presión superior
φ_1, φ_2	Potenciales de velocidad
L_1	Longitud de agua en la columna de agua
f_c	Frecuencia natural del movimiento de las olas internas
ω_c	Frecuencia rotacional natural, del movimiento de las olas internas

Símbolo	Significado
η_{ef}	Eficiencia de un dispositivo del tipo columna oscilante
R_c	Altura de rampa de rebase de ola
P_{ov}	Probabilidad de que un rebase de ola ocurra en estructuras verticales y diques
c	Constante de la pendiente de una rampa $c = 1.21$
P_V	Probabilidad de una descarga por ola
V	Volumen de una ola
V_W	Volumen que entra por ola en un dispositivo de rebase de ola
q	Gasto o flujo promedio del rebase
T_m	Período medio
L_c	Longitud de la curvatura de la cresta
T_p	Período pico
C_D	Coefficiente de reducción para el esparcimiento direccional $C_D = 0.9$
H_d	Altura de diseño
W	Watts
f_m	Frecuencia asociada al pico espectral
E_m	Densidad de energía espectral máxima
θ	Dirección del Oleaje
Hs_m	Altura de ola con mayor ocurrencia en un registro
P_m	Probabilidad máxima de una altura significativa o periodo promedio en un registro
T	Período de una ola
Hz	Hertz
NMM	Nivel Medio del Mar
h_p	Altura potencial
U_{10}	Vector U de la velocidad de viento a los 10 metros
V_{10}	Vector V de la velocidad de viento a los 10 metros
F_H	Frecuencia de una altura de ola dada

II. LISTA DE FIGURAS

Figura	Pagina
Figura 1. Principio de los convertidores de energía del oleaje, mediante una columna oscilante de agua. Modificado de McCormick (1981)	13
Figura 2. . Principio de los convertidores de energía del oleaje por rebase de ola, modificado de Soerensen et al, (2000).	17
Figura 3. Altura significativa del Océano Pacífico para el 14 de Enero de 1984	19
Figura 4. Localización de la Isla de Guadalupe, México y el nodo generado por el modelo WAM (*)	21
Figura 5. Consumos de Energía Mensual para la Isla de Guadalupe en MW/h	22
Figura 6.- Comportamiento Anual del Espectro Direccional del Oleaje, en Isla Guadalupe.	24
Figura 7.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1953, 1969 y 1976 en Isla Guadalupe	25
Figura 8.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1982, 1994 y 1998 en Isla Guadalupe	26
Figura 9. Variabilidad Estacional del Espectro Direccional del Oleaje para 1993, en Isla Guadalupe	27
Figura 10.- Distribuciones Bi-variadas para el invierno de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe	30
Figura 11.- Distribuciones Bi-variadas para la primavera de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe	31
Figura 12.- Distribuciones Bi-variadas para el verano de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe	32
Figura 13.- Distribuciones Bi-variadas para el otoño de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe	33
Figura 14.- Distribución Gumbel de Máximos para el registro histórico de 1948 al 2002, en Isla Guadalupe	34
Figura 15.- Probabilidad de que la ola de diseño sea igual o sea excedida para diferentes tiempos de vida de la estructura, en Isla Guadalupe.	36

Figura	Pagina
Figura 16.- Distribución de la Potencia Teórica Total por unidad de ancho (kW/m), del registro histórico (1948-2002), en Isla Guadalupe	37
Figura 17.- Distribución de la Potencia Teórica Total anual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Guadalupe	38
Figura 18. Distribución de la Potencia Teórica Total estacional, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Guadalupe	40
Figura 19.- . Distribución de la Potencia Teórica Total mensual, por unidad de ancho (KW/m), en Isla Guadalupe para 1993	42
Figura 20.- Porcentaje de ocurrencia promedio anual y estacional de los primeros 10 estados de mar y la suma de potencias por unidad de ancho, mínima y máxima de los mismos, en Isla Guadalupe	44
Figura 22.- Potencia disponible para la turbina contra el porcentaje de eficiencia para 5 combinaciones de diámetro de entrada y salida del dispositivo oscilante en Isla Guadalupe	50
Figura 23.- Localización de Isla Socorro, México y el nodo generado por el modelo WAM (*)	52
Figura 24.- Comportamiento Anual del Espectro Direccional del Oleaje en Isla Socorro	54
Figura 25.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1955, 1970 y 1981 en Isla Socorro	55
Figura 26.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1987, 1998 y 2000 en Isla Socorro	56
Figura 27.- Variabilidad Estacional del Espectro Direccional del Oleaje para 1994, en isla Socorro	57
Figura 28.- Distribuciones Bi-variadas para el invierno de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro	60
Figura 28.- Distribuciones Bi-variadas para el invierno de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro	60
Figura 29.- Distribuciones Bi-variadas para primavera de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro	61

Figura	Pagina
Figura 30.- Distribuciones Bi-variadas para verano de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro: a) Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , b) Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), c) Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})	62
Figura 31.- Distribuciones Bi-variadas para Otoño de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro	63
Figura 32.- Distribución Gumbel de Máximos para el registro histórico de 1948 al 2002 en Isla Socorro	64
Figura 33.- Probabilidad de que la ola de diseño sea igual o sea excedida para diferentes tiempos de vida de la estructura, en Isla Socorro.	66
Figura 34.- Distribución de la Potencia Teórica Total por unidad de ancho (kW/m), del registro histórico (1948-2002), en Isla Socorro	67
Figura 35.- Distribución de la Potencia Teórica Total anual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Socorro	68
Figura 36. Distribución de la Potencia Teórica Total estacional, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Socorro	70
Figura 37.- Distribución de la Potencia Teórica Total mensual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Socorro, para 1994	72
Figura 38.- Porcentaje de ocurrencia promedio anual y estacional de los primeros 10 estados de mar y la suma de potencias por unidad de ancho, mínima y máxima de los mismos, en Isla Socorro	74
Figura 39. Interacción oleaje-dispositivo para 5 alturas de rampa en Isla Socorro a) Probabilidad de Rebase de ola (P_{ov}), b) Probabilidad de Volumen de agua (P_v), c) flujo (q) y d) volumen por ola promedio (V_w)	77
Figura 40. Potencia disponible para la turbina contra el porcentaje de eficiencia para 5 combinaciones de diámetro de entrada y salida del dispositivo oscilante en Isla Socorro	80
Figura 41.- Localización de Isla Madre Maria, México y el nodo generado por el modelo WAM (*)	82
Figura 42.- Comportamiento Anual del Espectro Direccional del Oleaje en Isla Madre María.	84
Figura 43.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1957, 1975 y 1987 en Isla Madre Maria	85

Figura	Pagina
Figura 44.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1994, 1998 y 2001 en Isla Madre María	86
Figura 45.- Variabilidad Estacional del Espectro Direccional del Oleaje para 1990 en Isla Madre Maria	87
Figura 46.- Distribuciones Bi-variadas para el invierno de 1975, 1994, 1998 y 2001, en Isla Madre Maria	90
Figura 47.- Distribuciones Bi-variadas para primavera de 1975, 1994, 1998 y 2001, en Isla Madre Maria	91
Figura 48.- Distribuciones Bi-variadas para verano de 1975, 1994, 1998 y 2001, en Isla Madre Maria	92
Figura 49.- Distribuciones Bi-variadas para otoño de 1975, 1994, 1998 y 2001 en Isla Madre Maria	93
Figura 50.- Distribución Gumbel de Máximos para el registro histórico de 1948 al 2002 en Isla Madre Maria	94
Figura 51 Probabilidad de que la ola de diseño sea igual o sea excedida para diferentes tiempos de vida de la estructura, en Isla Madre Maria	96
Figura 52.- Distribución de la Potencia Teórica Total por unidad de ancho (kW/m), del registro histórico (1948-2002), en Isla Madre María	97
Figura 53.- Distribución de la Potencia Teórica Total anual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Madre Maria	98
Figura 54. Distribución de la Potencia Teórica Total estacional, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Madre Maria	100
Figura 55.- Distribución de la Potencia Teórica Total mensual, por unidad de ancho (KW/m), en Isla Madre María, para 1994	102
Figura 56.- Porcentaje de ocurrencia promedio anual y estacional de los primeros 10 estados de mar y la suma de potencias por unidad de ancho, mínima y máxima de los mismos, en Isla Madre María.	104
Figura 60. Interacción oleaje-dispositivo para 5 alturas de rampa en Isla Madre María a) Probabilidad de Rebase de ola (P_{ov}), b) Probabilidad de Volumen de agua (P_v), c) flujo (q) y d) volumen por ola promedio (V_w)	107
Figura 61.- Potencia disponible para la turbina contra el porcentaje de eficiencia para 5 combinaciones de diámetro de entrada y salida del dispositivo oscilante en Isla Madre María.	110

III. LISTA DE TABLAS

Tabla	Pagina
Tabla I.- Resumen de las Características del Oleaje del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en la Isla de Guadalupe	23
Tabla II. Máximos anuales para el registro histórico, dispuestos de menor a mayor para la Isla de Guadalupe.	35
Tabla III.- Altura de Diseño para diferentes excedencias promedio ($\bar{r}$) y diferentes periodos, a partir de los máximos anuales en Isla Guadalupe.	35
Tabla IV. Probabilidad de ocurrencia y potencia por unidad de ancho, para los 10 estados de mar más representativos, del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en Isla Guadalupe.	43
Tabla V. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $R_c = 0.3 \text{ m}$ en Isla Guadalupe	45
Tabla VI. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $R_c = 0.9 \text{ m}$.	46
Tabla VII. Potencia Neumática disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más representativos, para un diámetro de entrada $D_1 = 0.5 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 0.1 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 0.5 \text{ m}$, en Isla Guadalupe.	48
Tabla VIII. Potencia Neumática disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más representativos, para un diámetro de entrada $D_1 = 3.0 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 0.3 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 1.2 \text{ m}$, en Isla Guadalupe	49
Tabla IX. Potencia disponible para una turbina y la eficiencia del dispositivo, a diferentes diámetros de entrada, salida y longitud sumergida en Isla Guadalupe	49
Tabla X.- Resumen de las Características del Oleaje del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en Isla Socorro.	53
Tabla XI. Máximos anuales para el registro histórico, ordenados de menor a mayor para la Isla Socorro.	65
Tabla XII.- Altura de Diseño para diferentes excedencias promedio ($\bar{r}$) y diferentes periodos, a partir de los máximos anuales en Isla Socorro.	65

I.1 INTRODUCCIÓN

El océano nos ofrece una gran variedad de recursos energéticos renovables que deben ser tomados en consideración para su utilización. Entre las mas prometedoras se encuentran las mareas, la energía térmica del océano y el oleaje, las cuales podrían satisfacer la demanda de energía de la población en zonas costeras e insulares.

El uso del oleaje como una fuente alterna de energía, se presenta hoy en día como una posibilidad, su utilización comercial ya es una realidad en países como Inglaterra, donde la compañía Wavegen en consorcio con la Universidad de Belfast (QUB) y la comunidad Europea, han instalado un dispositivo costero de generación de energía a partir de las olas en la isla de Islay en Escocia, el cual está conectado a la red eléctrica de la Isla, para una potencia anual promedio de entre 15 y 25 kW/m para dos generadores de 250 kW cada uno (Wavegen, 2002). Otros países como Australia, Japón, China, Noruega y Dinamarca, se encuentran avanzados en la materia y planean instalar sus propios dispositivos de conversión de energía de oleaje como parte de su red eléctrica (Colmes, 2003).

El diseño y desarrollo de estos dispositivos, deben partir del estudio y evaluación del recurso en las zonas de interés. El presente estudio permitirá conocer la disponibilidad del recurso y decidir si puede ser considerada como una opción viable, donde junto con la utilización de otras fuentes alternas de energía, seria una solución para satisfacer la demanda de energéticos en nuestro país.

Las islas del Pacífico Mexicano, en particular, ofrecen un alto potencial para el uso de este tipo de tecnologías, donde el alto costo de la energía, la dependencia de combustibles fósiles, su difícil transportación, su aislamiento de la red eléctrica nacional, los bajos consumos de energía y su baja densidad poblacional permiten a las fuentes alternas de energía, como la del oleaje competir, y presentarse como una posibilidad real.

I.2 ANTECEDENTES

El aprovechar el oleaje para producir energía, es algo que ha despertado la imaginación de muchos hombres. Un número bastante considerable de dispositivos han sido diseñados para convertir la energía del oleaje en energía eléctrica, sin embargo muy pocos han sido probados en el mar y muchos menos, han salido bien librados de él. Las experiencias no han sido muy alentadoras a lo largo de la historia, sin embargo debido a la crisis petrolera de 1973, estas tecnologías han tenido un gran impulso (Padilla, 1989). En los últimos 20 años, prototipos de convertidores, basados en un mejor entendimiento del oleaje y su interacción con estructuras han arrojado resultados mas alentadores, principalmente en los últimos 5 años, donde estos sistemas han tenido grandes avances y han cambiado muchas veces de manera radical los dispositivos propuestos y la manera de evaluar el recurso (Horpe, 2000). Los antecedentes mencionados en este trabajo, mencionan principalmente los trabajos enfocados en la evaluación del recurso.

Estimaciones del recurso en base al modelo WAM (Wave Model), han sido realizados principalmente por los países europeos a través del proyecto WERATLAS, creado en 1998 con el objetivo principal de producir un atlas del recurso de la energía del oleaje de los estados de la comunidad Europea y Noruega (Lewis, 2003). El atlas contiene características del oleaje y una evaluación de su energía, anual y estacional, en punto distribuidos a lo largo de la costa Europea. La información es presentada en 85 localidades, 41 en el Atlántico y 44 en el mediterráneo. Los registros del oleaje comprenden de 1987 a 1994 en el Atlántico y de 1992 a 1995 para el Mediterráneo. Este proyecto fue realizado por el Instituto Nacional de Ingeniería de Portugal (Pontes *et al*, 2003). Algunos de los trabajos mas recientes sobre la evaluación del recurso en costas Europeas han sido realizados por este instituto.

Otro Atlas generado para caracterizar la energía del oleaje, con el modelo WAM, fue llevado a cabo por la compañía oceanográfica de Noruega, Oceanor. Generando un atlas que cubre grandes partes del mundo llamado WWA (World Wave Atlas), utilizando datos obtenidos del GEOSAT con un registro que va desde 1986 al 2000 (Oceanor, 2003). Estimaciones de la energía del oleaje realizadas en islas del Pacífico Sur han sido

realizadas por Barstow Stephen (1996), en colaboración con el gobierno Noruego, donde propusieron esta zona como ideal, para el desarrollo de convertidores de oleaje.

En México muy poco se ha hecho en la evaluación y utilización de este recurso. Algunas investigaciones anteriores a este trabajo han sido realizadas por Padilla-Hernández (1989) y Cerca-Martínez (1995), realizando estimaciones de energía para la zona de Rosarito, B.C, proponiendo un convertidor de oleaje del tipo Salter's Duck.

Trabajos referentes al diseño de nuevos dispositivos o mejoramiento de los actuales en México, han sido realizados por Rivas Cáceres (1992) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y mas recientemente por Czitrom *et al* (2000) y Ruiz *et al* (1994), del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de Baja California (UNAM).

I.3 OBJETIVOS:

- Determinar las características del oleaje en las Islas; Guadalupe, Madre María y Socorro, ubicadas en el Pacífico Mexicano
- Estimar la potencia del oleaje en dichas islas y la interacción del mismo con dos dispositivos; uno por rebase de ola y el otro por una columna oscilante de agua.
- Establecer una metodología para el análisis y selección de localidades potenciales a aprovechar el recurso del oleaje como fuente alterna de energía.

I.4 METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este trabajo, se puede dividir de la siguiente forma:

- I. Cálculo de variables del oleaje usando el modelo numérico para la simulación del oleaje, WAM.
- II. Determinación de las características del oleaje local en las áreas propuestas
- III. Estimación de la energía del oleaje y la interacción ola-dispositivo

I. Obtención de los datos a partir del modelo WAM:

Campos de Viento: El modelo WAM (Wave Model), ciclo 4, fue alimentado con la velocidad de viento a 10 metros de altura (U_{10} y V_{10}). Los campos de viento fueron obtenidos para el período de 1948-2002, por el programa de reanálisis de los centros NCEP (National Center for Environmental Prediction y NCAR (National Center for Atmospheric Research), los cuales de manera conjunta, recopilan datos atmosféricos de mediciones hechas en estaciones terrestres, barcos, aviones, boyas y satélites, de diferentes agencias y países. Basándose en estos datos se realizó el análisis e interpolación de la información en una malla global de datos de viento de 144 x 73 puntos con una resolución de 2.5 grados en latitud y longitud, con un intervalo de tiempo de 6 horas, durante los últimos 54 años (Kalnay *et al*, 1999).

Modelo WAM: Las características espectrales y estadísticas del oleaje, como, la altura significativa (H_s), periodo a partir del segundo momento espectral (T_{m2}) y dirección media del oleaje (θ_m), se obtuvieron a partir de corridas del modelo WAM para todo el Océano Pacífico, desde el 3 de Enero del 1948 hasta el 8 de Diciembre del 2002. La resolución de este modelo para el Océano Pacífico se estableció con una resolución espacial de un grado por un grado, teniendo una malla de 181 x 141 puntos de latitud y longitud respectivamente. El modelo generó archivos de salida para las áreas de estudio, con datos horarios de las características del oleaje, para los 54 años de corridas, obteniéndose una serie de tiempo de 481,577 datos horarios por cada localidad. En el apéndice B se trata con

más detalle la estructura del modelo WAM y la validación del mismo, realizado para este trabajo.

Dado que los parámetros estadísticos de altura significativa (H_s), periodo a partir del segundo momento espectral (T_{m2}) y dirección media del oleaje (θ_m), reflejan junto con la descripción espectral de las olas dos aspectos del mismo fenómeno físico (Goda, 1985), se obtuvieron estos parámetros estadísticos a partir de los espectros direccionales obtenidos por el modelo WAM. La energía total de la ola m_0 , se obtiene integrando el espectro direccional en frecuencia y dirección: dado por la siguiente ecuación:

$$m_0 = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(f, \theta) d\theta df \quad [1.1]$$

La integral, que tiene unidades de área (m^2 o cm^2), es por definición del espectro del oleaje igual a la variancia de la elevación de la superficie (Goda, 1985), por lo que;

$$m_0 = \overline{\eta^2} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \eta^2 dt \quad [1.2]$$

El valor de la raíz cuadrática media, de la elevación superficial esta dado por;

$$\eta_{rms} = \sqrt{\overline{\eta^2}} = \sqrt{m_0} \quad [1.3]$$

Esta raíz cuadrática media, guarda cierta relación con la altura significativa, cuando la altura significativa sigue la distribución Rayleigh, por lo que es igual a;

$$H_{1/3} = 4.004 \eta_{rms} = 4.004 \sqrt{m_0} \quad [1.4]$$

La proporción entre la altura significativa y la elevación superficial, ha sido confirmada por muchos registros de observaciones tomados alrededor del mundo (Goda, 1985). El coeficiente de proporción es ligeramente diferente que el tomado de la distribución de Rayleigh. La altura significativa está mejor expresada por la relación

promedio $H_{1/3} = 3.8\sqrt{m_0}$ para aguas profundas, sin embargo el coeficiente de proporcionalidad tiende a incrementarse a un valor de 4.0 o mayor (Goda, 1985).

La frecuencia pico f_p del espectro, tiene relación con el período significativo $T_{1/3}$ por la siguiente ecuación:

$$f_p = 1/(1.05T_{1/3}) \quad [1.5]$$

Otro período que puede ser obtenido a partir del espectro es el periodo promedio $\bar{T}$. De acuerdo a la teoría estadística de olas aleatorias, el período promedio del oleaje esta definido por el método de cruces por cero dado por el segundo momento del espectro de frecuencia como;

$$\bar{T} = \sqrt{m_0 / m_2}; \quad \text{donde,} \quad m_2 = \int_0^{\infty} f^2 S(f) df \quad [1.6]$$

Esta relación es comúnmente utilizada cuando la información del período es tomada del espectro de oleaje. Sin embargo ha habido reportes donde la ecuación anterior produce períodos más cortos que los tomados por el perfil de oleaje (Goda, 1985)

II. Determinación de las características del Oleaje Local:

Análisis y Procesamiento de Datos: Cuando uno observa las olas se encuentra con dos características importantes: su aleatoriedad y cuasi-regularidad. El perfil del oleaje cambia constantemente con el tiempo y de una manera aleatoria. Consecuentemente las propiedades del oleaje no son realmente definidas en una base de ola por ola (Massel, 1998). Debido a esto el análisis, predicción y caracterización de este fenómeno, usualmente se divide, en tres dominios básicos: tiempo, frecuencia y probabilidad.

Dominio de la Frecuencia: En un registro de oleaje aparecen comúnmente olas con diferentes alturas, períodos y ángulos de arribo, variando significativamente con el tiempo,

estos registros son comúnmente representados utilizando modelos espectrales de Fourier (Young, 1999). Este implica la evaluación de la distribución de la energía del oleaje en varias frecuencias y direcciones.

Dominio de la Probabilidad: Los parámetros particulares del oleaje a un tiempo dado, dirección, período, altura, etc. Son considerados como eventos aleatorios, por lo que los resultados finales están expresados en términos de la función de la densidad, de la probabilidad, distribución y momentos estadísticos.

Dominio del Tiempo: El oleaje es un proceso afectado por eventos que lo cambian a pequeño, mediano y largo plazo, por lo que para una mejor caracterización y estimación del recurso podemos dividirlo en tres escalas de tiempo;

Corto Plazo: Son los cambios en el estado de mar, así como las frecuencias de las olas para establecer estrategias de control (Holmes, 2003). Este último no será tocado en este trabajo, ya que es necesario, contar con mediciones puntuales y completas del área de estudio.

Mediano Plazo: Anuales y estacionales, donde las características del oleaje, presentan sus cambios más visibles y en base a estos se realizan las estimaciones de energía.

Largo Plazo: Esta escala involucra los eventos extremos que ocurren en períodos que van desde 10, 25, 50 hasta 100 años. El análisis de estos eventos que pueden dañar o destruir una estructura costera o fuera de la costa, es necesario para estimar el período de vida de dicha estructura (Massel, 1998). Un análisis estadístico de datos extremos y probabilidad de reincidencia son realizados.

La caracterización del oleaje cubriendo los tres dominios básicos se realiza con los siguientes análisis

- a) **Espectro Direccional**
- b) **Distribuciones Conjuntas (H_s , Tm_2 y θ_m)**
- c) **Análisis Estadístico de Datos Extremos**

a) Espectro Direccional:

Las olas en el océano no pueden ser adecuadamente descritas usando el espectro de frecuencias únicamente, ya que en el oleaje existen varias componentes, propagándose en varias direcciones (Goda, 1985). El espectro direccional nos da una representación de la distribución de la energía, tanto en la frecuencia como en la dirección, este es generalmente expresado de la siguiente manera;

$$S(f, \theta) = S(f) G(f; \theta) \quad [2.1]$$

Donde $S(f, \theta)$, es la función de densidad espectral en frecuencia y la dirección del oleaje, o simplemente el espectro direccional del oleaje, $S(f)$ es la distribución en frecuencia de la energía del oleaje o el espectro en frecuencia y $G(f; \theta)$ es la distribución direccional (Goda, 1985).

b) Distribuciones Conjuntas:

Se realizaron tablas y gráficas de distribuciones conjuntas, los cuales nos permiten ver la densidad de valores conjuntos en términos de su probabilidad o frecuencia, con lo cual se conocen, los valores dominantes, en un tiempo dado. Las distribuciones conjuntas usadas son las siguientes:

Distribución Conjunta H_s y T_{m2} : Esta distribución es por mucho la más utilizada, nos permite conocer las combinaciones de altura y periodo más representativos en un punto dado.

Distribución Conjunta H_s y θ : La distribución direccional de la altura significativa es esencial en el diseño de la estructura y en la obtención de energía en un dispositivo direccional.

Distribución Conjunta T_{m2} y θ : La distribución direccional del periodo nos es útil como las anteriores para el diseño de las estructuras y de particular interés en dispositivos de rebase de ola.

c) Análisis Estadístico de datos extremos:

Un paso clave para el diseño de estructuras en la costa y fuera de ella, se basa en la apropiada estimación de los parámetros del oleaje. Estos parámetros deben estar relacionados a los parámetros extremos en un período de tiempo largo (Massel, 1998).

Distribución de Olas extremas:

Gracias a que se cuenta con un período largo de datos, nos es posible estimar el oleaje extremo, que esperamos en los próximos 50 años. La base para la predicción del oleaje extremo es el desarrollo asintótico de la función de probabilidad para el máximo de la variable aleatoria relevante (Massel, 1998). Para predicciones de tiempos largos donde el número de olas N tiende a infinito ($N \rightarrow \infty$), el desarrollo asintótico debe ser conocido.

$$F_{H_{\max}}(H_{\max}) = [F_H(H_{\max})]^N = \exp[N \ln F_H(H_{\max})] \quad [2.2]$$

Si $N \rightarrow \infty$, $\ln F_H(H_{\max}) \rightarrow 0$, luego la probabilidad es $F_{H_{\max}}(H_{\max})$

Donde:

F_H = Frecuencia de una altura de ola dada

$F_{H_{\max}}$ = Frecuencia de la altura de ola máxima

$H_{\max}$ = Altura de ola máxima en el registro

Análisis de Excedencias:

La estadística utilizada es relativamente sencilla, parte de la necesidad de determinar la probabilidad de que en las próximas N -observaciones, se produzcan r excedencias de la observación que ocupa el lugar m -ésimo más grande de las n_p observaciones pasadas. Se puede demostrar que el número de estas excedencias r , es una variable aleatoria con media igual a:

$$\bar{r}(n_p, m, N_f) = \int_0^1 N_f p_m f(p_m) dp_m = N_f \mu U_{m:n} = \frac{N_f m}{n_p + 1} \quad [2.3]$$

Donde:

N_f = Número de observaciones futuras

m = Lugar m -ésimo mas grande de las n_p observaciones pasadas

n_p = Número de observaciones medidas con anterioridad

La varianza σ^2 esta determinada por la siguiente relación:

$$\sigma^2(n_p, m, N_f) = \frac{N_f m (n_p - m + 1) (N_f + m + 1)}{(n_p + 1)^2 (n_p + 2)} \quad [2.4]$$

Las expresiones anteriores permiten elegir el valor de diseño, cuando hay suficientes años de observación, pero es inútil cuando la información es escasa (Silva, 2001).

Probabilidad de Reincidencia:

El procedimiento de selección de la altura de ola es usualmente descrita en términos de su probabilidad de reincidencia. La forma no dimensional de esta probabilidad es conocida como el tiempo esperado, (T_R/r_t) , en donde r_t es el intervalo de tiempo entre los puntos de medición (en el caso de que cada punto correspondiera al valor mas alto del año, r_t seria igual a un año). Conociendo la probabilidad que ha sido construida a partir de los datos observados a partir de la ecuación 2.2, podemos relacionar el tiempo esperado T_R/r_t con la probabilidad de distribución $F(H)$, (Massel, 1998).

$$\frac{T_R}{r_t} = \frac{1}{1 - F(H)} \quad [2.5]$$

Si $\frac{T_R}{r_t} > 7$, la relación con la distribución de probabilidad $F(H)$ puede ser simplificada (Isaacson y Mackenzie, 1981, tomado de Massel, 1998);

$$\frac{T_R}{r_t} \approx \frac{1}{2} + \exp(y) \quad [2.6]$$

Donde; $y = -\ln [-\ln(F(H))]$. En consideraciones de diseño un factor adicional, como el tiempo en el cual la estructura esta expuesta a un riesgo (El llamado tiempo de vida de la estructura L), debe ser tomada en cuenta. Por lo tanto la probabilidad Pe que la ola de diseño sea igual o excedida durante el tiempo de vida de la estructura L es igual a:

$$Pe = 1 - \left(1 - \frac{r_t}{T_R} \right)^{L/r_t} \quad [2.7]$$

T_R y L están expresados en años. Si r_t esta asociado con la ola más grande durante un año, la ecuación 2.7 toma la forma de:

$$Pe = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^L \quad [2.8]$$

III. Estimación de la energía total del oleaje en base a sus características y su interacción ola-dispositivo.

a) *Obtención de la Energía Teórica Total del Oleaje:*

La energía total (E_T), en una ola por unidad de superficie es igual a la energía cinética (E_c) de las partículas del agua más su energía potencial (E_p) con respecto al nivel medio del mar. La energía cinética es igual a la energía potencial, en una ola

$$E_T = E_c + E_p = \frac{1}{4} \rho g a^2 \lambda + \frac{1}{4} \rho g a^2 \lambda = \frac{1}{2} \rho g a^2 \lambda \quad [J] \quad [3.1]$$

A partir de que $T = 2\pi/\omega$, donde ω , es la frecuencia rotacional y la altura de ola es $H = 2a$, tenemos que la potencia o el transporte de energía de la ola, para aguas profundas $kh \gg 1$ es (Falnes, 2002):

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \quad [W / m] \quad [3.2]$$

Tenemos que para H_s y T , una aproximación de la potencia (Shaw, 1982), es;

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T \quad [W / m] \quad [3.3]$$

b) Descripción de los Estados de Mar:

A partir de las tablas de distribución conjunta se realizaron tablas de diseño, que fueron utilizadas para establecer los estados de mar más representativos, es decir las combinaciones de H_s y T_{m2} , más recurrentes. Estos son utilizados para evaluar la interacción del oleaje con los dispositivos y establecer algunas consideraciones de diseño de los mismos.

c) Interacción del Oleaje – Dispositivo:

En esta etapa se consideran los principios fundamentales del dispositivo y su interacción con el oleaje incidente. Se estima la fracción de energía del oleaje que es transformada en otro tipo de energía (neumática, potencial, cinética, etc.). Basándose en los estados de mar descritos se obtiene la energía del oleaje teórica, para dos de los dispositivos más maduros y prometedores hasta el momento. En este trabajo, algunas simplificaciones se hacen al modelar la interacción de las olas con las estructuras. Si el objetivo es probar o diseñar un convertidor de oleaje, mas estudios deben ser tomados en cuenta. En el apéndice C se expone más detalladamente las consideraciones que deben ser tomados en cuenta en el momento de modelar la interacción de las estructuras con el oleaje además de una revisión de los convertidores de oleaje propuestos

c.1) Columna Oscilante de Agua:

En algunos sistemas de conversión, la energía del oleaje es transferida a una forma de energía secundaria, este es el caso de los sistemas que funcionan mediante la acción oscilatoria del agua en una columna. La función que realizan estos aparatos es generar electricidad a partir de dos procesos; conforme la cresta de la ola entra en la columna esta provoca que el aire dentro de ella sea forzado a pasar por una turbina, esto hace que se incremente la presión dentro de la columna. Cuando la ola retrocede, el aire es conducido hacia abajo y la presión del aire se reduce en la columna, y el aire vuelve a pasar por la turbina (*Fig.1*) .

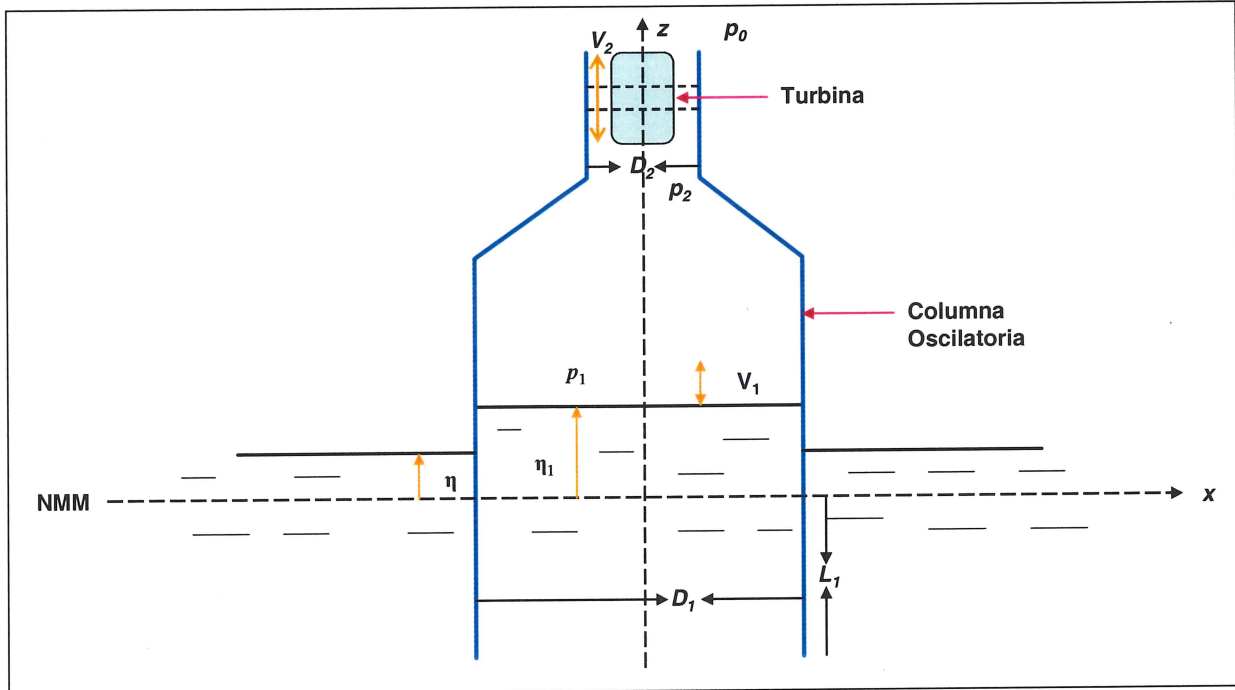


Figura 1. Principio de los convertidores de energía del oleaje mediante una columna oscilante de agua. Modificado de McCormick, 1981.

Existen diferentes diseños de columnas oscilatorias, sin embargo todas tienen básicamente el mismo principio (McCormick, 1981). En este trabajo simplificamos la interacción del dispositivo a una estructura cilíndrica y utilizamos las ecuaciones propuestas por Hiramoto (1978) para obtener la energía neumática del sistema. Utilizando el dispositivo propuesto por McCormick (*Fig.1*), tenemos que el desplazamiento interno de la superficie libre a partir de su posición de equilibrio es:

$$\eta_1 = \frac{\bar{H}_1}{2} \cos(\omega t) \quad [3.5]$$

Donde $\bar{H}_1$ es la altura de la ola que incide sobre la estructura. La velocidad del aire adyacente para la superficie libre interna es entonces;

$$v_1 = \frac{d\eta_1}{dt} = -\frac{\omega \bar{H}_1}{2} \sin(\omega t) \quad [3.6]$$

Suponiendo un fluido incomprensible, la velocidad axial en el pasaje de la turbina es;

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 = -\frac{A_1}{A_2} \frac{\omega \bar{H}_1}{2} \text{sen}(\omega t) \quad [3.7]$$

Donde A_1 y A_2 son las áreas de flujo de la cámara de captura y el pasaje de la turbina respectivamente. La potencia disponible P_n para una turbina depende del gradiente de la presión y el gasto de volumen del flujo del aire Q a través de la turbina:

$$P_n = (p_2 - p_0)Q \quad [3.8]$$

Donde a partir de la ecuación de continuidad obtenemos el gasto de volumen del flujo:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad [3.9]$$

La presión de escape p_0 , se supone la del ambiente y por simplicidad constante en los alrededores. Finalmente la presión superior p_2 se relaciona a la presión entre la cámara de aire por la ecuación de energía de Bernoulli;

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) + \rho \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_1 - \varphi_2) \quad [3.10]$$

Donde los potenciales de velocidad φ_1 y φ_2 son aproximados por;

$$\begin{aligned} \varphi_1 &\cong v_1 \eta_1 = -\frac{\omega H_1^2}{4} \text{sen}(\omega t) \cos(\omega t) \\ y \\ \varphi_2 &\cong \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \varphi_1 \end{aligned} \quad [3.11]$$

Finalmente la diferencia de presión en la expresión de potencia (ecuación 3.8) se obtiene de la ecuación de momento lineal;

$$p_2 - p_0 \cong \rho \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + \rho \frac{Q}{A_2} (v_2 - v_1) \quad [3.12]$$

Suponiendo un sistema que se encuentra en resonancia con la columna de agua incidente, donde L_1 es la longitud del agua en la columna de agua, tenemos que la frecuencia natural del movimiento de las olas dentro del dispositivo, es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L_1}} = \frac{\omega_c}{2\pi} \quad [3.13]$$

Se tomaron los 10 estados anuales de mar más representativos para calcular la potencia disponible y el porcentaje de eficiencia del dispositivo, comparando la densidad de potencia del oleaje con la potencia disponible para la turbina del dispositivo para 5 combinaciones de diámetro (D_1 , D_2) y de profundidad sumergida (L_1), con lo cual se obtuvieron, las variables descritas anteriormente y la eficiencia del dispositivo η_{ef} , el cual se obtiene con la siguiente relación.

$$\eta_{ef} = \frac{P_n}{P} \quad [3.14]$$

c.2) Rebase de Ola

Los sistemas que funcionan utilizando el rebase de la ola a través de una rampa, transfieren la energía cinética de las olas a un almacén de agua generando energía potencial (**Fig.2**). Esta energía potencial es transformada en energía eléctrica mediante hidroturbinas del tipo Kaplan (Soerensen *et al*, 2000). Se utilizan los resultados obtenidos por Soerensen *et al* (2000), para modelar la energía potencial obtenida por sistemas de rebase de olas como el Wave Dragon.

Los resultados de las pruebas realizadas por Martinelli (1999), muestran que estimaciones razonables de la distribución de los rebases de olas pueden ser obtenidos de un proceso aleatorio. Los procesos aleatorios son generados en dos pasos, primero es determinado cuando el rebase ocurre y segundo el calculo del volumen de agua una

vez que ha ocurrido el rebase (Soerensen *et al*, 2000). De acuerdo con van der Meer y Jansen (1995), la probabilidad de que un rebase ocurra en estructuras verticales y diques tiene una distribución del tipo Rayleigh. La probabilidad es básicamente función de la probabilidad de la altura significativa H_s y la altura de la rampa R_c (Soerensen *et al*, 2000) y esta dado por;

$$P_{ov} = \exp\left(-\left(\frac{1}{c} \frac{R_c}{H_s}\right)^2\right) \quad [3.15]$$

Donde la constante c se relaciona con la pendiente de la rampa, en este trabajo se usara el propuesto por Soerensen de $c = 1.21$. Si el rebase ocurre el volumen del rebase de las olas individuales puede ser descrito por la distribución de Weibull con la forma de un parámetro de 0.75 y el conocimiento de la descarga media (van der Meer y Jansen, 1995). La función de probabilidad de una descarga por ola, donde el volumen que entra (V_w) por ola es igual o menor que el volumen de la ola V , dado por;

$$P_v = P(V \geq V_w) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_w}{a}\right)^{0.75}\right) \quad [3.16]$$

Donde $a = 0.84 \frac{q T_m}{P_{ov}}$ y q es el gasto promedio del rebase, T_m el período medio de

la ola y P_{ov} la probabilidad de rebase determinada por la ecuación (3.15). El flujo esta determinado por;

$$q = 0.017 C_d \exp\left[-48 \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{S_{op}}{2\pi}}\right] \frac{L_c \sqrt{g H_s^3}}{\sqrt{\frac{S_{op}}{2\pi}}} \quad [3.17]$$

Donde $S_{op} = \frac{H_s}{L_{op}}$ y $L_{op} = \frac{1}{2\pi} g T_p^2$, donde L_c es la longitud de la curvatura de la cresta de

la rampa, T_p es el período pico y C_D el coeficiente de reducción de 0.9 para esparcimiento direccional.

El volumen que entra por ola es calculado por la siguiente ecuación dada por;

$$V_w = 0.84 \frac{qT_m}{P_{ov}} (-\ln(1 - P_v)) \frac{4}{3} \quad [3.18]$$

Basados en las ecuaciones (3.15) a la (3.18), algunas estimaciones y consideraciones de diseño fueron hechas para los 10 estados de mar más representativos, a partir de 5 alturas de rampa (R_c). Obteniéndose valores preliminares sobre la transformación del oleaje y la interacción del dispositivo-ola.

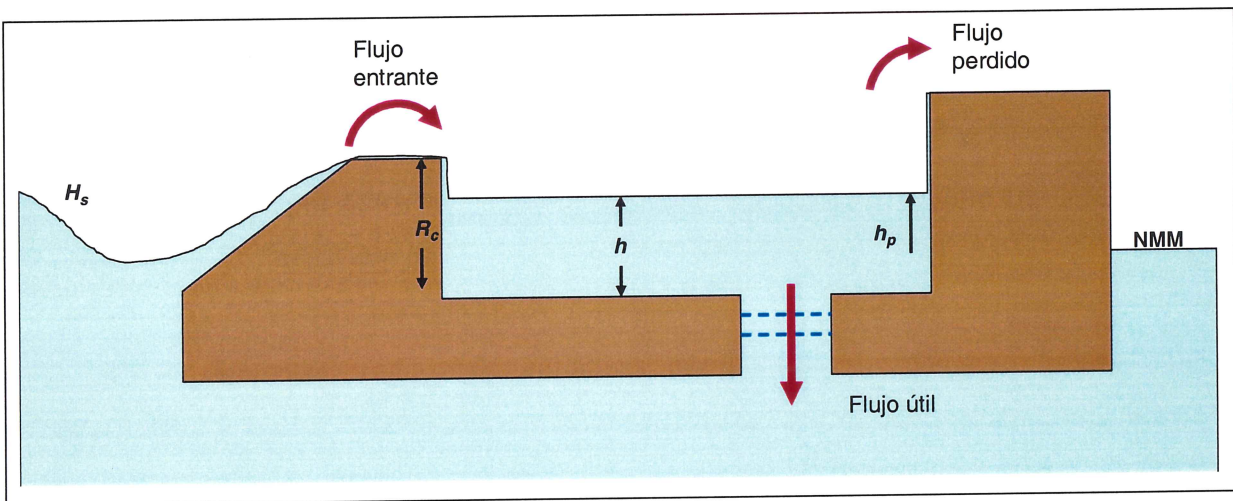


Figura 2. . Principio de los convertidores de energía del oleaje por rebase de ola, modificado de Soerensen *et al*, (2000) NMM indica el nivel medio del mar.

I.5 LIMITACIONES DEL MÉTODO APLICADO

Existen algunas limitaciones en el método aplicado, en particular en lo que se refiere a la obtención de los datos. Estas limitaciones se plantean a continuación.

- Un modelo es solo una aproximación a un evento real, no debe ser tomado nunca como una representación exacta de ella, si no como una aproximación de la misma.
- La base de datos de viento en el primer período de 1948-1956, presenta muchos problemas de interpolación y datos poco precisos (Kalnay, 1999).
- La resolución del campo de viento es de 2.5 grados de longitud y latitud y el forzamiento hecho por el Wam produce una malla que interpola a 1 grado, es decir que considera que en una cuadrícula de 1x1 grados, el oleaje es el mismo, esto no es del todo cierto en zonas costeras afectadas por la topografía.
- Las características del oleaje en este trabajo, son considerados para mar profundo, en el caso de tomarlos como costeros o someros, debe tomarse en cuenta la batimetría y forma de la costa que pueden afectar radicalmente las características del oleaje.
- Los valores de potencia del oleaje, no producirán la misma cantidad al transformarse en energía eléctrica debido a la pérdida de energía producida por la interacción del dispositivo-ola, la turbina, el sistema de almacenamiento y distribución de la energía eléctrica
- Los valores obtenidos por la modelación de la interacción ola-dispositivos, son consideraciones de diseño y una aproximación de la energía que se puede obtener. Una mejor aproximación de la transferencia de energía por un dispositivo, debe tomarse en cuenta otras variables, además de hacer pruebas experimentales
- Las referencias al consumo de energía de las islas no pretenden ser más que eso, una referencia a las posibles necesidades de la isla en base al número de personas que ahí habita, para una mejor estimación de esto, estudios socioeconómicos deben realizarse.

II. EVALUACION DEL RECURSO EN ISLAS DEL PACIFICO MEXICANO

II.1 CARACTERISTICAS DEL OLEAJE EN EL OCÉANO PACIFICO

El océano Pacífico tiene la extensión, así como la profundidad observada, más grande de todos los mares, especialmente en el pacífico sur, donde su extensión y la constancia del viento, crean las condiciones para la formación de olas grandes. La intensidad de las olas en el Pacífico decrece de altas latitudes, hacia el ecuador (*Fig.3*). En el pacífico sur la media anual mas alta se encuentra de mayo a noviembre, mientras que, en el pacífico norte las olas más altas ocurren de enero a febrero y las mas cortas de junio a agosto, estas diferencias también se ven reflejadas anualmente, ya que la incidencia de huracanes por año puede cambiar drásticamente. (Davidan *et al*, 1985, en Massel, 1998).

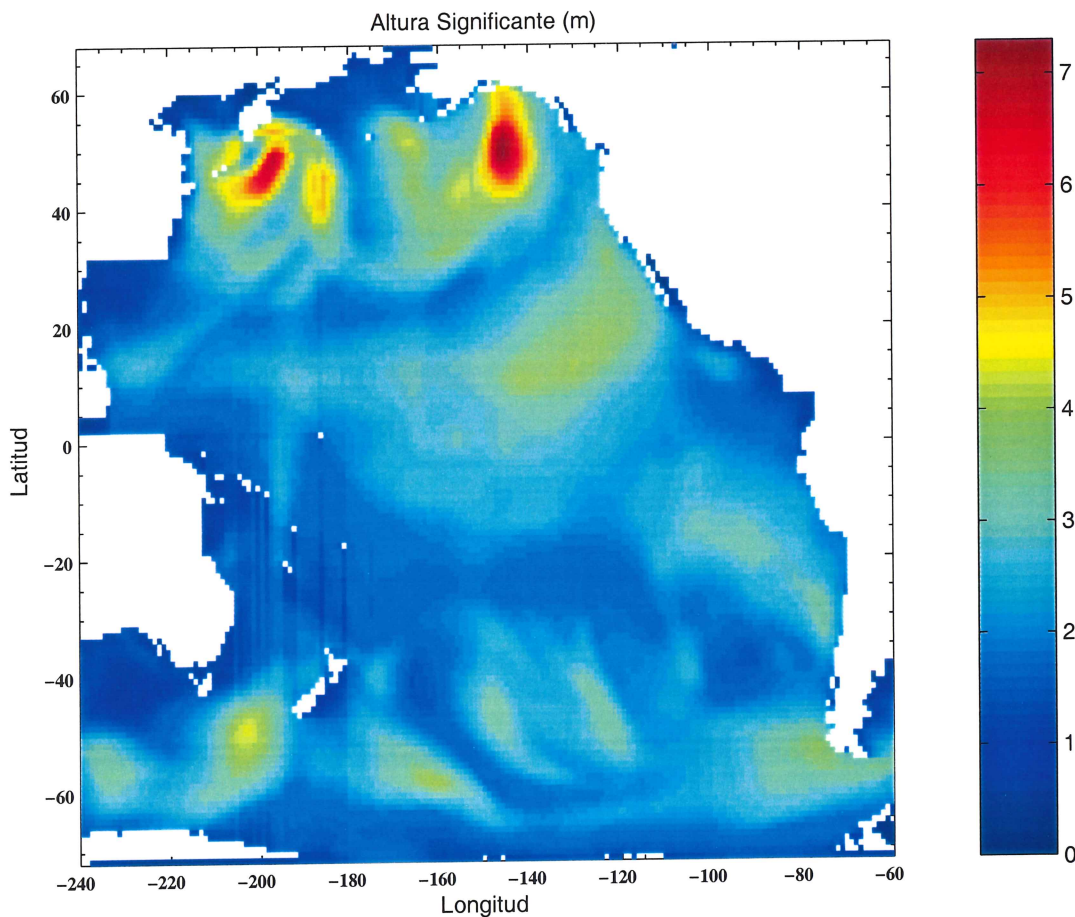


Figura 3. Altura significativa del Océano Pacífico para el 12 de Enero de 1984

II.2 CASO I: ISLA GUADALUPE

II.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

II.2.1.1 Localización

La isla de Guadalupe se encuentra localizada en el Océano Pacífico a 280 Km. al oeste de la costa de Baja California, a los 29° 02' 06" de latitud norte y los 118° 16' 37" de longitud oeste (*Fig.4*). Tiene una extensión de 250 km² y pertenece al estado de Baja California México (*INEGI, 1993*)

II.2.1.2 Estadística Poblacional

Población:

Hay una población de 99 habitantes permanentes y de 100 pescadores que llegan a la isla en la temporada de septiembre a junio de cada año. La mayor parte de la población radica en el campamento de la Secretaría de Marina aunque hay otros campamentos que se ubican en la punta sur de la isla, cerca de la pista de aterrizaje, en el bosque y en la punta norte. Los pescadores se establecen en cuatro campos pesqueros temporales, principalmente en el oeste y norte de la isla y en menor medida en el Campo-Lima y Arroyitos.

Actividad Productiva:

En la porción insular la única actividad productiva es la pesca. La Cooperativa de Abuloneros y Langosteros, es la organización de los pescadores de la isla. También existe una compañía de taxis aéreos que transporta a los visitantes a la isla.

Infraestructura:

Cuenta con un telégrafo, un centro meteorológico, 15 casas en el campamento Tepeyac, cuatro casas en el campamento Arroyitos, cuatro casas en el campamento Norte, una casa en el campamento Lima o Corrales. Las casas están construidas de cemento y techo de madera; hay además ocho embarcaciones menores con motor fuera de borda, un campamento de marina, una pista de aterrizaje en la porción central, un camino de terracería de norte-sur que conduce al destacamento de marinos, además de las casas habitación de la población residente.

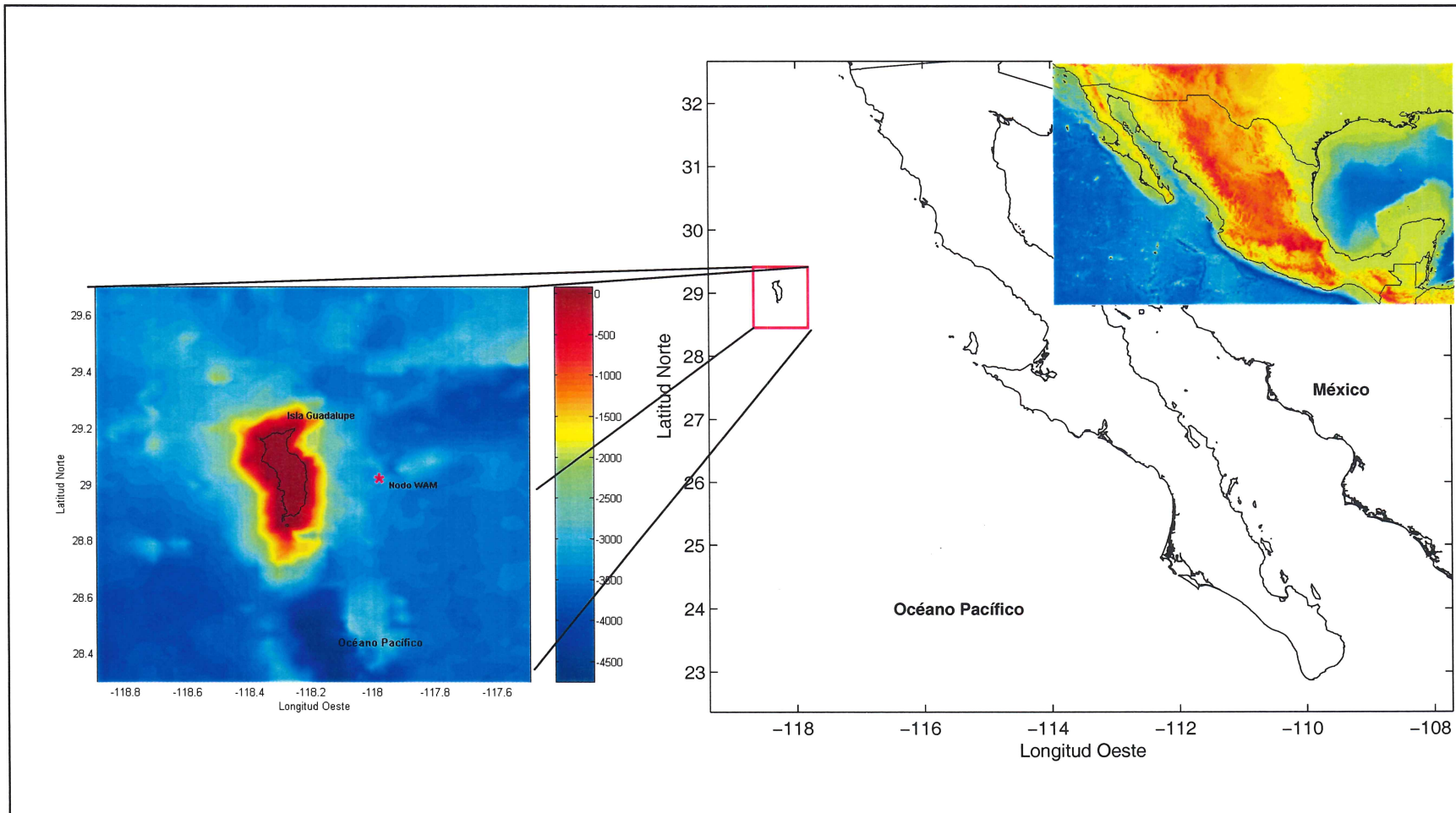


Figura 4. Localización de la Isla de Guadalupe, México y el nodo generado por el modelo WAM (*)

La Secretaría de Marina cuenta con una base de vigilancia y una estación meteorológica (Gómez & Dirzo, 1995). No hay escuelas y las viviendas no cuentan con letrinas. El servicio médico lo proporciona un médico militar (INE, 1993).

II.2.1.3 Consumo de Energía

De manera general, basándonos en los estatutos determinados por la comisión federal (DECSIACD, 2001) para los consumos mínimos, promedio, máximos y excedentes para el servicio residencial y suponiendo un servicio para 25 unidades habitacionales, el consumo básico de energía podría estar entre los 0.625 MWh/mes y 1.87 MWh/mes (*Fig.5*)

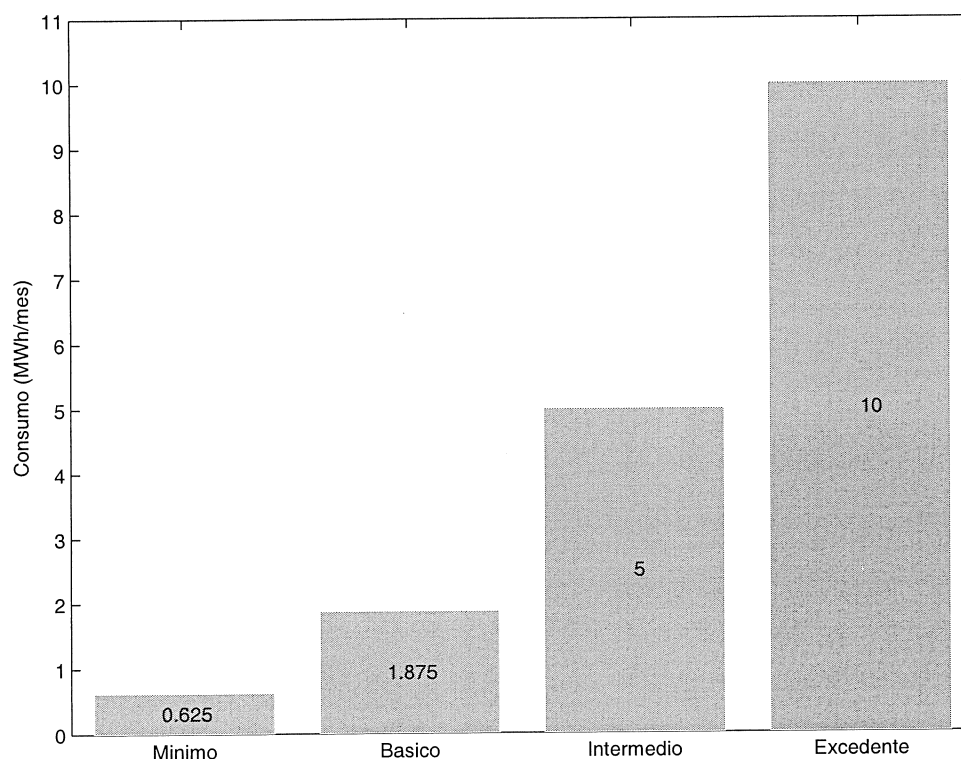


Figura 5.- Consumos de Energía Mensual para la Isla de Guadalupe en MW/h.

Es decir para cubrir los mínimos requerimientos de la población, es necesario tener una planta capaz de producir mensualmente 0.625 MW, además de un extra debido a la pérdida en la distribución.

II.2.2 CARACTERIZACION DEL OLEAJE LOCAL

En base al registro histórico de 1948-2002, el oleaje en Isla Socorro, tiene una dirección predominante NW, entre los 300° y 310° . La altura significativa tiene un promedio de 1.97 m y la alturas mas recurrentes, se encuentran, entre los 1.5 m y 2.0 m, teniendo oleaje extremo de hasta 8 m. El promedio del período medio del momento dos, es de 6.56 s, con períodos predominantes de 6 a 7 segundos y máximos, mayores a los 13 segundos. La frecuencia asociada al pico espectral es de 0.074 Hz con una densidad de energía en el pico espectral de $2.526 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$. Estas características se resumen en la tabla I.

Tabla I.- Resumen de las Características del Oleaje del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en la Isla de Guadalupe.

	Hs (m)	Tm ₂ (s)
Promedio	1.979	6.566
Desviación Estándar	0.5	1.293
Mínimo	0.517	3.298
Máximo	8.13	13.443
Valor Predominante	1.5-2.0	6-7
Dirección Predominante (θ)	300° - 310° NW	
Frecuencia Asociada al Pico Espectral (Hz)	0.074	
Pico Espectral ($\text{m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$)	2.526	

II.2.2.1 Variabilidad y Comportamiento Anual

La forma de los espectros direccionales, a través de los años, es básicamente la misma (**Fig. 6**). La mayor parte de la energía anual, proviene del NW a los 300° , teniendo casos excepcionales donde la mayor parte de la energía proviene del sur (1990). La frecuencia asociada al pico espectral típica es de 0.074 Hz. y densidades máximas de energía, que varían de 1.5 a $3 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$. En años niño (1987, 1998) se observa un aumento de la energía y una disminución de la frecuencia asociada al pico espectral de 0.074 a 0.0673 Hz.

Las distribuciones conjuntas de H_s y T_{m2} anuales, muestran que la mayor parte del oleaje se concentra entre los 1.5-2.5 m de H_s y de los 5 a 8 s de periodo (**Fig. 7a y 8a**), en años niños (1982, 1998) se observa un aumento en H_s y T_{m2} , provocando una mayor

variabilidad de los datos, sin embargo mantiene sus máximos entre los 5 y 8 s de Tm_2 y 1.5 a 2.5 m de H_s (**Fig.8a**). La mayor parte del oleaje en el año, proviene del oeste y el noroeste, oscilando entre los 270° y los 310° , donde la mayor probabilidad direccional de incidencia de H_s , se encuentra entre los 2.0 y 2.5 m, con probabilidades de 7 % hasta mas del 12 % (**Fig.7b y 8b**). Eventos niño (1982, 1998), muestran una mayor variabilidad de las direcciones de arribo de H_s , y la altura predominante es la de 2.5 m (**Fig. 8b**).

La distribución direccional del período difiere un poco de la de altura significativa, el máximo de probabilidad del período se encuentra entre los 6 y 8 segundos entre los 300° y 310° (**Fig. 7c y 8c**). No se observa una diferencia evidente con la distribución de los períodos en años niño (1982, 1998) y años típicos (1953, 1962, 1976, 1994)

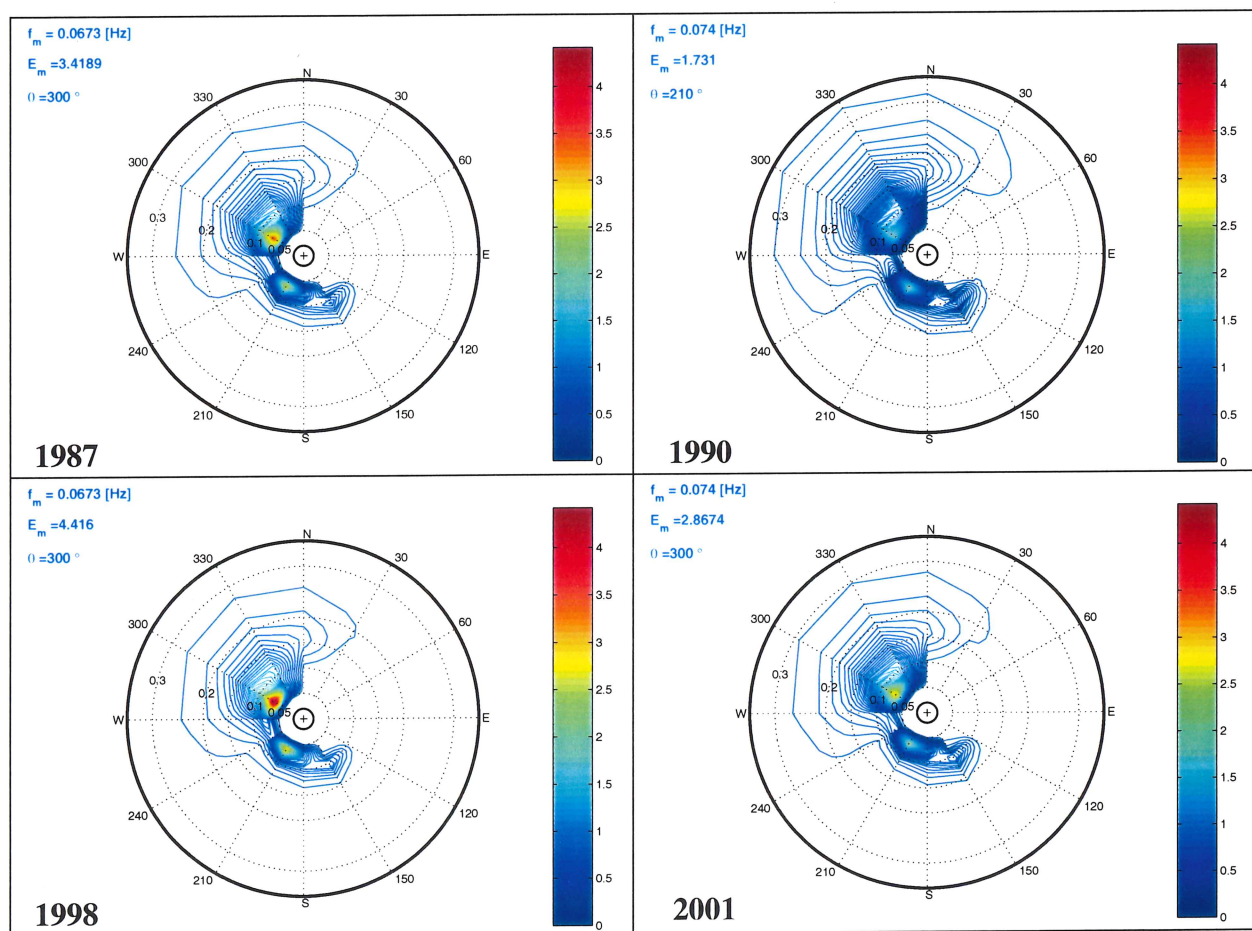


Figura 6.- Comportamiento Anual del Espectro Direccional del Oleaje, en Isla Guadalupe

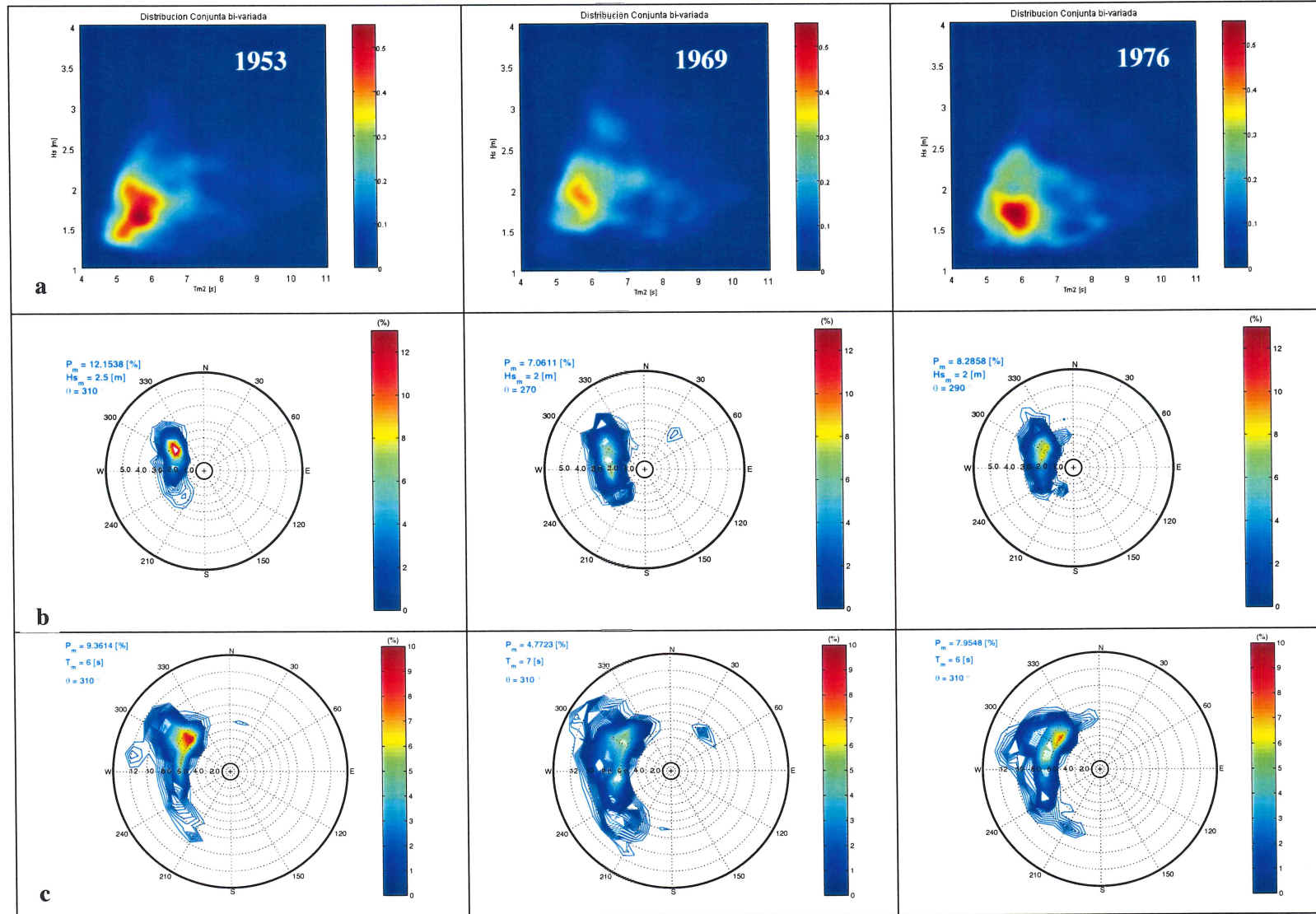


Figura 7.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1953, 1969 y 1976 en Isla Guadalupe: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2}).

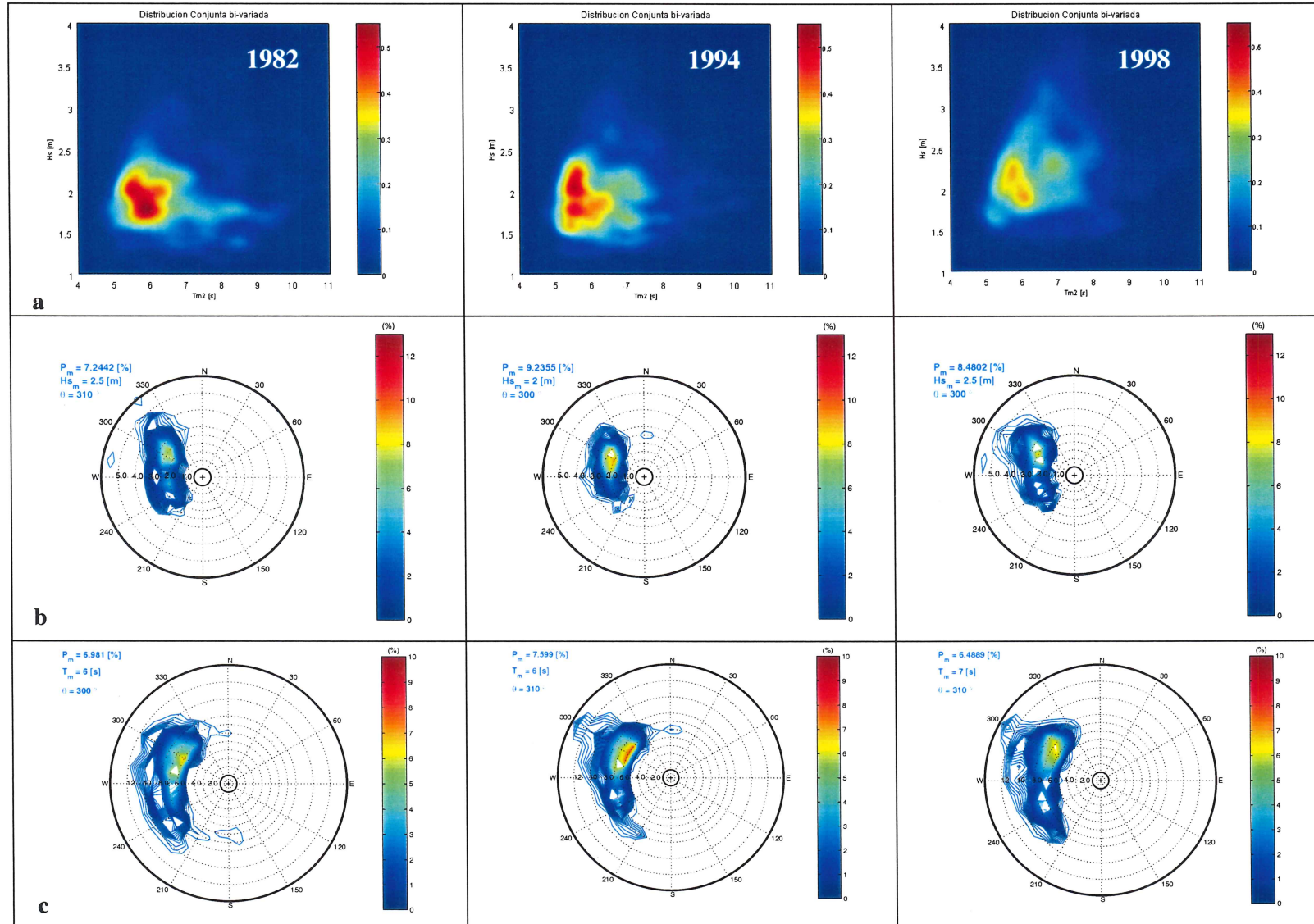


Figura 8.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1982, 1994 y 1998 en Isla Guadalupe: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

II.2.2.2 Variabilidad y Comportamiento Estacional

El espectro direccional de 1993 (*Fig. 9*), muestra claramente el comportamiento estacional típico de la Isla de Guadalupe, en invierno se encuentra el oleaje con mayor energía, asociado este máximo al oleaje proveniente del noroeste, donde el oleaje proveniente del sur, es apenas identificable.

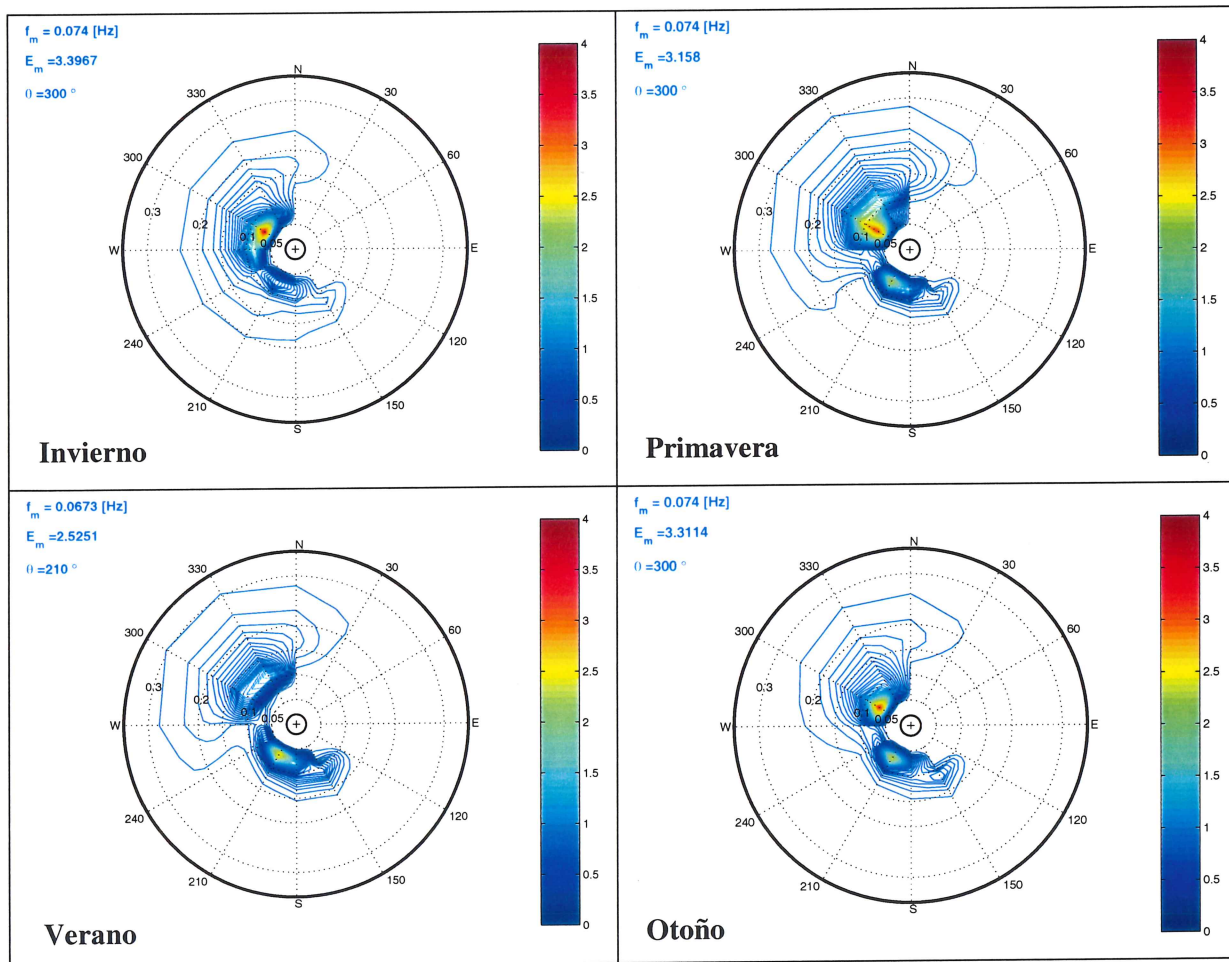


Figura 9.- Variabilidad Estacional del Espectro Direccional del Oleaje para 1993, en Isla Guadalupe

En primavera la energía del espectro disminuye, y se observa una mayor influencia del oleaje proveniente del sur, encontrándose dos máximos, aunque la mayor cantidad de la energía del oleaje sigue siendo noroeste. En verano se observa un cambio radical con

respecto al espectro direccional de invierno, y ahora el máximo de energía proviene del suroeste y la frecuencia asociado al pico espectral cambia de 0.074 a 0.067, y la densidad de energía asociada al pico espectral, muestra su mínimo, en esta estación. El oleaje del noroeste, es aun significativo, pero mucho menos energético. Otoño puede verse, como una etapa de transición, entre el verano y el invierno, muestra un aumento de energía con respecto al verano y el oleaje del noroeste vuelve a ser el más energético, sin embargo el oleaje proveniente del suroeste sigue siendo importante, observándose dos máximos en el espectro de otoño.

Invierno:

La distribución conjunta de H_s y Tm_2 (**Fig. 10a**) muestran que los máximos de distribución se encuentran entre los 1.5-2.5 m de H_s y los 5 a 8 segundos de periodo medio, con una probabilidad conjunta de hasta 0.6%, en año niño (1998), los máximos de ocurrencia, se encuentran, entre los 2 y 2.5 m de H_s , aunque su variabilidad es mayor que en años típicos (1953, 1976 y 1996), donde hay una menor variabilidad. La mayor parte del oleaje en invierno proviene del noroeste de entre los 300° y 310° , donde las probabilidades máximas, que pueden ser hasta el 20% del oleaje, se encuentra entre alturas significantes, que van desde los 2 m hasta los 2.5 m, y en temporada de niño como el de 1998 de hasta 3 m (**Fig. 10b**). El período predominante se encuentra entre los 7s para años típicos y de 8 s para año niño (1998) con probabilidades que llegan al 16 %, con direcciones que van de los 300° a los 310° (**Fig. 10c**).

Primavera:

En primavera la distribución de la altura significativa y el período se comporta de manera similar a la de invierno, aunque su probabilidad de ocurrencia, aumenta, con probabilidades conjuntas de hasta 0.8 % para alturas significantes de entre 2 y 3 m. y períodos medio que van de los 5 a 7 s, a excepción de 1998, donde la altura predominante se encuentra entre 2 y 3 m y períodos de entre 5 y 8 s (**Fig. 11a**). La dirección del oleaje sigue siendo noroeste aunque ahora los máximos de probabilidad de altura de ola se encuentran entre los 290° y 300° con probabilidades, que llegan hasta el 15 % y alturas de ola que van de los 2 m hasta los 2.5 m incluyendo períodos niño (**Fig. 11b**). El período

predominante es de 6 s con direcciones de los 300° a los 310° con probabilidades de hasta el 16 % (**Fig. 11c**). En evento niño el período aumenta hasta 8 s.

Verano:

La distribución conjunta muestra que en verano, la mayoría del oleaje se encuentra entre los 1 y 2 m de altura significativa y en períodos de 5 a 7 s con probabilidades conjuntas, de hasta 1.2 % (**Fig.12a**). En 1998 la distribución del oleaje tiene su máximo a los 2 m entre los 5 y 6 s, sin embargo, el oleaje presenta una alta variabilidad, por lo que no se puede hablar de una altura y período predominantes. La altura significativa tiene una dirección predominante suroeste y oeste que varía de los 240° a los 280° con probabilidades de hasta 12 % para alturas de 2 m. (**Fig.12b**). El período tiene una dirección predominante oeste, que varía de los 280° a los 290° , con una probabilidad que pueden llegar a más del 16 %, para un período medio de 6 s (**Fig.12c**).

Otoño:

La distribución conjunta en otoño muestra que la mayor parte del oleaje se encuentra entre los 1.5 y 2.0 m de altura y en períodos de 5 a 7 s, con una probabilidad conjunta de hasta 1 % (**Fig. 13a**). La dirección predominante para la altura significativa vuelve a ser noroeste variando entre los 290° y 310° , donde el máximo de probabilidad, se encuentra entre los 2 y 2.5 m. con probabilidades de hasta el 16% (**Fig.13b**). La distribución direccional del período, muestra que el máximo de probabilidad de período es de 7 a 8 s, para una dirección NW de 300° , con probabilidades, que llegan al 10 %, en algunos casos (**Fig.13c**).

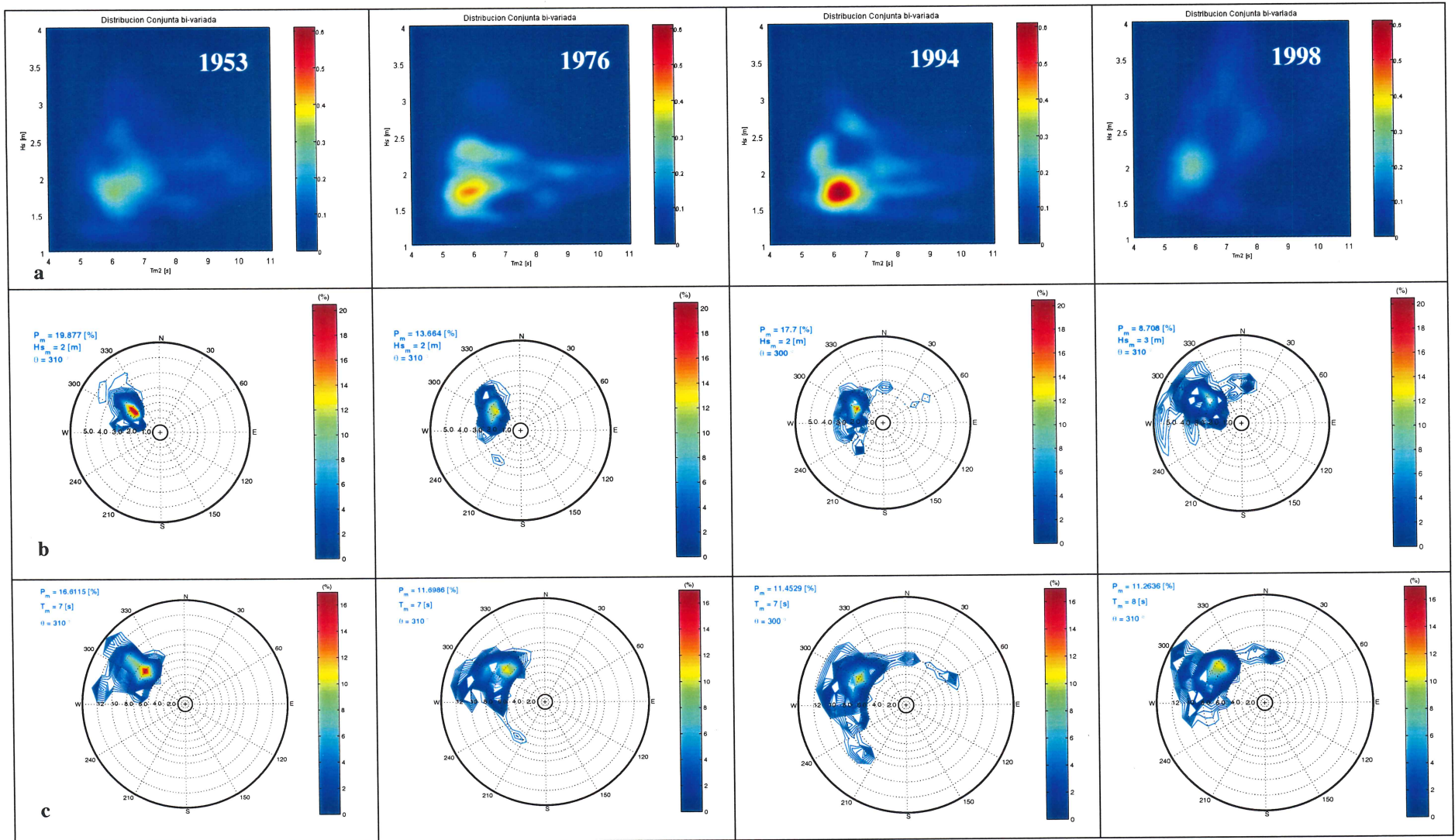


Figura 10.- Distribuciones Bi-variadas para el invierno de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

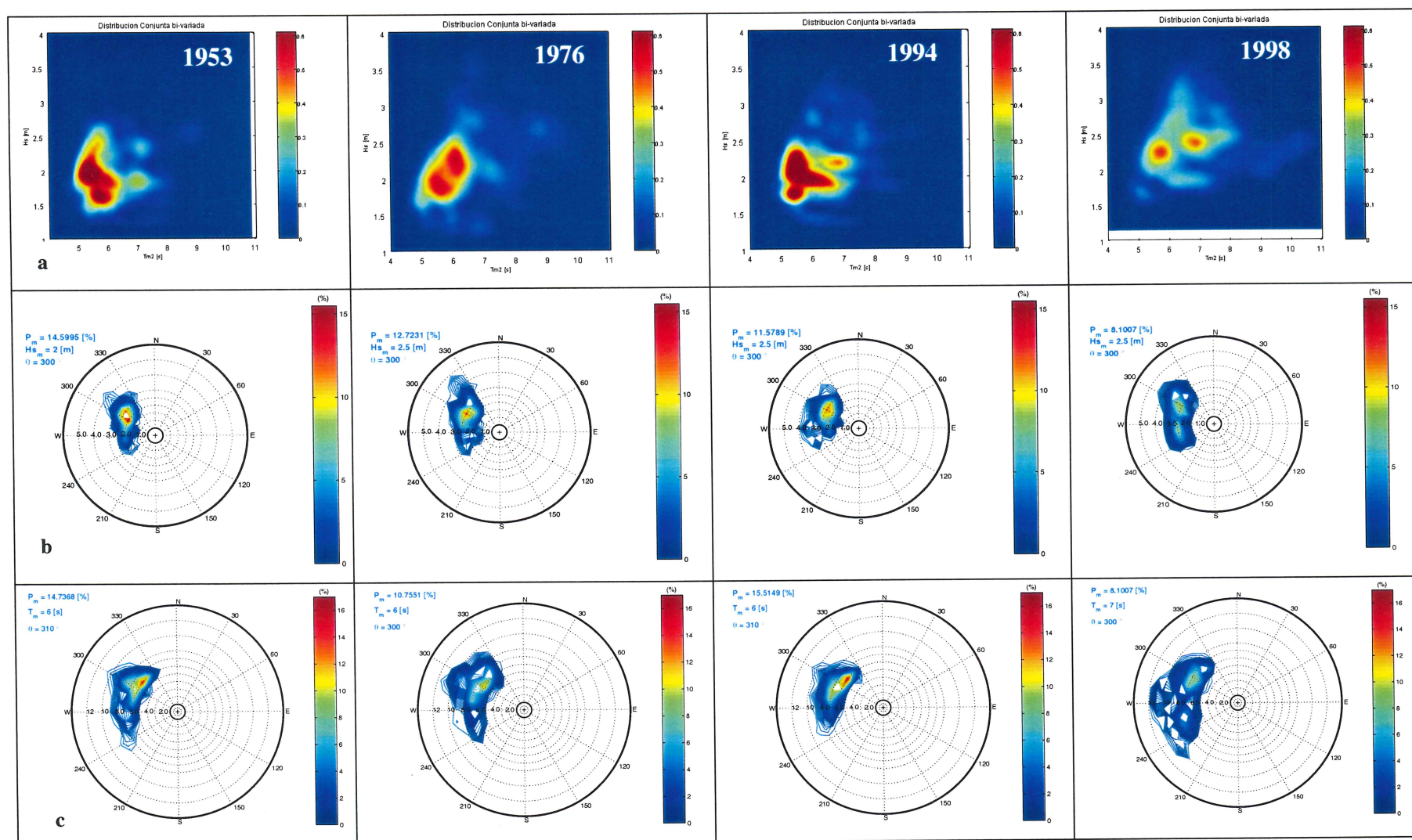


Figura 11.- Distribuciones Bi-variadas para la primavera de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

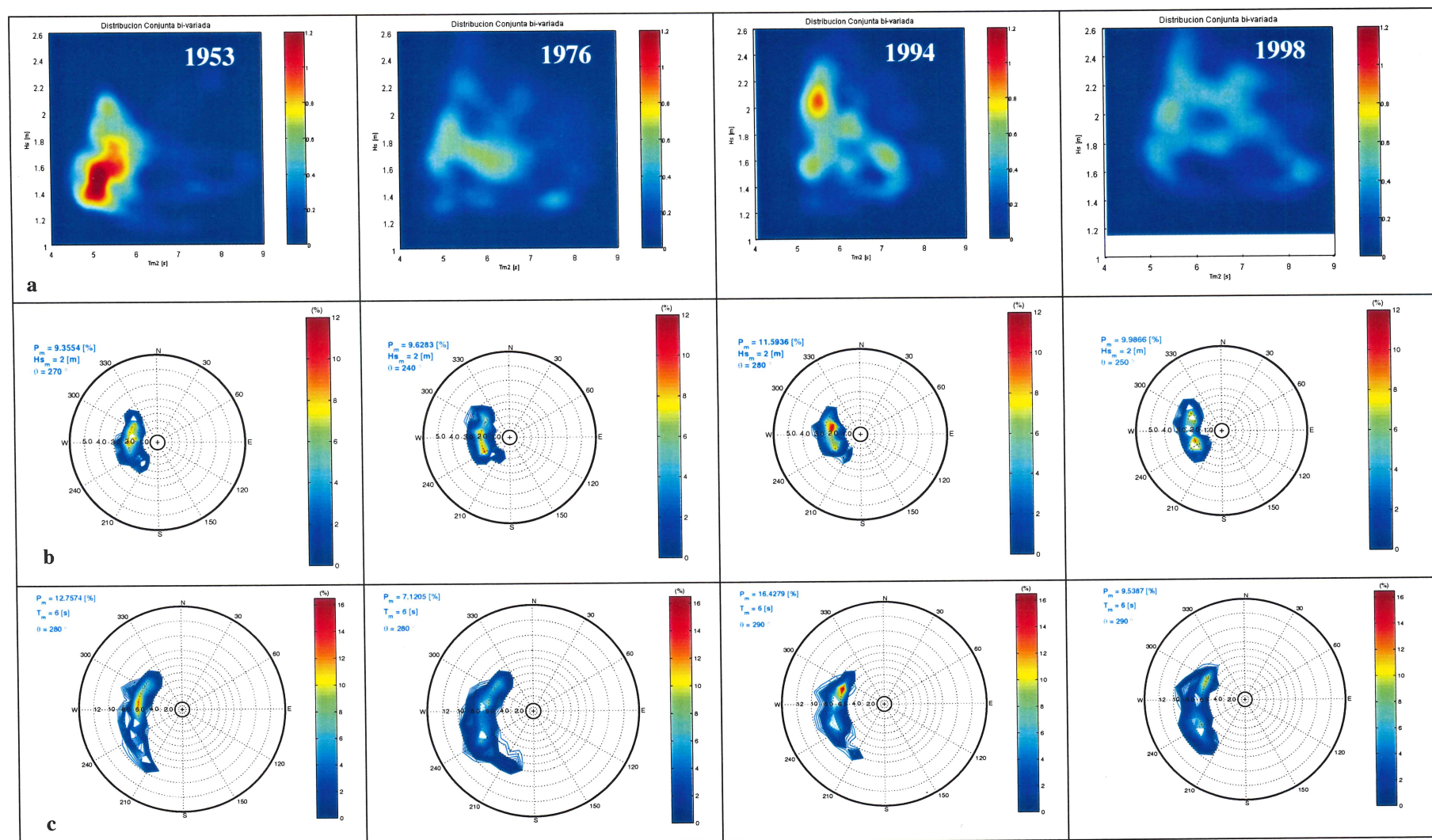


Figura 12.- Distribuciones Bi-variadas para el verano de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

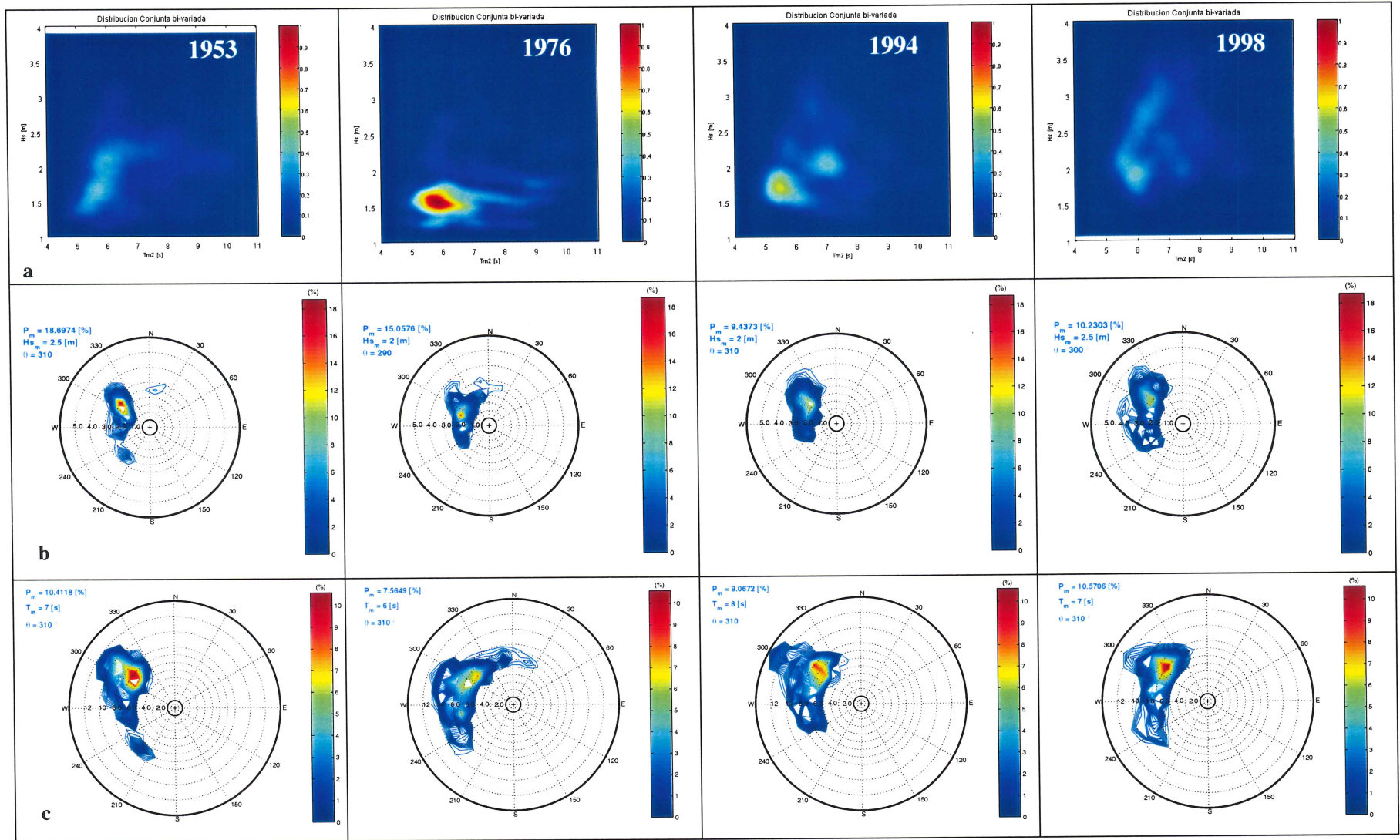


Figura 13.- Distribuciones Bi-variadas para el otoño de 1953, 1976, 1994 y 1998, en Isla Guadalupe: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

II.2.2.3 Análisis de Oleaje Extremo

Distribución del Oleaje Extremo:

La distribución del oleaje extremo en Isla Guadalupe muestra que la probabilidad de que exista oleaje menor a 5 metros es del 93 % y la probabilidad menor a 8 metros es del 99%, la probabilidad del oleaje menor a 3 metros y mayor a 1 metro, comprende un 25% de la probabilidad (*Fig. 14*).

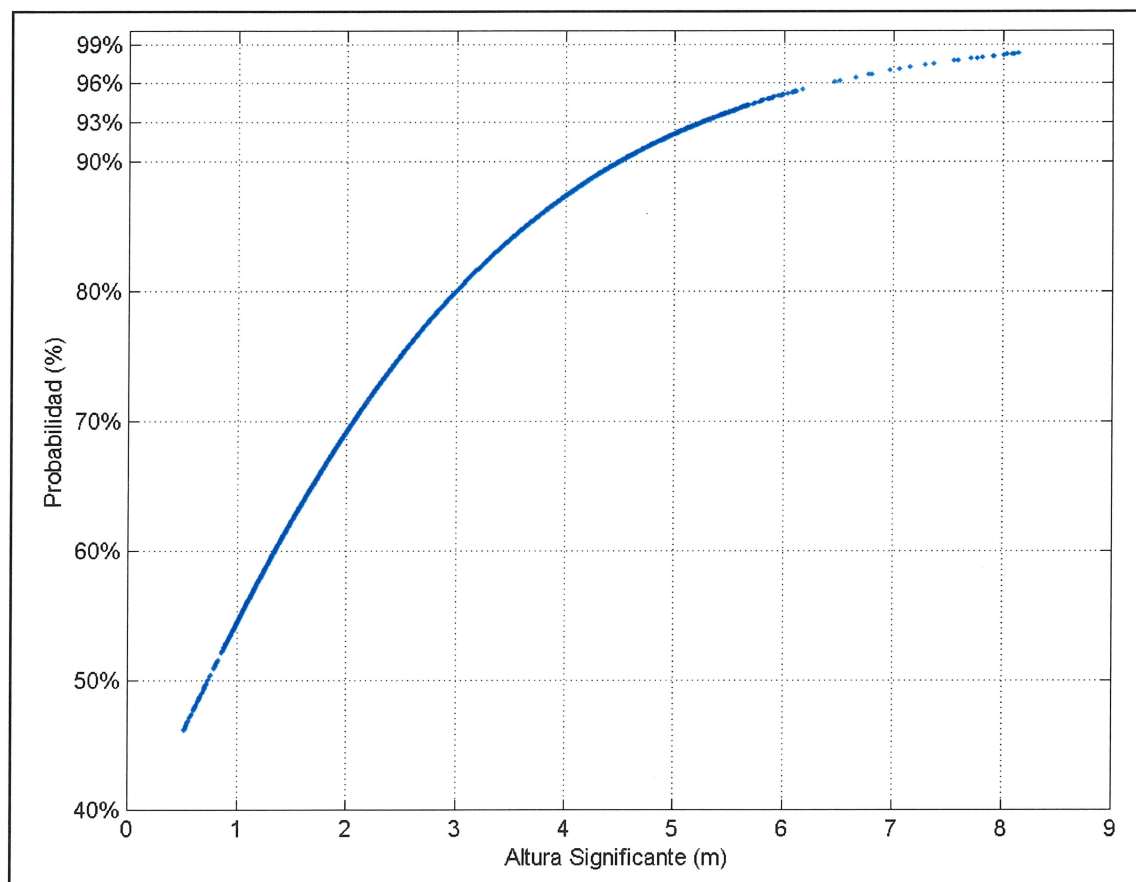


Figura 14.- Distribución Gumbel de Máximos para el registro histórico de 1948 al 2002, en Isla Guadalupe

Análisis de Excedencias:

En la tabla II, se muestran los máximos anuales para el registro histórico de 1948 al 2002, acomodados de menor a mayor, con máximos que van desde los 3.45 m hasta los 8.12 m., con lo cual se realiza el análisis de excedencias. Los resultados de este análisis para obtener la altura de diseño, se presentan en la tabla III, con periodos de vida de estructura de 10, 25, 50 y 100 años y excedencias promedio ($\bar{r}$) de 2, 4 y 8. Suponiendo que queremos una estructura con un período de vida de 25 años y con una excedencia de oleaje promedio no mayor a 4 en los próximos 25 años, la altura de diseño es de 5.29 m

Tabla II. Máximos anuales para el registro histórico, dispuestos de menor a mayor para la Isla de Guadalupe.

Máximos Anuales				
3.45	3.89	4.11	4.56	5.0
3.50	3.97	4.28	4.57	5.05
3.53	3.98	4.32	4.60	5.29
3.55	3.99	4.33	4.63	5.30
3.55	3.99	4.34	4.64	5.46
3.59	4.01	4.38	4.70	5.48
3.63	4.04	4.39	4.74	5.63
3.63	4.06	4.40	4.76	5.66
3.68	4.07	4.46	4.85	5.99
3.82	4.08	4.47	4.91	6.10
3.84	4.10	4.55	5.02	8.12

Tabla III.- Altura de Diseño para diferentes excedencias promedio ($\bar{r}$) y diferentes periodos, a partir de los máximos anuales en Isla Guadalupe.

Periodo (años)	H_d $\bar{r}=2$	H_d $\bar{r}=4$	H_d $\bar{r}=8$
10	5.0	4.56	3.89
25	5.63	5.29	4.64
50	6.1	5.66	5.29
100	8.12	6.1	5.63

Probabilidad de Reincidencia:

La probabilidad de que exista una reincidencia de una determinada altura de ola, depende del oleaje incidente y del tiempo que transcurre (10, 25, 50 y 100 años). Para Isla Guadalupe, para una altura de diseño de 6 m., tiene una probabilidad de que una ola de este tamaño o mayor a ella ocurra de un 40 % en 10 años, de un 70% en 25 años, de mas de un 90% en 50 años, y en 100 años la probabilidad es mayor al 98% (Fig.15).

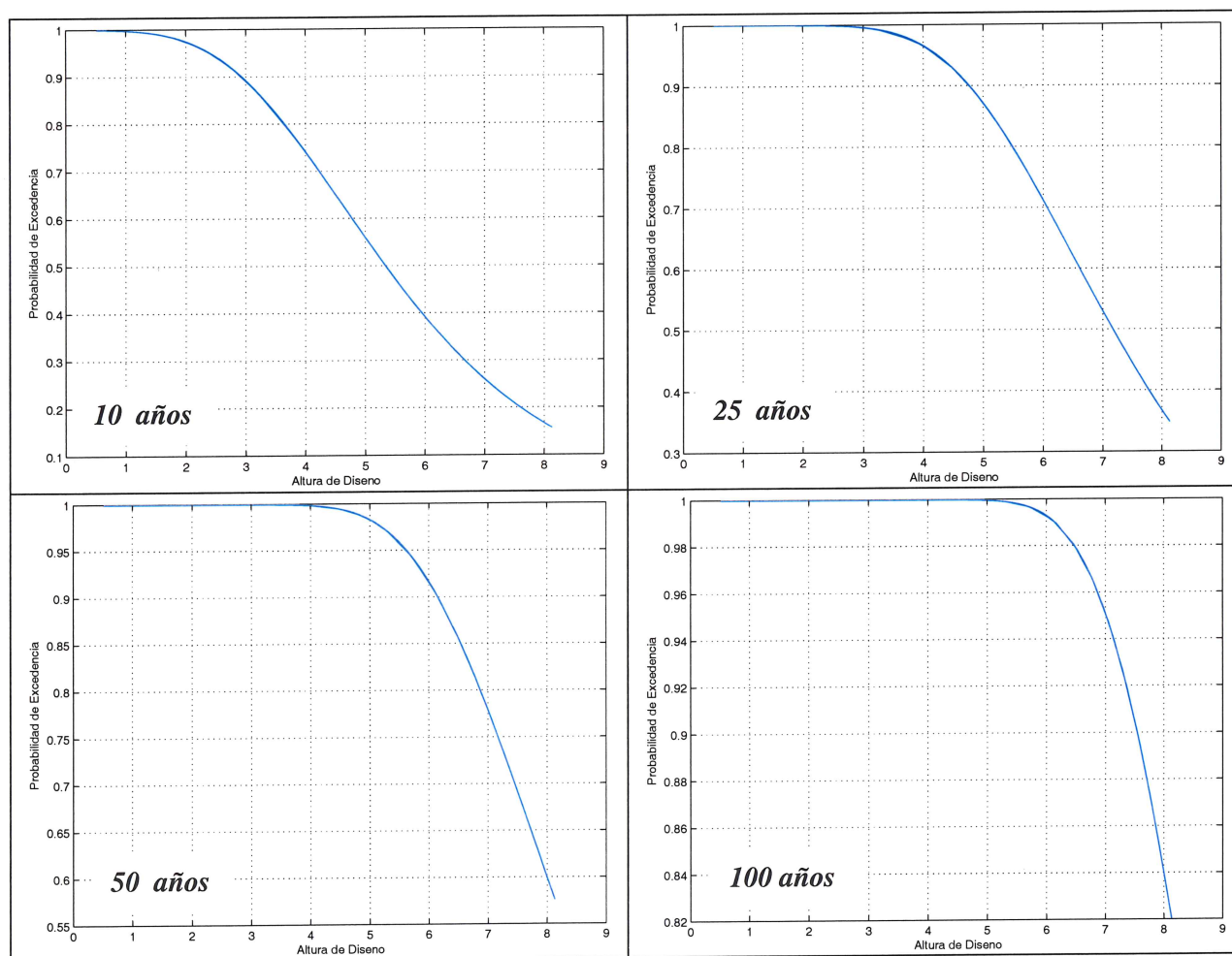


Figura 15.- Probabilidad de que la ola de diseño sea igual o sea excedida para diferentes tiempos de vida de la estructura, en Isla Guadalupe.

II.2.3 ESTIMACION DE LA ENERGÍA

a) *Potencia Teórica total por unidad de ancho:*

La potencia teórica por unidad de ancho en Isla Guadalupe, muestra que la mayor parte de la energía se encuentra entre los 10 y 15 kW/m, en las alturas de ola de 1.5 a 2.5 y de 6 a 8 s de período con probabilidades de hasta un 16%, donde la mayor probabilidad se encuentra en $H_s = 2$ m y $T_{m2} = 7$ s. Otra parte considerable de la potencia se encuentra entre los 15 y 20 kW/m (*Fig.16*)

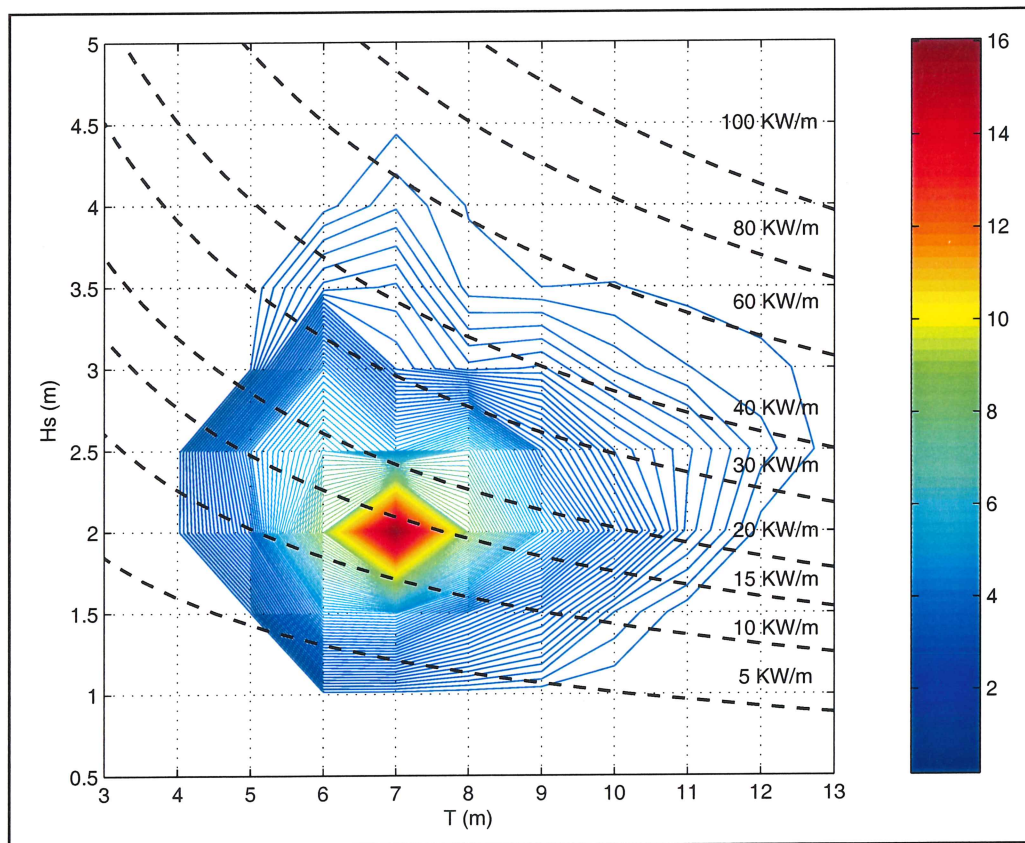


Figura 16.- Distribución de la Potencia Teórica Total por unidad de ancho (kW/m), del registro histórico (1948-2002), en Isla Guadalupe

Potencia Anual:

La potencia teórica anual, se muestra poco variable en términos generales, teniendo los máximos de probabilidad de hasta un 18 % en potencia de entre 10 y 20 kW/m, para períodos de 6 a 8 s y alturas de 1.5 a 2.5 m (*Fig.17, 1953, 1972, 1995*), sin embargo, sí se

observa un aumento en el período (1995), con respecto a años anteriores (1953, 1972). En eventos niño (1998), se observa un aumento en la potencia, donde la probabilidad disminuye y el máximo de probabilidad de potencia, muestra dos máximos, uno en potencias de entre 10 y 15 kW/m ($H_s = 2.0$ a 2.5 , $T_{m2} = 7$ s) y el otro, entre 20 y 30 kW/m ($H_s = 2.5$ y $T_{m2} = 8$ s).

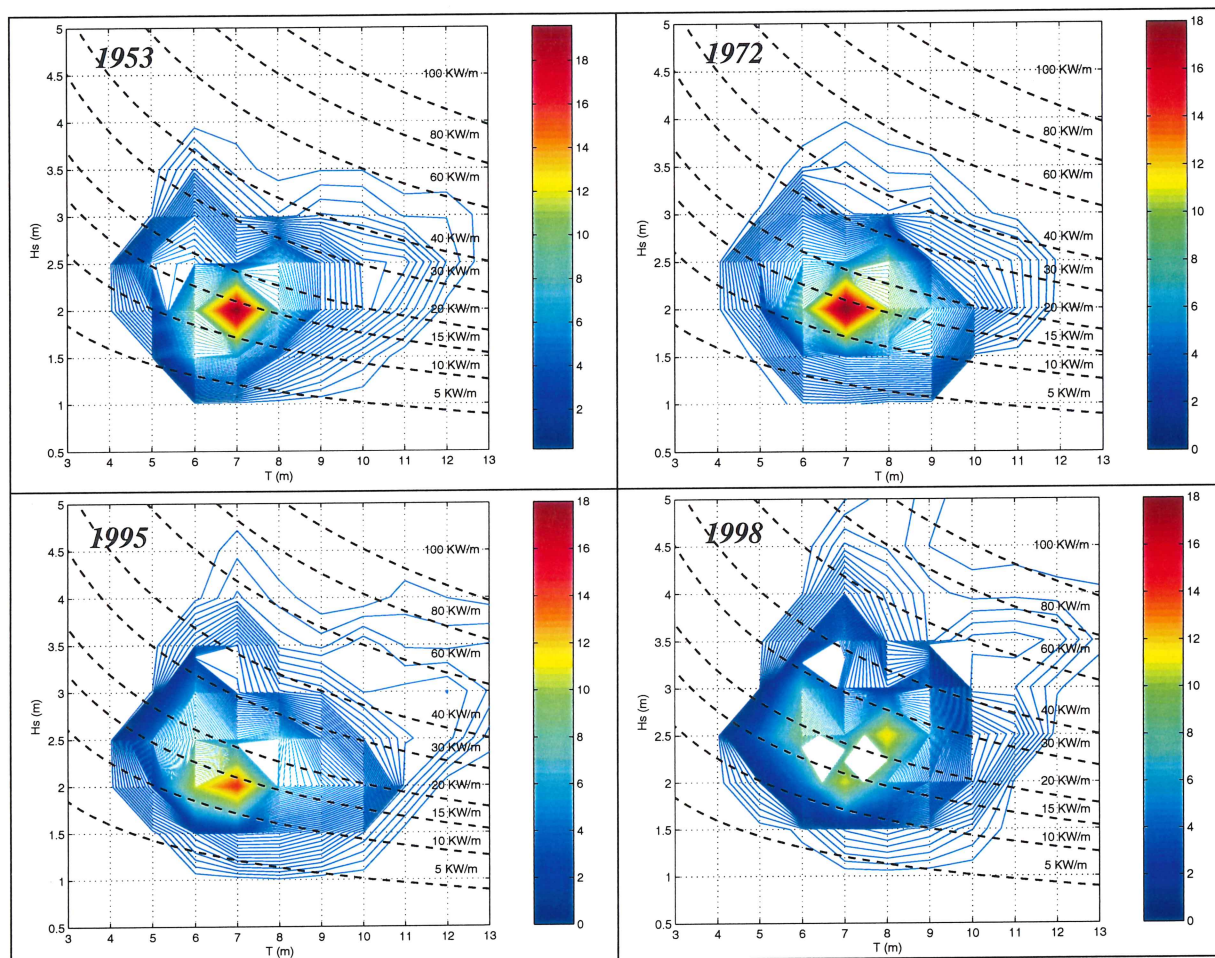


Figura 17.- Distribución de la Potencia Teórica Total anual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Guadalupe

Potencia Estacional:

La variabilidad estacional de la potencia teórica total, para Isla Guadalupe, se ejemplifica para dos años típicos (1972 y 1993) y un año atípico (1998) (**Fig.18**).

Invierno:

La potencia en invierno es la más variable, teniendo probabilidades máximas de hasta un 12%. La mayor probabilidad se encuentra entre los 10 y 15 kW/m, sin embargo, también hay probabilidades altas en potencias de entre 20 y 30 kW./m (**Fig.18, 1972,1993**). La variabilidad es aun mas notoria en eventos niño (**Fig.18, 1998**), donde hay un aumento de las alturas, períodos y su variabilidad. El máximo más notorio para el invierno del 98 se encuentra entre los 10 y 15 kW/m y en menor grado en las líneas de potencia de 40 a 60 kW/m.

Primavera:

En primavera hay un aumento de la probabilidad de incidencia teniendo máximos de mas del 20%, encontrándose estos máximos entre 10 y 20 kW/m (**Fig.18, 1972, 1993**), aunque también se observan máximos en las isolíneas de 20 a 30 kW/m (**Fig.18, 1993**). En esta estación, se observan períodos más cortos a comparación de los registrados en invierno. En períodos niño (**Fig. 18, 1998**), se observan dos máximos de probabilidad, los cuales se encuentran entre los 20 y 30 kW/m, y a diferencia de los otros años estos se encuentra para el primero, de $H_s = 3$ m y $T_{m2} = 6$ s, mientras que para el segundo de $H_s = 2.5$ s $T_{m2} = 8$ s.

Verano:

En verano se registra la menor variabilidad del año, teniendo máximos de probabilidad de más del 30%, para líneas de potencia de entre 10 y 20 kW/m, (**Fig. 18, 1972, 1993**). Para años atípicos como el de 1998, la variabilidad también disminuye, a comparación de las otras estaciones teniendo su máximo entre los 20 y 30 kW/m a $H_s = 2.5$ m a $T_{m2} = 8$ s.

Otoño:

La probabilidad de ocurrencia en este período, vuelve a disminuir, teniendo sus máximos de probabilidad no mayor al 15 %, en las líneas de potencia de 10 y 20 kW/m, aunque con una gran aportación, en las líneas de 20 y 30 kW/m (**Fig. 18, 1972, 1993**). En 1998, la mayor parte de la potencia se encuentra entre los 10 y 20 kW/m, pero también muestra concentraciones altas entre los 20 y 30 kW/m.

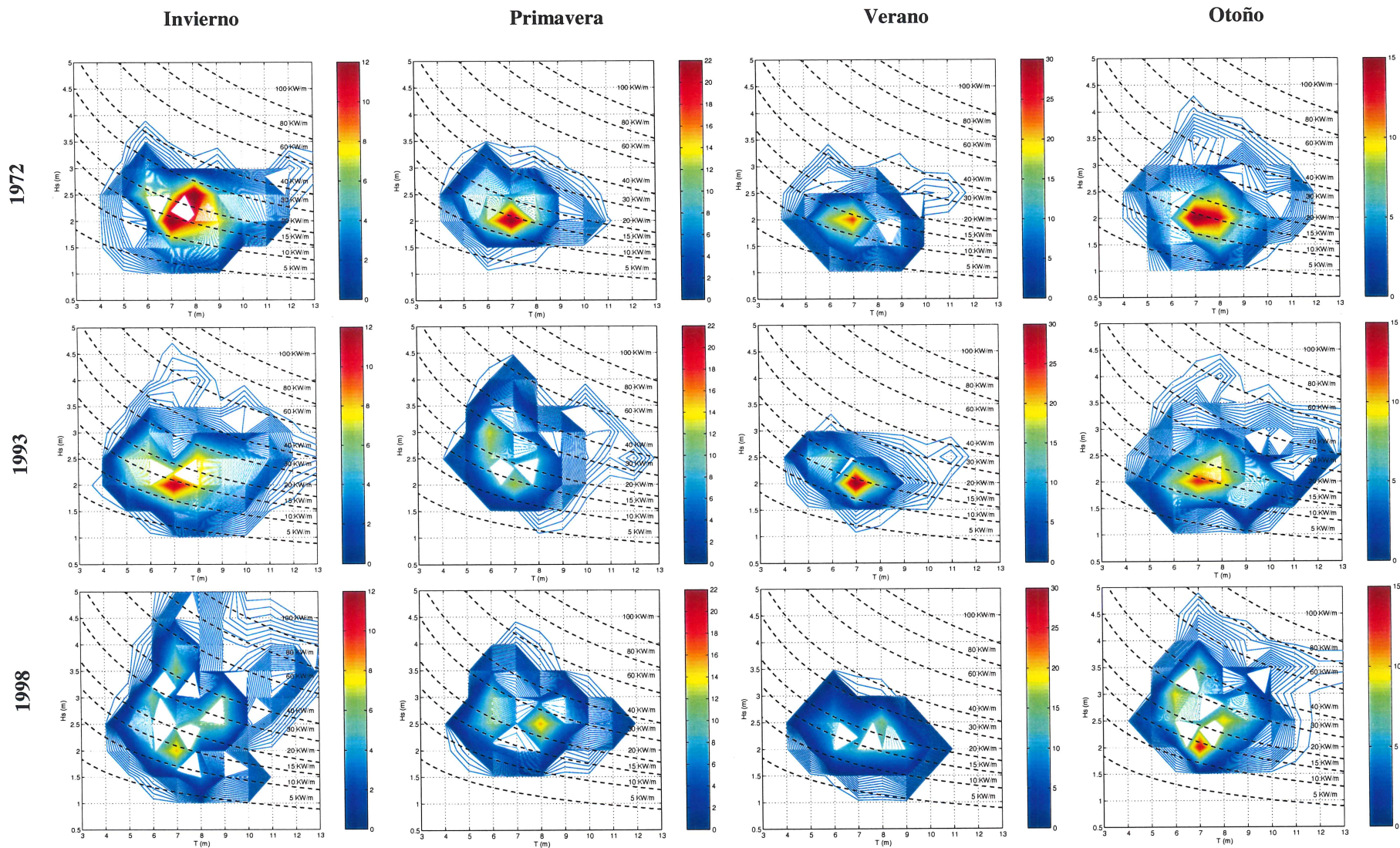


Figura 18. Distribución de la Potencia Teórica Total estacional, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Guadalupe

Potencia Mensual:

La potencia mensual, también se muestra variable en Isla Guadalupe (**Fig.19**). El mes de Enero se muestra similar a la potencia anual, teniendo su máximo entre los 10-15 KW/m y en $Tm_2 = 7$ s y $Hs = 2$, con una probabilidad de ocurrencia cercana al 15 %, a diferencia del mes de febrero, donde la mayor probabilidad de ocurrencia, se encuentra entre las líneas de potencia de 20 y 30 kW/m, en $Tm_2 = 8$ s y $Hs = 2.5$ m, en marzo se observan dos máximos de probabilidad, en las isolas de 20-30 kW/m, la primera en $Tm_2 = 6$ s. y $Hs = 3$ m. y la segunda en $Tm_2 = 8$ s y $Hs = 2.5$ m, con probabilidades no mayores al 10%. Febrero junto con diciembre tienen sus máximos de ocurrencia en las potencias anuales más altas, pero también muestran ser los más variables.

El mes de abril, se comporta de la misma manera, mostrando un máximo de ocurrencia en potencias altas, teniendo su máximo de probabilidad, entre los 20 y 30 kW/m a los 6 s de Tm_2 y 3 m. de Hs , con probabilidades cercanas al 20 %. Mayo, Julio, Agosto y Septiembre, muestran una ocurrencia de entre 20 y 30 %, ubicadas en potencias de entre 10 y 15 kW/m en $Tm_2 = 7$ s. y $Hs = 2$ m., a diferencia de junio, donde el máximo de ocurrencia se encuentra entre los 15 y 20 kW/m con períodos de 6 segundos y alturas de 2.5 metros.

Octubre, muestra dos máximos, uno en 10 kW/m en $Tm_2 = 6$ s y $Hs = 2$ m y el otro justo en la isolínea de 15 kW/m en $Tm_2 = 8$ s y $Hs = 2$ m., con una probabilidad de ocurrencia cercana al 20 %. Noviembre presenta la misma dualidad pero con un aumento en la potencia y una disminución en su probabilidad de ocurrencia, donde sus máximos tienen una ocurrencia menor al 15%, el primer máximo se encuentra en la isolínea de 15 kW/m y el segundo en la de 20 kW/m, en alturas de 2 m. y períodos de 7 y 10 s respectivamente. Diciembre, muestra su máximo de ocurrencia entre los 20 y 30 kW/m en $Tm_2 = 8$ s. y $Hs = 2.5$ m.

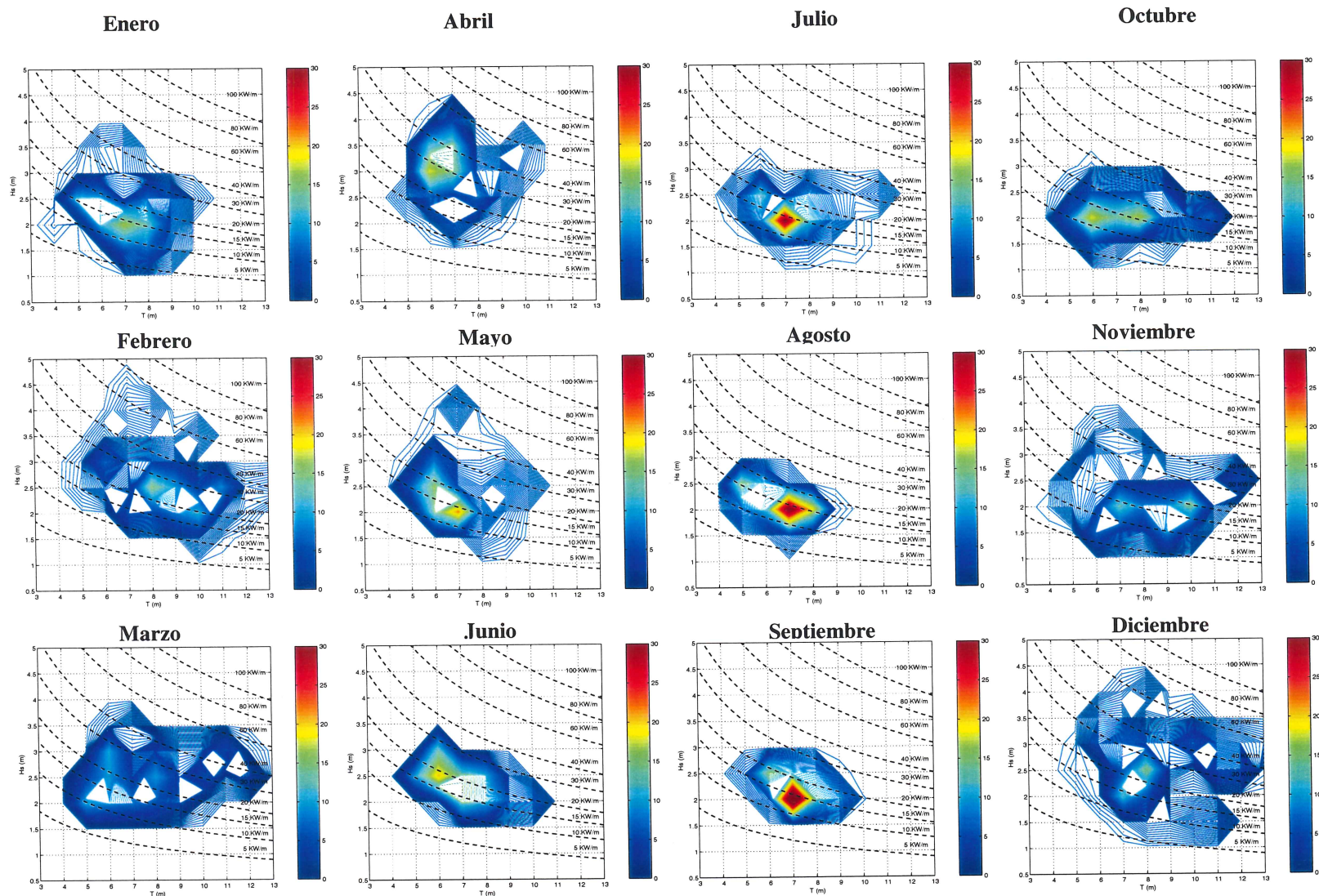


Figura 19.- Distribución de la Potencia Teórica Total mensual, por unidad de ancho (KW/m), en Isla Guadalupe para 1993.

b) Potencia Teórica, en base a los primeros 10 estados de mar :

La tabla IV, muestra la probabilidad de ocurrencia, de la potencia, para los primeros 10 estados de mar en Isla Guadalupe, los cuales comprenden para el registro histórico el 68.5 % del total del oleaje incidente. La suma de la potencia y de la densidad de potencia de los primeros 10 estados de mar, comprenden de un 84.75 a 164 kW/m de potencia

Tabla IV. Probabilidad de ocurrencia y potencia por unidad de ancho, para los 10 estados de mar más representativos, del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en Isla Guadalupe.

#	Hs	Ts	Probabilidad (%)	Potencia (kW/m)	
				Mínimo	Máximo
1	1.5-2.0	6-7	16.21	6.62	13.73
2	1.5-2.0	5-6	8.67	5.51	11.77
3	1.5-2.0	7-8	8.63	7.72	15.69
4	2.0-2.5	7-8	6.29	13.73	24.53
5	2.0-2.5	5-6	6.14	9.81	18.39
6	1.5-2.0	8-9	4.87	8.83	17.66
7	2.0-2.5	6-7	4.66	11.77	21.46
8	1.0-1.5	6-7	4.53	2.94	7.72
9	1.0-1.5	5-6	4.39	2.45	6.62
10	2.5-3.0	5-6	4.19	15.33	26.49
TOTAL			68.57	84.75-164.10	

Potencia anual y estacional:

El porcentaje promedio de ocurrencia anual de los primeros 10 estados de mar, es mayor al 70 % del tiempo, donde la suma de los primeros 10 estados de mar tiene una potencia por unidad de ancho que va de los 80 kW/m hasta los 190 kW/m. El comportamiento estacional muestra que la menor probabilidad de ocurrencia se da en Invierno con un 62% sin embargo la mayor cantidad de energía de los primeros 10 estados de mar es la mayor con valores que van de mas de 80 kW/m hasta mas de los 220 kW/m. Verano presenta los máximos de ocurrencia del año, aunque también presenta los mínimos de potencia, con una producción de los primeros 10 estados de mar que va de menos de 60 kW/m hasta los casi 160 kW/m. La estación de primavera se observa como la mas propicia con porcentajes de ocurrencia cercanos al 80% y una suma de potencias de los primeros 10 estados de mar, muy cercana a la observada en Invierno (*Fig.20*).

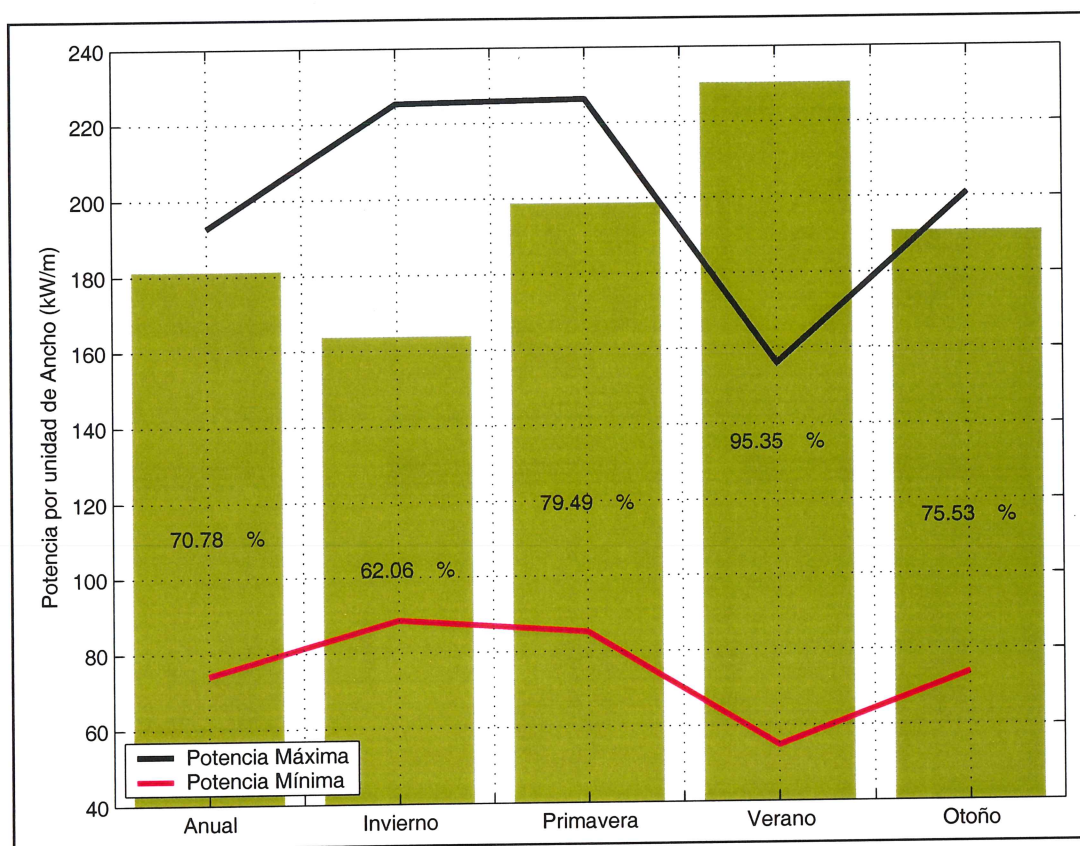


Figura 20.- Porcentaje de ocurrencia promedio anual y estacional de los primeros 10 estados de mar y la suma de potencias por unidad de ancho, mínima y máxima de los mismos, en Isla Guadalupe.

II.2.4 Interacción Ola-Dispositivo Tipo Rebase de Ola

En la tabla V y VI se muestran los resultados del dispositivo de rebase de ola, obteniéndose su probabilidad de rebase de ola (Pov), flujo (q), probabilidad de volumen de agua si sucede el rebase (Pv) y el volumen que entra por ola (Vw) para dos alturas de rampa 0.3 m y 0.9 m., se observa que la probabilidad de que un rebase ocurra, depende exclusivamente de la altura de ola, el volumen que entra por ola al contrario depende mas del período que de la altura de ola.

Para el caso de una rampa de 0.3 m (*Tabla V*), la probabilidad promedio de que un rebase ocurra es del 98.2 %, con un flujo promedio de 0.646 m³/s por ola, la probabilidad del volumen de agua, es significativamente menor que la probabilidad de rebase con un promedio de 63.13 %. Existe un volumen de agua promedio por ola, para los 10 estados de mar de 3.75 m³ disponible para una turbina hidráulica.

Tabla V. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $Rc = 0.3$ m en Isla Guadalupe

#	Hs	Tm ₂	Pov (%)	q (m ³ /s)	Pv (%)	V _w (m ³)
1	1.5	5	97.304	0.283	63.160	1.219
2	1.5	6	97.304	0.385	63.149	1.990
3	1.5	7	97.304	0.491	63.141	2.961
4	2.0	5	98.475	0.417	63.152	1.776
5	2.0	6	98.475	0.558	63.142	2.850
6	2.0	7	98.475	0.703	63.134	4.190
7	2.0	8	98.475	0.852	63.127	5.799
8	2.5	6	99.021	0.739	63.136	3.751
9	2.5	7	99.021	0.924	63.128	5.470
10	2.5	8	99.021	1.112	63.122	7.523
Promedio			98.287	0.646	63.139	3.753

Para una rampa de una altura de 0.9 m (*Tabla VI*), la probabilidad promedio de que ocurra un rebase es del 85.75%, con un flujo promedio de 0.756 m³/s por ola, la probabilidad del volumen de agua es de un 63.1 %, con un volumen de agua promedio por ola para los 10 estados de mar de 5.02 m³, disponibles.

Tabla VI. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $Rc = 0.9\text{ m}$.

#	Hs	Tm ₂	Pov (%)	q (m ³ /s)	Pv (%)	V _w (m ³)
1	1.5	5	78.201	0.189	63.127	1.014
2	1.5	6	78.201	0.330	63.127	2.123
3	1.5	7	78.201	0.504	63.111	3.777
4	2.0	5	87.082	0.341	63.134	1.641
5	2.0	6	87.082	0.566	63.115	3.268
6	2.0	7	87.082	0.834	63.100	5.608
7	2.0	8	87.082	1.134	63.088	8.715
8	2.5	6	91.528	0.841	63.105	4.613
9	2.5	7	91.528	1.207	63.091	7.724
10	2.5	8	91.528	1.612	63.079	11.785
Promedio			85.752	0.756	63.110	5.027

Se probaron 5 alturas de rampa (0.3, 0.6, 0.9 1.2 y 1.5 m), para conocer la altura óptima y observar su respuesta a los estados de mar dados (**Fig. 21**). Los valores graficados son los promedios de los 10 estados de mar para 5 alturas de rampa. La probabilidad de rebase (**Fig.21-a**) disminuye junto con el aumento de la altura de la rampa (Rc), de un 98% hasta un 66% de su probabilidad, en cambio la probabilidad de volumen de agua (**Fig.21-b**), no experimenta cambios significativos con respecto a la altura de la rampa, manteniéndose casi constante en un 63% de probabilidad. El flujo experimenta un aumento al aumentar la altura de ola (**Fig. 21-c**), pero después de 0.6 m donde alcanza su máximo (0.8 m³/s) este empieza a disminuir siendo mas evidente después de los 0.9 m, llegando hasta 0.5 m³/s en una altura de 1.5 m. El volumen de agua por ola también tiende una tendencia a aumentar (**Fig. 21-d**), hasta un máximo cercano a 0.9 m el cual tiene un volumen de agua de 5.02 m³, donde posteriormente tiene una tendencia a disminuir donde a 1.5 m, el volumen de agua por ola es de 4.3 m³/s

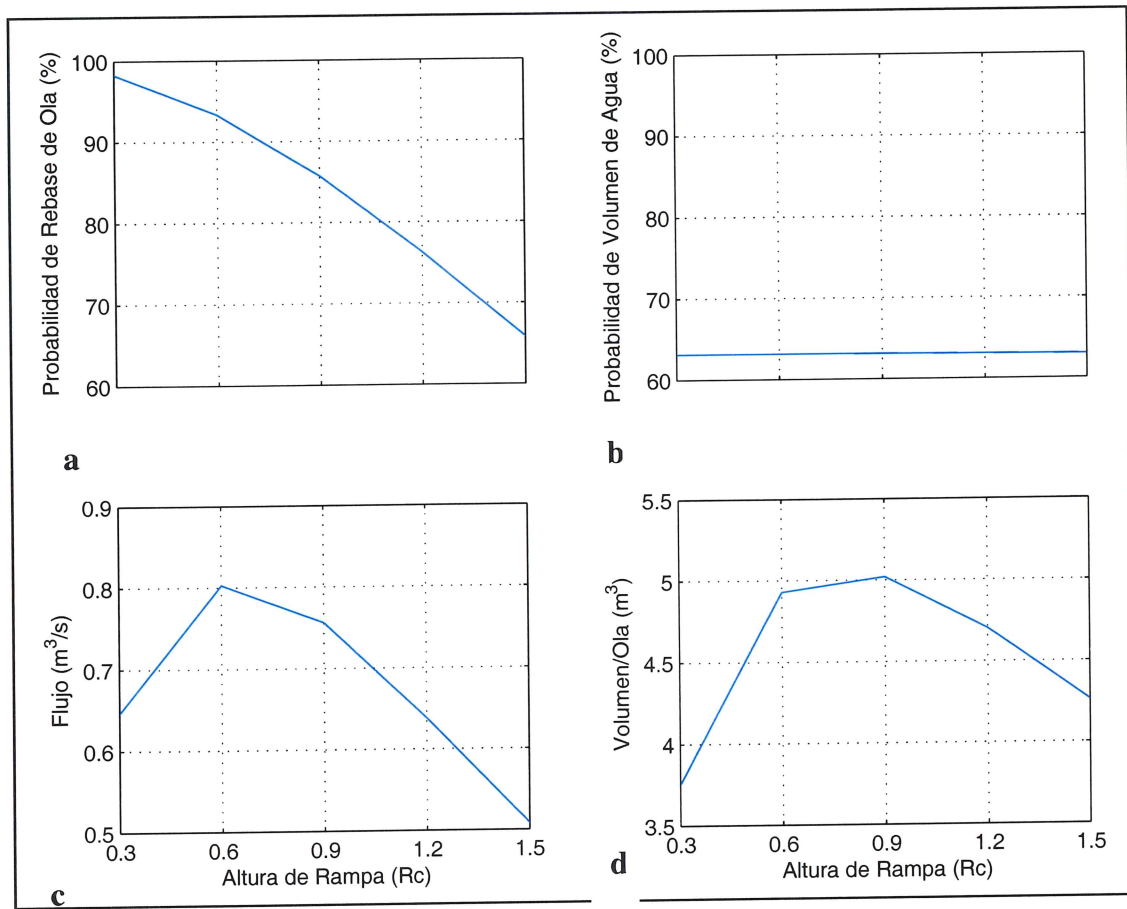


Figura 21. Interacción oleaje-dispositivo para 5 alturas de rampa en Isla Guadalupe
a) Probabilidad de Rebase de ola (P_{ov}), **b)** Probabilidad de Volumen de agua (P_v), **c)** flujo (q) y **d)** volumen por ola promedio (V_w).

II.2.5 Producción de Energía para Dispositivo Oscilante

La tabla VII y VIII muestran dos de las combinaciones de diámetro hechas, donde a partir de ellas y los estado de mar se obtiene la altura dentro del dispositivo (η_1), la velocidad en la entrada (v_1), la velocidad de la salida (v_2), el flujo (Q), la diferencia de presión ($p_2 - p_0$), la potencia neumática, disponible para la turbina (P_n), y la eficiencia (η_{ef}).

Tabla VII. Potencia Neumática disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más representativos, para un diámetro de entrada $D_1 = 0.5 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 0.1 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 0.5 \text{ m}$, en Isla Guadalupe.

#	Hs	Tm ₂	η_1 (m)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	Q (m ³ /s)	$p_2 - p_0$ (kW/m ²)	P_n (kW)	η_{ef} (%)
1	1.5	5	0.744	0.4077	10.193	0.0801	123.014	0.0098	0.3569
2	1.5	6	0.741	0.4887	12.218	0.096	176.7468	0.017	0.5122
3	1.5	7	0.738	0.5694	14.2356	0.1118	239.9405	0.0268	0.6944
4	2.0	5	0.992	0.5436	13.5906	0.1067	218.6916	0.0233	0.4758
5	2.0	6	0.989	0.6516	16.2907	0.1279	314.2165	0.0402	0.6829
6	2.0	7	0.985	0.7592	18.9808	0.1491	426.5609	0.0636	0.9258
7	2.0	8	0.980	0.8664	21.6595	0.1701	555.4526	0.0945	1.2038
8	2.5	6	1.236	0.8145	20.3633	0.1599	490.9633	0.0785	0.8536
9	2.5	7	1.231	0.949	23.726	0.1863	666.5014	0.1242	1.1573
10	2.5	8	1.225	1.083	27.0743	0.2126	867.8946	0.1846	1.5047
Promedio						0.1401	407.9982	0.0663	0.8367

En la tabla VIII, el porcentaje de eficiencia promedio para un dispositivo con un diámetro de entrada de 0.5 m y de salida de 0.1 m tiene una eficiencia promedio de 0.836 % de la energía del oleaje y una potencia neumática disponible promedio para la turbina, de 0.066 kW. En la tabla VIII para un diámetro de entrada de 3.0 m y de salida de 0.3 m, la eficiencia es mayor con un promedio de 5.86% y una potencia neumática disponible promedio de 2.78 kW.

Tabla VIII. Potencia Neumática disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más representativos, para un diámetro de entrada $D_1 = 3.0 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 0.3 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 1.2 \text{ m}$, en Isla Guadalupe

#	Hs	Tm ₂	η_1 (m)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	Q (m ³ /s)	$p_2 - p_0$ (kW/m ²)	Pn (kW)	η_{ef} (%)
1	1.5	5	0.747	0.1701	17.0134	1.2026	342.7	0.4121	2.489
2	1.5	6	0.746	0.2041	20.4066	1.4425	493.1	0.7112	3.579
3	1.5	7	0.745	0.2379	23.7946	1.6819	670.4	1.1275	4.864
4	2.0	5	0.996	0.2268	22.6845	1.6035	609.3	0.9769	3.318
5	2.0	6	0.995	0.2721	27.2088	1.9233	876.5	1.6858	4.772
6	2.0	7	0.993	0.3173	31.7262	2.2426	1191.8	2.6726	6.485
7	2.0	8	0.991	0.3624	36.2356	2.5613	1554.6	3.9819	8.454
8	2.5	6	1.244	0.3401	34.011	2.4041	1369.6	3.2926	5.965
9	2.5	7	1.242	0.3966	39.6577	2.8032	1862.1	5.22	8.106
10	2.5	8	1.239	0.4529	45.2945	3.2017	2429.1	7.7772	10.56
Promedio						2.1067	1139.9	2.7858	5.860

La tabla IX muestra 5 combinaciones de diámetro y longitud sumergida. La potencia promedio, disponible para la turbina va de 0.066 hasta 10.92 kW con una eficiencia que va de un 0.88 % hasta un 5.86%. Hay una tendencia a aumentar, de parte de la potencia neumática, debido al aumento del área de entrada del dispositivo, sin embargo, este aumento también depende de la combinación de los diámetros y la profundidad del dispositivo, como se observa en la tercera combinación con respecto a la cuarta.

Tabla IX. Potencia disponible para una turbina y la eficiencia del dispositivo, a diferentes diámetros de entrada, salida y longitud sumergida en Isla Guadalupe

#	D ₁ (m)	D ₂ (m)	L (m)	Pn (kW)	η_{ef} (%)
1	0.5	0.1	0.5	0.066	0.886
2	1.0	0.2	0.6	0.153	0.970
3	3.0	0.3	1.2	2.785	5.86
4	6.0	0.6	2.0	2.413	2.537
5	15	1.2	3.0	10.924	4.590

A medida que aumenta el área de acción del dispositivo, mayor oleaje puede captar y mayor será la potencia disponible, sin embargo, la eficiencia obedece más a la combinación de los diámetros y su profundidad, mas que al área de acción del dispositivo, donde la eficiencia del mismo para las 5 combinaciones disminuye y aumenta, independientemente del área de entrada del dispositivo. (*Fig. 22*).

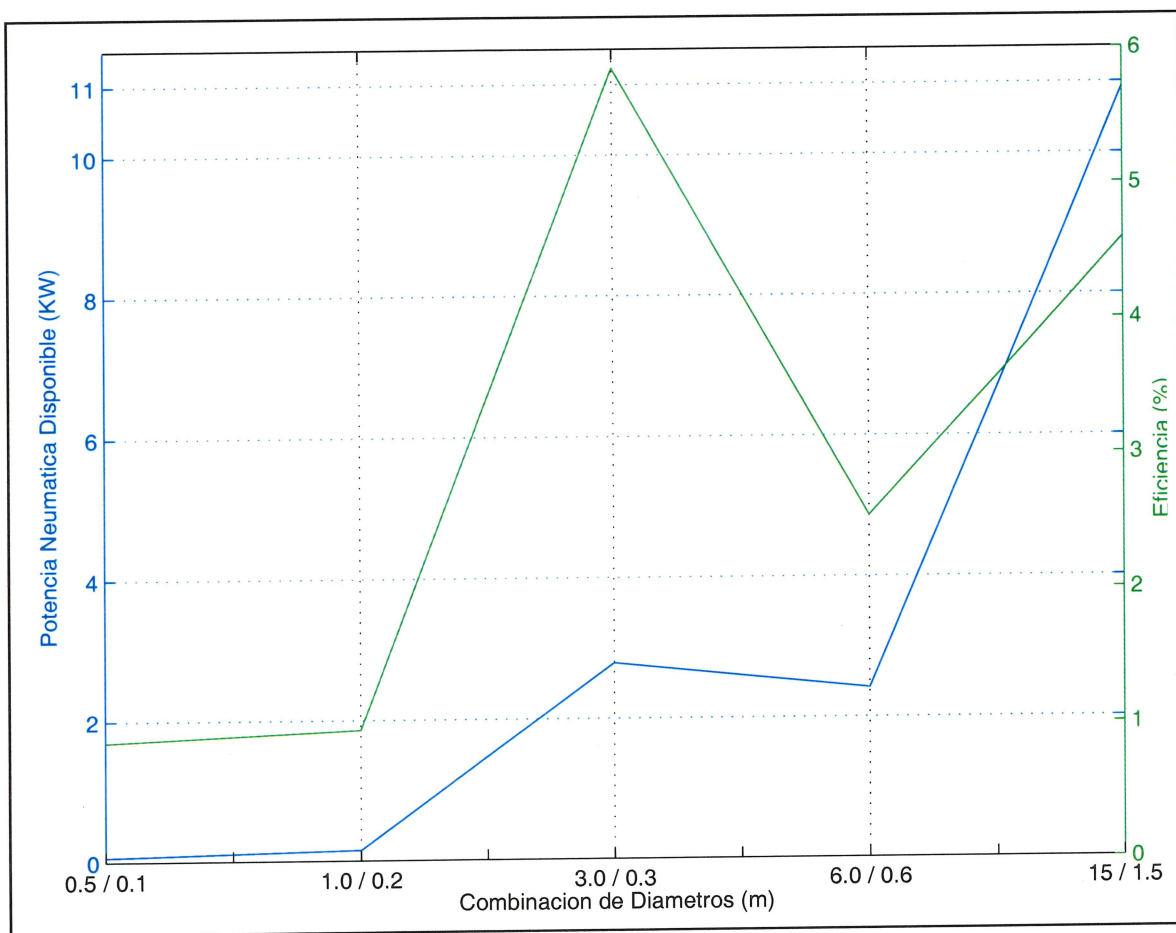


Figura 22.- Potencia disponible para la turbina contra el porcentaje de eficiencia para 5 combinaciones de diámetro de entrada y salida del dispositivo oscilante en Isla Guadalupe

II.3 CASO II: ISLA SOCORRO

II.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

II.3.1.1 Localización

La Isla Socorro, cuyo nombre oficial es Isla Benito Juárez, es parte del Archipiélago de Revillagigedo, con una extensión de 132 km², se encuentra localizada en el océano Pacífico a 600 km., al oeste de las costas de Colima, a los 18° 47' 04" de latitud norte y 110° 58' 30" de longitud oeste (*INEGI, 1993*), siendo parte del estado de Colima, México (*Fig.23*).

II.3.1.2 Estadística Poblacional

Población:

Existe en esta isla solamente un destacamento militar con 55 marinos que se encuentran todo el año, además de grupos de investigadores que se encuentran por temporadas en la isla

Actividad Productiva:

Los habitantes de la isla dependen enteramente de los envíos del continente. Alrededor de la isla existe bastante actividad pesquera debido a sus extensos recursos pesqueros. El cultivo no es posible en la isla debido a la falta de agua dulce, que solamente se produce por medio de una planta desalinizadora para consumo humano

Infraestructura:

La infraestructura de la isla es un pequeño puerto para los barcos de la marina, el campamento militar y algunas casas utilizadas por diferentes investigadores a lo largo del año.

II.3.1.3 Consumo de Energía

Debido a que no se conoce el consumo del campamento militar, de Isla Socorro, utilizaremos los datos obtenidos por la CONAE (Consejo Nacional para el Ahorro de la Energía), 2003, donde establece que el consumo diario de una persona es menor a 0.7 kW/h, considerando esto para el campamento militar tendríamos un consumo mensual aproximado de 38.5 kW/h.

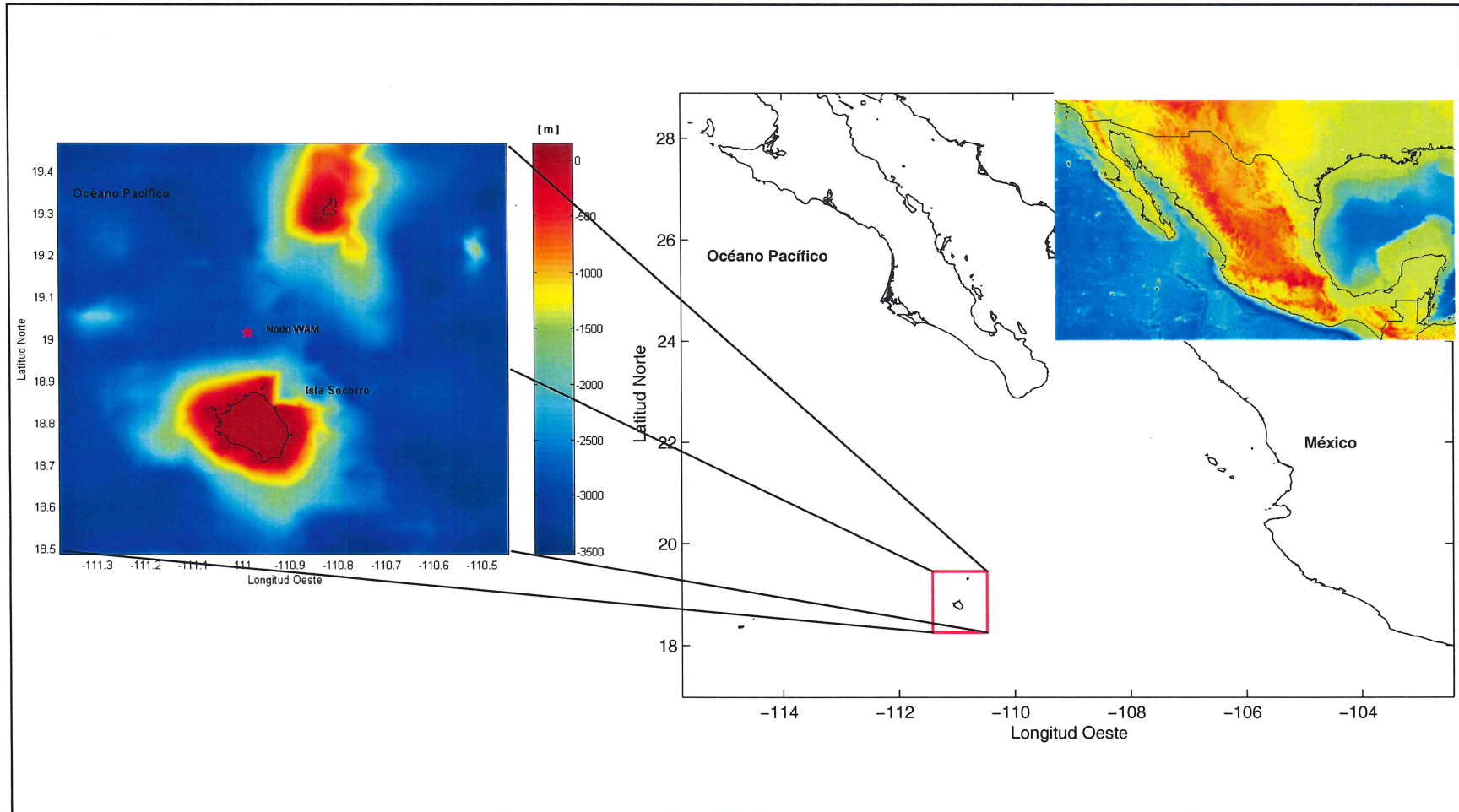


Figura 23.- Localización de Isla Socorro, México y el nodo generado por el modelo WAM (*)

II.3.2 CARACTERIZACION DEL OLEAJE LOCAL

En base al registro histórico de 1948-2002, el oleaje en Isla Socorro, tiene una dirección predominante SW, entre los 210° y 220°. La altura significativa tiene un promedio de 1.80 m y las alturas predominantes se encuentran entre los 1.5 m y 2.0 m, llegando a alturas de mas de 4 m. El promedio del período medio del momento dos es de 7.25 s, con períodos predominantes de 7 a 8 s., con máximos de hasta mas de 14 segundos. La frecuencia asociada al pico espectral es de 0.074 Hz con una densidad de energía en el pico espectral de 2.407 m²/Hz/grado. Estas características se resumen en la tabla X

Tabla X.- Resumen de las Características del Oleaje del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en Isla Socorro.

	Hs (m)	Tm₂ (s)
Promedio	1.803	7.253
Desviación Estándar	0.347	1.215
Mínimo	0.591	3.351
Máximo	4.523	14.180
Valor Predominante	1.5-2.0	7-8
Dirección Predominante (θ)	210°-220°	SW
Frecuencia Asociada al Pico Espectral (Hz)	0.074	
Pico Espectral (m ² /Hz/grado)	2.407	

II.3.2.1 Variabilidad y Comportamiento Anual

Los espectros direccionales anuales (**Fig.24**), muestran dos picos espectrales predominantes, uno al NW en los 300° y el otro al SW en los 210°, siendo este último el más energético (2000) a excepción de años atípicos o niño donde el máximo se encuentra en el NW (1987, 1995, 1998) La frecuencia asociada al pico espectral típica es de 0.074 Hz., usualmente asociada a direcciones SW y densidades máximas de energía que van de 2 a 2.6 m²/Hz/grado. En años niño (1987, 1998) y excepciones (1995) la frecuencia asociada al pico espectral disminuye a 0.0673, sin embargo se presenta un aumento en la energía del oleaje variando de 2.8 a 3.5 m²/Hz/grado.

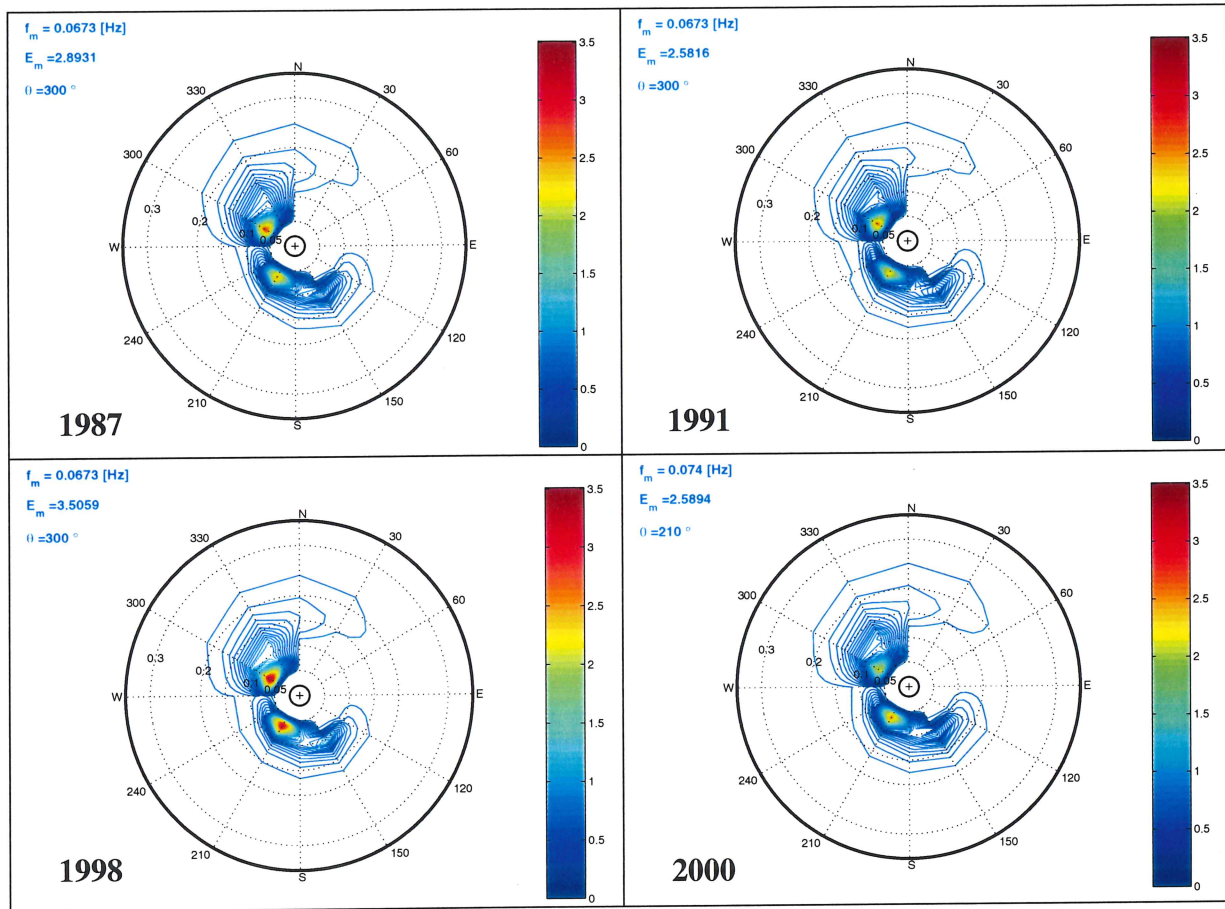


Figura 24.- Comportamiento Anual del Espectro Direccional del Oleaje en Isla Socorro

Las distribuciones conjuntas de H_s y T_{m2} anuales, muestran que la mayor parte del oleaje se concentra entre 1.5 y 2.0 m de H_s y de 6 a 8 s de T_{m2} (**Fig. 25a y 26a**). En años niño (1987, 1998) se observa una tendencia a alturas significantes de 2 a 2.5 m con periodos de 6 a 8 s, acompañado de una mayor variabilidad, sin embargo este aumento de H_s y T_{m2} , también se ve reflejado en los últimos años (2000) sin tener ese aumento en la variabilidad. La mayor parte del oleaje proviene del oeste y suroeste entre los 200° y los 290° , con excepciones (1955, 1998), donde la mayor probabilidad direccional se encuentra en alturas de ola significativa de 1.5 a 2.0 m (**Fig. 25b y 26b**). Se observa un claro aumento de la altura de ola para el año de 1998 con alturas de ola de 2.0 a 2.5 m. La dirección del período es típicamente SW, donde la mayor parte del período varía de los 210° a los 240° entre 6 y 8 s (**Fig. 25c y 26c**). Esta dirección observa un cambio drástico, en años como 1955 y 1998 con direcciones predominantes de 300° y 310° respectivamente.

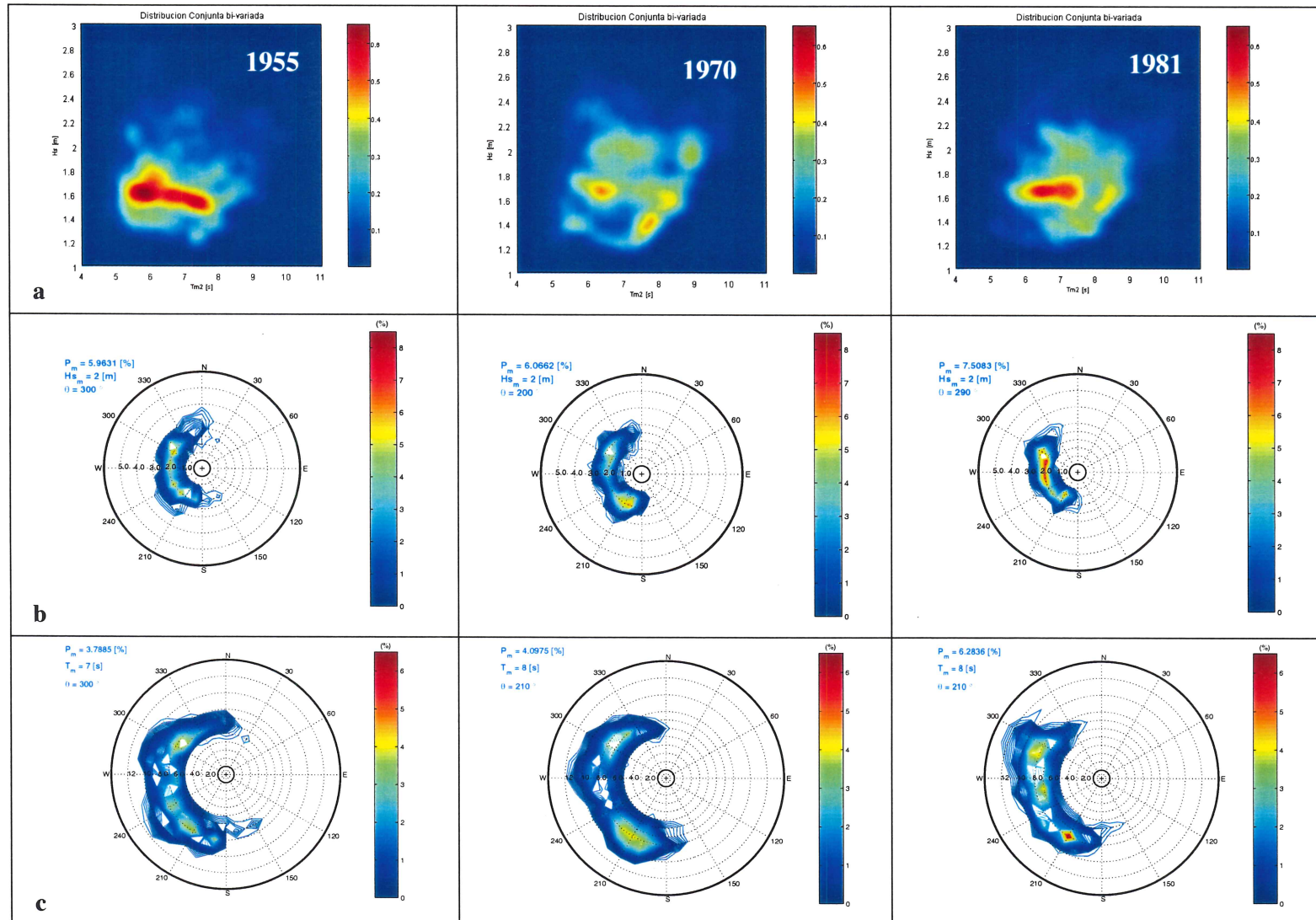


Figura 25.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1955, 1970 y 1981 en Isla Socorro: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

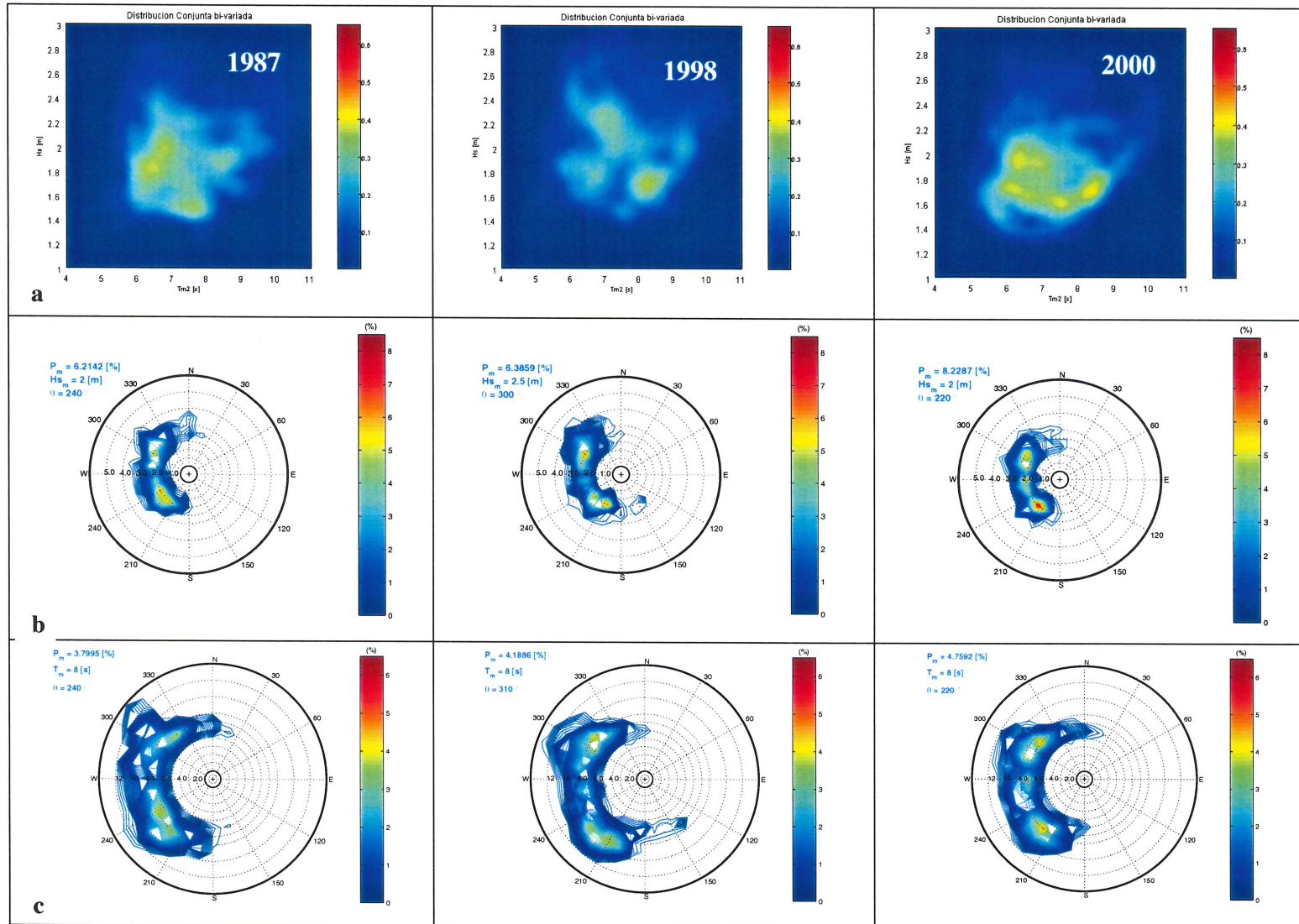


Figura 26.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1987, 1998 y 2000 en Isla Socorro: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2}).

II.3.2.2 Variabilidad y Comportamiento Estacional

El espectro direccional de 1994 (*Fig. 27*), muestra la variabilidad estacional típica de la Isla Socorro. A excepción de invierno donde la mayor parte de la energía proviene del NW a los 300° , el resto del año, la mayor parte de la energía del oleaje proviene del suroeste a los 210° .

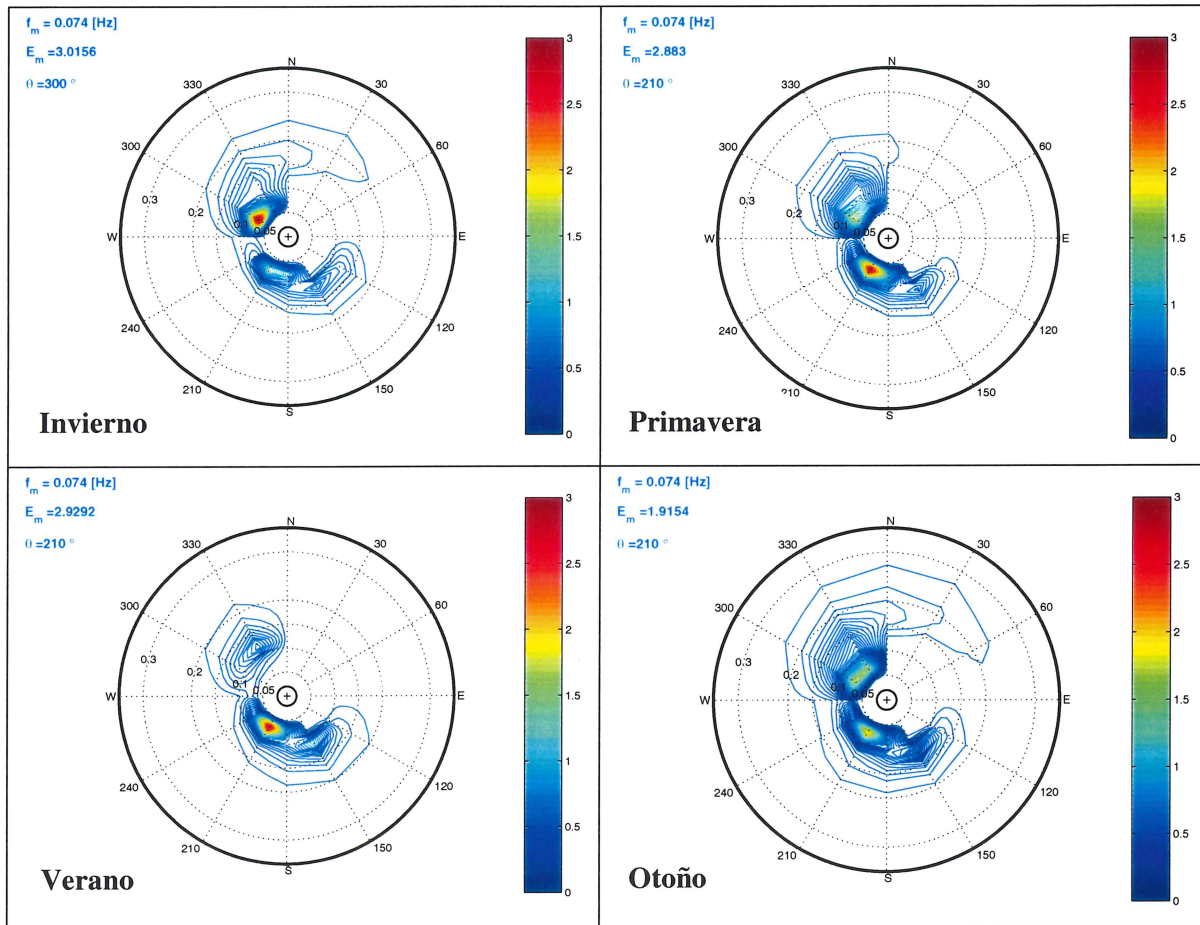


Figura 27.- Variabilidad Estacional del Espectro Direccional del Oleaje para 1994, en isla Socorro

La mayor densidad de energía se da en invierno con una densidad de 3.01 m²/Hz/grado, seguido muy de cerca por el verano con 2.92 m²/Hz/grado, la estación con menor energía es otoño (1.91 m²/Hz/grado). La evolución estacional del oleaje es muy

clara, en invierno la mayor parte de la energía proviene del noroeste, aunque existe una cantidad considerable del suroeste, en primavera hay un cambio abrupto donde la dirección predominante es el suroeste a pesar de que una buena parte del oleaje sigue viniendo del noroeste este se ve disminuido considerablemente. En verano el oleaje es netamente suroeste, donde la aportación del oleaje del noroeste, es muy pequeña, otoño es una etapa de transición donde si bien el pico espectral sigue siendo suroeste, este es muy cercano a la energía aportada por el noroeste.

Invierno:

La distribución conjunta de H_s y T_{m2} (**Fig. 28a**), en invierno muestran que la mayor parte del oleaje en años típicos se encuentra entre los 1.5 y 2.0 m, con períodos de 5 a 8 s. y una probabilidad conjunta mayor al 0.6 % en eventos niño la variabilidad aumenta y la H_s y el T_m , también, con valores que van de 1.5 a 2.5 m de H_s y períodos de 6 a 8 s. La distribución direccional conjunta muestra que la mayor parte de las H_s provienen del noroeste entre 290° y 310° con probabilidades máximas mayores al 13% para alturas de 2 a 2.5 m (**Fig.28b**). En la distribución direccional del periodo (**Fig.28c**) se observa que la dirección predominante del período es noroeste entre los 290 y 310° , entre los 7 y 8 s, con probabilidades máximas mayores al 10%.

Primavera:

La distribución bi-variada en primavera (**Fig. 29a**), muestra una distribución similar a la del invierno, pero menos variable con probabilidades conjuntas de hasta 1.2%, donde la mayor parte del oleaje, se encuentra entre alturas significantes iguales a las de invierno y períodos de 6 a 8 s en años típicos (1955, 1981 y 2000), para 1998 el oleaje es mas variable y se encuentra entre 1.8 y 2.6 m y con un periodo de entre 7 a 9 s. La distribución direccional de la altura de ola (**Fig. 29b**), muestra que la dirección predominante cambia ahora de noroeste y oeste a suroeste, con direcciones que van de los 220° a los 280° , la probabilidad máxima llega a valores mayores al 10 % para alturas de ola de 2 m. excepto en 1998, donde el máximo se encuentra en H_s de 2.5m. La distribución direccional del período (**Fig. 29c**), muestra direcciones predominantes oeste y suroeste

con direcciones entre 220° a 280°, y con ocurrencias mayores al 10% para periodos de entre 7 y 9 s.

Verano:

La variabilidad del oleaje se ve disminuida en verano, donde la distribución bi-variada muestra que la mayor parte del oleaje se encuentra entre alturas de 1 a 1.5 m y periodos de 6 a 8 s. con probabilidades conjuntas de hasta 1.6 % (**Fig. 30a**), a excepción de 1998 donde el oleaje se encuentra entre 1.5 y 2.0 m de altura y con periodos de 7 a 9 s. La distribución direccional de la altura significativa muestra que la dirección predominante es netamente suroeste y casi sur con direcciones que van de los 190° a los 220° con máximos de probabilidad de más del 20 % para olas de entre 1.5 y 2.0m. (**Fig. 30b**). El período tiene una dirección predominante suroeste y sur con direcciones que van de los 190° a los 220° y con probabilidades máximas de hasta un 16% para periodos de 7 a 8 s, a excepción del verano de 1998 con un período predominante de 9 s (**Fig. 30c**).

Otoño:

En otoño vuelve a aumentar la aleatoriedad del oleaje y la distribución conjunta bi-variada de Hs y Tm2 (**Fig. 31a**), muestra que la mayor parte del oleaje se encuentra entre 1.5 y 2.0 m con periodos de 5 a 8 s. en años típicos con probabilidades conjuntas de hasta 1 %, para años con evento niño (1998) , la mayor parte del oleaje se encuentra entre 2 y 2.5 m y entre 6 y 9 s. La dirección predominante de la altura significativa (**Fig. 31b**), muestra que la mayor parte de las alturas de ola vienen del noroeste, con direcciones de entre 270° y 310° con probabilidades de hasta un 10% que van de los 2.0 a los 2.5 m. La distribución direccional del período (**Fig. 31c**) tiene una dirección predominante noroeste con direcciones que van de los 290° a los 330° y máximos de probabilidad de hasta un 8 % en periodos de 6 a 8s.

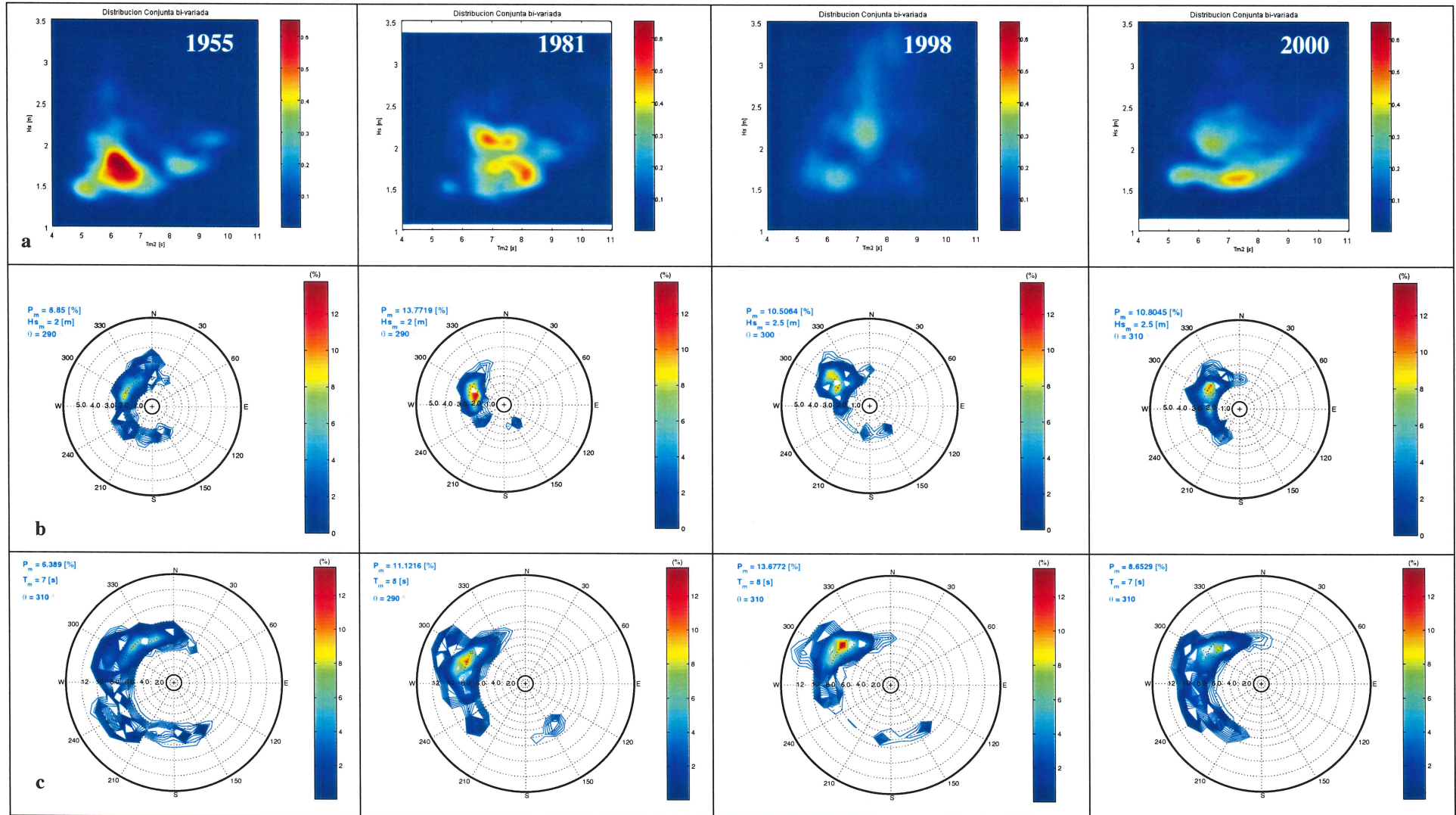


Figura 28.- Distribuciones Bi-variadas para el invierno de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

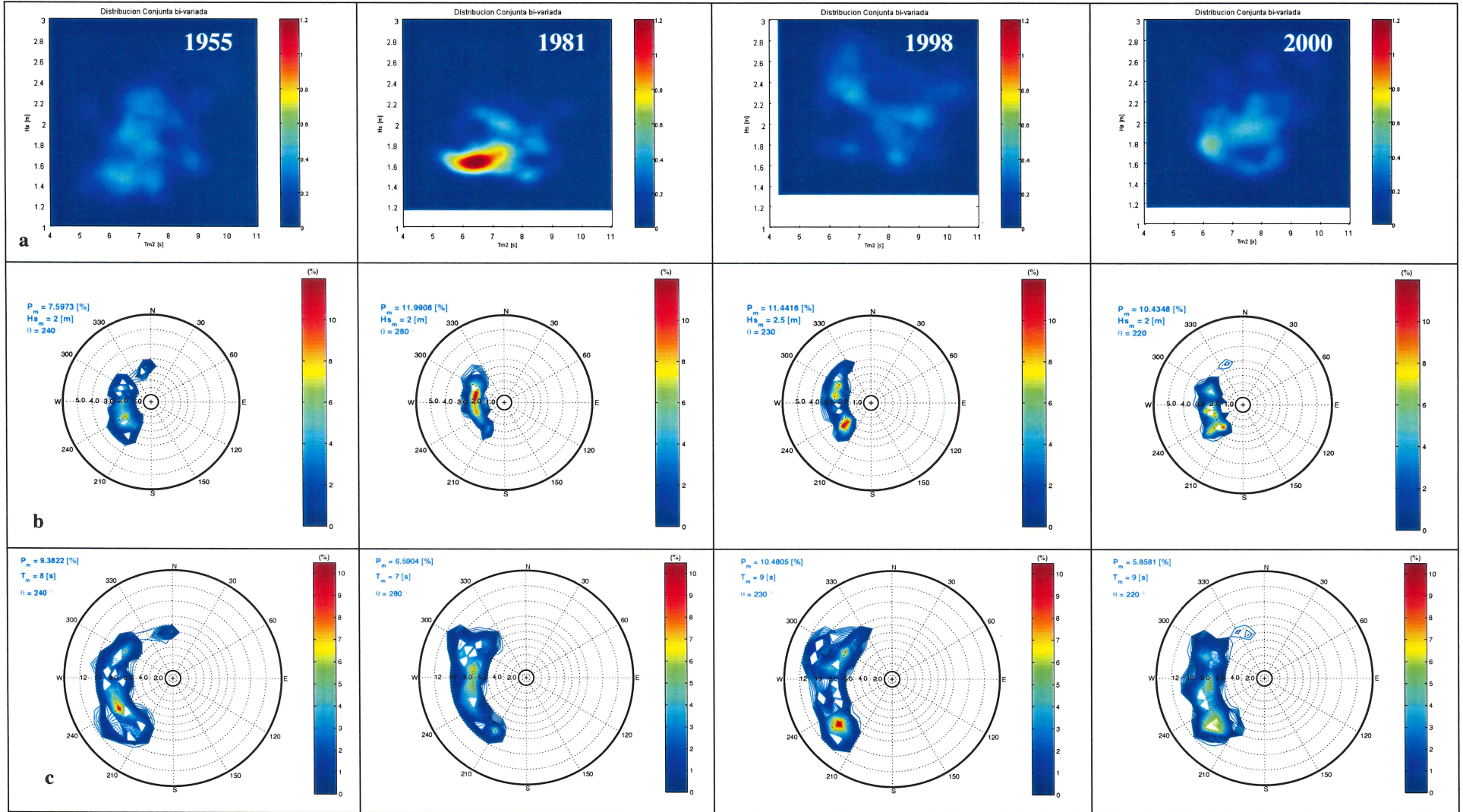


Figura 29.- Distribuciones Bi-variadas para primavera de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

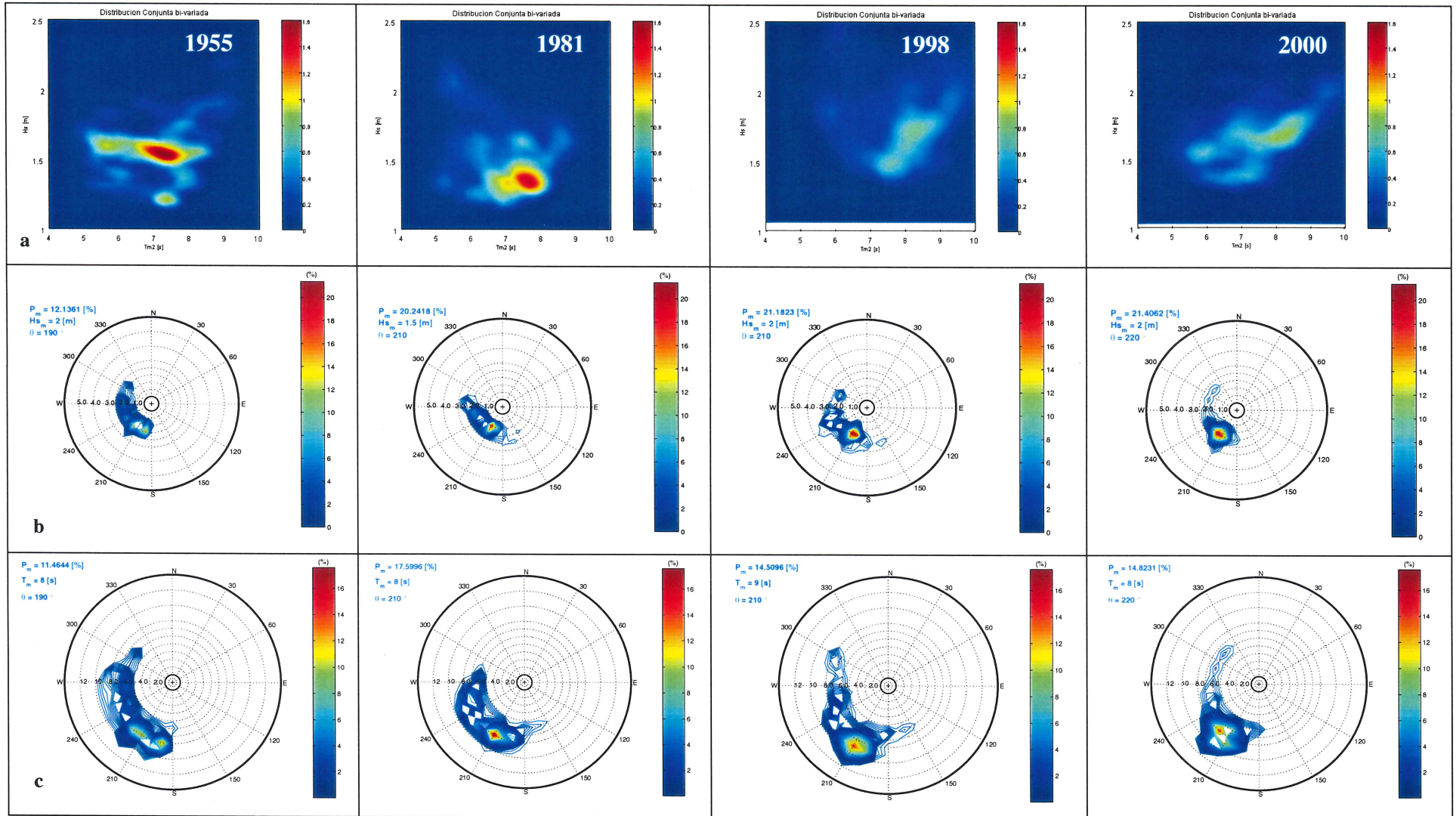


Figura 30.- Distribuciones Bi-variadas para verano de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2}).

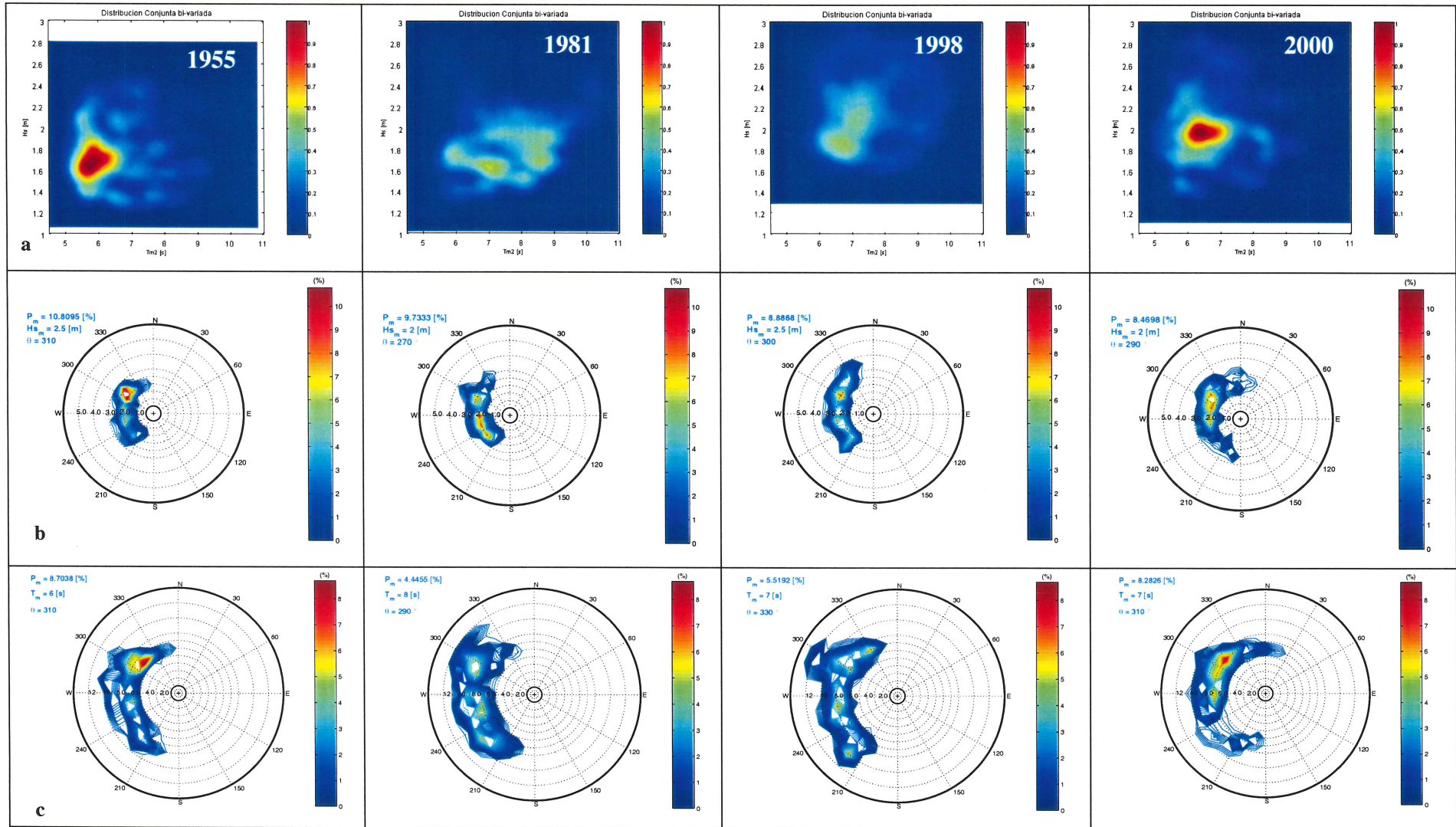


Figura 31.- Distribuciones Bi-variadas para Otoño de 1955, 1981, 1998 y 2000, en Isla Socorro: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

II.3.2.3 Análisis de Oleaje Extremo

Distribución del Oleaje Extremo:

La distribución del oleaje extremo en Isla Socorro (*Fig.32*) muestra que la probabilidad de que una ola menor a 4.5 m, ocurra, es del 90%, y el oleaje, entre 1 y 3 m, comprende el 25% de la probabilidad.

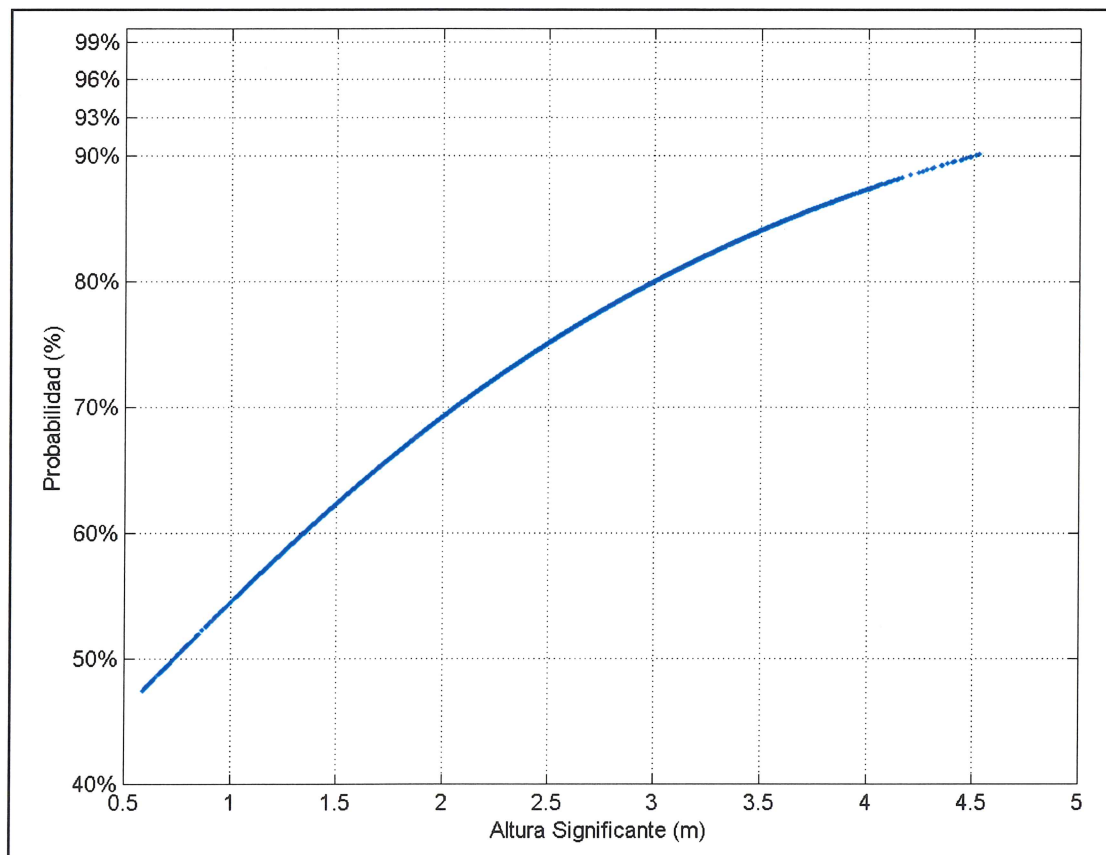


Figura 32.- Distribución Gumbel de Máximos para el registro histórico de 1948 al 2002 en Isla Socorro

Análisis de Excedencias:

La tabla XI, muestra los máximos anuales para el registro histórico de 1948 al 2002, con máximos que van desde los 2.54 m hasta los 4.52 m, los cuales se encuentran ordenados de mayor a menor, con lo cual se realiza el análisis de excedencias. Los resultados de este análisis para obtener la altura de diseño, se presentan en la tabla XII, para periodos de vida de estructura de 10, 25, 50 y 100 años y excedencias promedio ($\bar{r}$) de 2, 4 y 8. *e.j* para una estructura con un período de vida de 25 años y con una excedencia de oleaje promedio no mayor a 4 en los próximos 25 años, la altura de diseño es de 3.7 m.

Tabla XI. Máximos anuales para el registro histórico, ordenados de menor a mayor para la Isla Socorro.

Máximos Anuales				
2.54	2.81	2.99	3.21	3.59
2.60	2.82	3.03	3.21	3.61
2.62	2.88	3.04	3.23	3.70
2.68	2.90	3.04	3.28	3.78
2.70	2.91	3.07	3.32	3.89
2.72	2.93	3.12	3.35	4.00
2.73	2.95	3.14	3.37	4.01
2.73	2.96	3.15	3.50	4.04
2.76	2.96	3.16	3.53	4.05
2.79	2.97	3.19	3.58	4.09
2.80	2.98	3.20	3.58	4.52

Tabla XII.- Altura de Diseño para diferentes excedencias promedio ($\bar{r}$) y diferentes periodos, a partir de los máximos anuales en Isla Socorro

Periodo (años)	H_d $\bar{r}=2$	H_d $\bar{r}=4$	H_d $\bar{r}=8$
10	3.59	3.21	2.81
25	4.04	3.70	3.32
50	4.09	4.04	3.70
100	4.52	4.09	4.04

Probabilidad de Reincidencia:

La probabilidad de que exista una reincidencia de una determinada altura de ola, depende del oleaje incidente y del tiempo que transcurre (10, 25, 50 y 100 años). En la isla Socorro, la probabilidad de que ocurra una altura de ola mayor o igual a una altura de diseño de 4 m. es del 75 % en 10 años, del 96% en 25 años, muy cercano al 100% en 50 años y un 100% de probabilidad en 100 años (**Fig.33**).

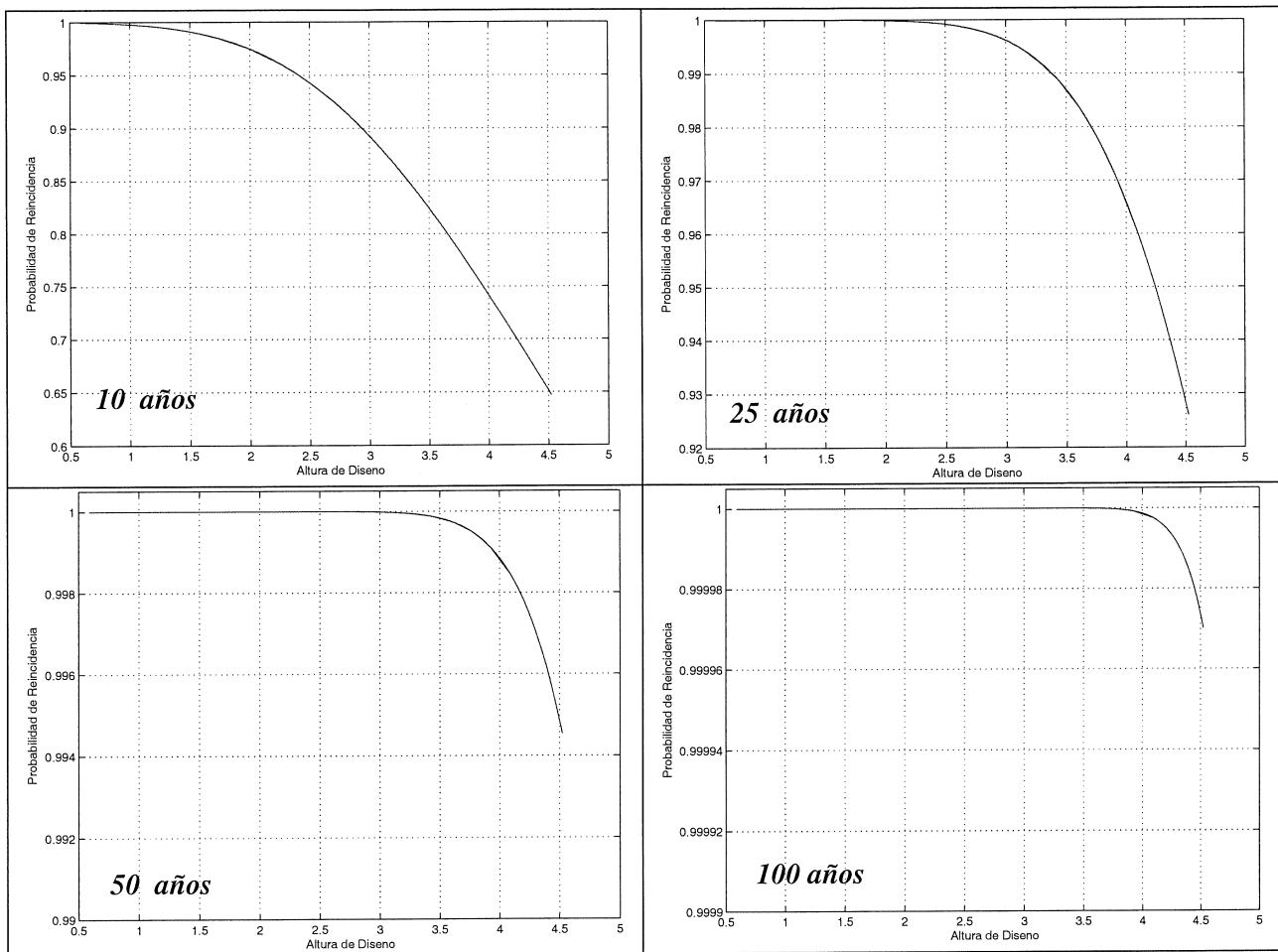


Figura 33.- Probabilidad de que la ola de diseño sea igual o sea excedida para diferentes tiempos de vida de la estructura, en Isla Socorro.

II.3.3 ESTIMACION DE LA ENERGÍA

a) *Potencia Teórica total por unidad de ancho:*

La potencia teórica por unidad de ancho en isla Socorro, se encuentra entre las isolíneas de 10 a 20 kW/m, donde el máximo de ocurrencia, se encuentra sobre la línea de potencia de 15 kW/m a un $T_{m2} = 8$ s y un $H_s = 2.0$ m. Existe una alta variabilidad del período ya que la mayor parte del oleaje se encuentra entre los 6 y 10 s entre 1.5 y 2.5 m, con probabilidades de hasta un 15 % (*Fig. 34*).

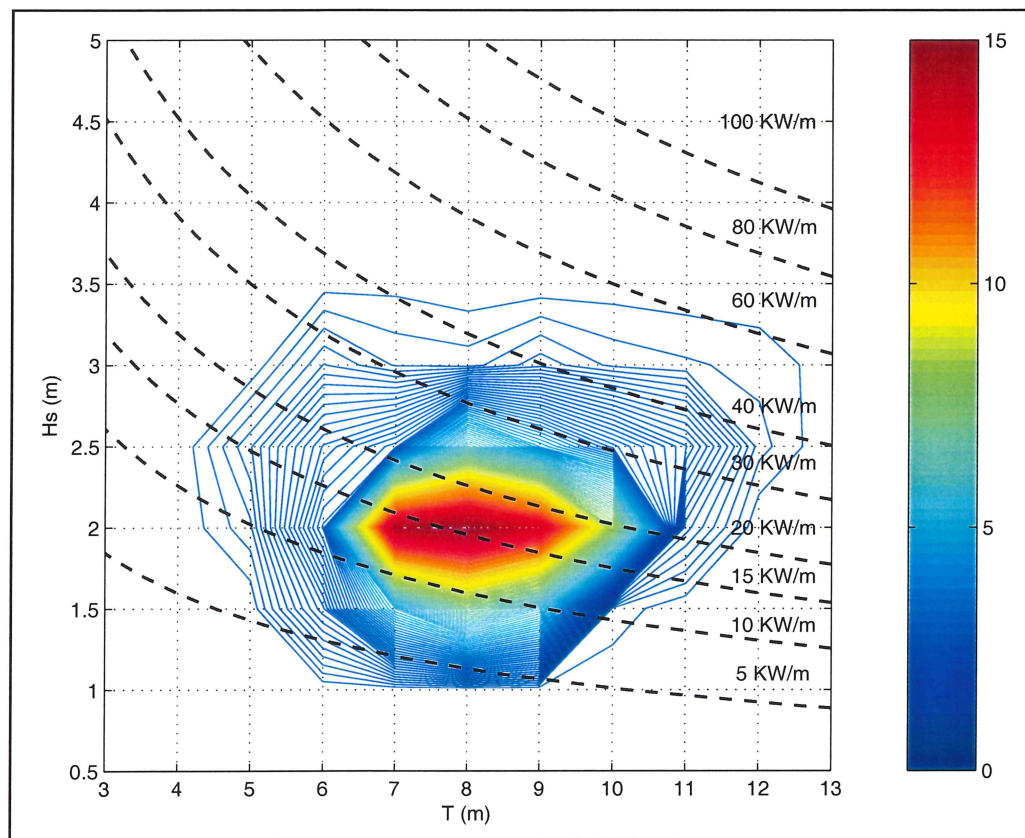


Figura 34.- Distribución de la Potencia Teórica Total por unidad de ancho (kW/m), del registro histórico (1948-2002), en Isla Socorro

Potencia Anual:

La potencia teórica anual, se muestra poco variable en términos generales, teniendo los máximos de probabilidad de potencia entre los 10 y 20 kW/m, en periodos de 6 a 9 s y alturas de 1.5 a 2.5 m. (*Fig.35, 1955, 1979, 1994*), sin embargo se observa un corrimiento

del período comparado con años anteriores (1955), donde los máximos se encuentran, entre 6 y 9 s y en años recientes (1979, 1994), las probabilidades máximas se encuentran entre los 7 y 10 s., por lo que el máximo de ocurrencia pasa de líneas de potencia de 10 a 20 kW/m (1955) a 15 y 30 kW/m (1972, 1994). En evento niño (*Fig. 35, 1998*) la probabilidad de ocurrencia disminuye, mas no en si la potencia asociada al máximo de ocurrencia, la cual aumenta, encontrándose los máximos de probabilidad de potencia entre 15 y 30 kW/m, en periodos de 8 a 10 s y alturas de ola de 2 a 2.5m.

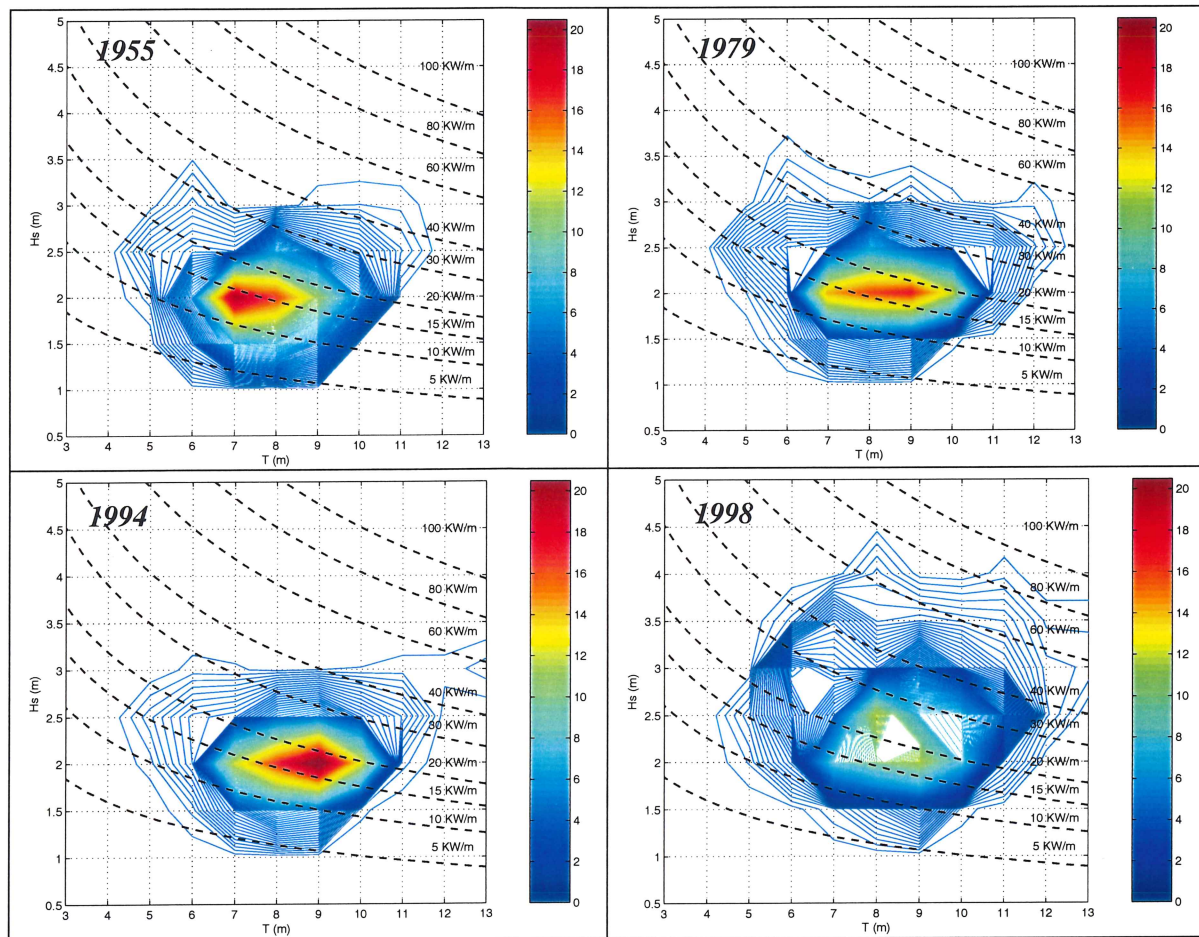


Figura 35.- Distribución de la Potencia Teórica Total anual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Socorro

Potencia Estacional:

La variabilidad estacional de la potencia teórica total, para Isla Socorro, se ejemplifica para dos años típicos (1955 y 1994) y un año atípico (1998) (*Fig.36*).

Invierno:

Los máximos de ocurrencia en invierno se encuentran entre los 10 y 15 kW/m (*Fig. 36, 1955, 1994*), con probabilidades de hasta un 22 % para $H_s = 2$ m y $T_{m2} = 7$ s, sin embargo se pueden presentar otros máximos (1994), donde el máximo se encuentra entre los 15 y 30 kW/m en $H_s = 2$ m y $T_{m2} = 8$ y 9 s. La variabilidad en evento niño (*Fig. 36, 1998*), es muy notoria, donde se observa un máximo de ocurrencia, entre los 20 y 30 kW/m para una altura significativa de 2 m y un período medio de 6 s.

Primavera:

En primavera el oleaje disminuye su aleatoriedad y la mayor parte del oleaje se encuentra entre las líneas de potencia de 15 a 20 kW/m entre $H_s = 2$ m y $T_{m2} = 8$ y 9s, con porcentajes de ocurrencia de hasta un 25 % (*Fig.36, 1955, 1994*). Para la primavera de 1998, la aleatoriedad se ve aumentada y se encuentran 3 máximos de ocurrencia predominantes, el primero se encuentra entre 15 y 20 kW/m, el segundo entre 20 y 30 kW/m y el último en la línea de potencia de 30 kW/m.

Verano:

En verano las potencias predominantes se encuentran entre los 10 y 20 kW/m en $H_s = 2$ m y $T_{m2} = 8$ a 9 s, con probabilidades de hasta un 25% (*Fig. 36, 1955, 1994*). Para el verano de 1998, el porcentaje de ocurrencia disminuye y su máximo se encuentra entre las líneas de potencia la potencia de 15 y 20 kW/m, para periodos de 9 s.

Otoño:

Para el otoño, el máximo de ocurrencia puede ser claramente puntual (*Fig. 36, 1955*), con sus máximos de ocurrencia entre las potencias de 10 y 20 kW/m en $T_{m2} = 7$ s y $H_s = 2$ m o dispersa (*Fig.36, 1994*), con varios máximos de ocurrencia, entre las líneas de potencia de 10 a 15 kW/m y de 15 a 20 KW/m para $H_s = 2$ m y $T_{m2} = 7$ a 10 s. En el otoño de 1998 la potencia predominante se encuentra entre los 15 y 30 kW para un $H_s = 2$ y 2.5 m. y un $T_{m2} = 8$ s.

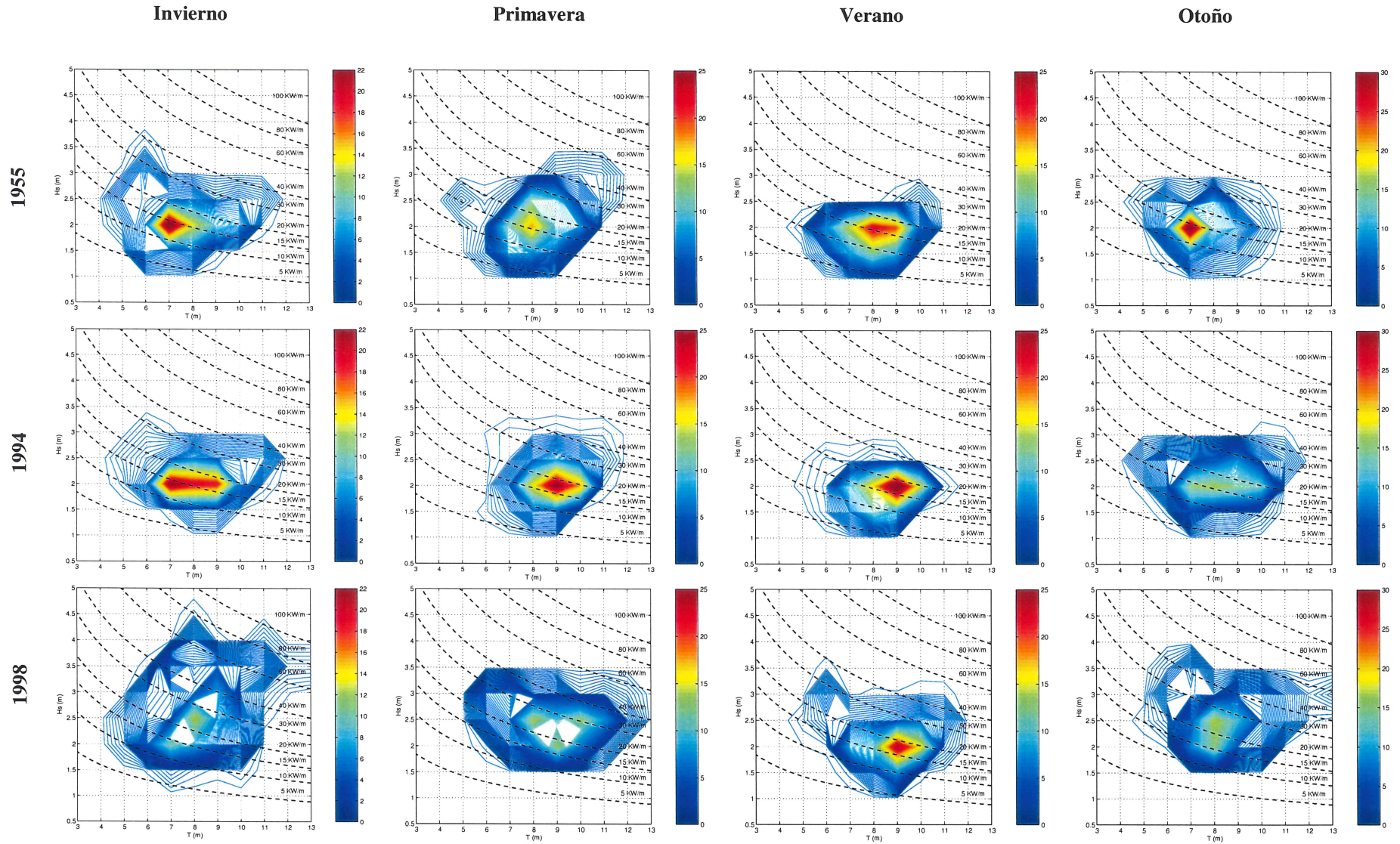


Figura 36. Distribución de la Potencia Teórica Total estacional, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Socorro

Potencia Mensual:

La distribución de la potencia mensual en Isla Socorro, muestra varios cambios con respecto a su período, no sucede así con la altura significativa que mantiene sus máximos de ocurrencia entre 1.5 m y 2 m. (**Fig. 37**), Enero muestra dos puntos predominantes, el primero a los 2 m de altura y 7 s de período con potencias de entre 10 y 15 kW/m con una ocurrencia cercana al 30 %, el segundo entre 8 y 9 segundos de período, a la misma altura, con potencias de entre 15 y 20 kW/m con un porcentaje de ocurrencia menor al 20%. Febrero tiene una distribución máxima entre 8 y 9 s con máximos de ocurrencia cercanos al 30 %, ubicado entre las líneas de potencia de 15 y 20 kW/m. La distribución máxima de marzo se encuentra entre los 7 y 10 s de Tm_2 , donde su máxima probabilidad se ve disminuido, siendo ligeramente mayor al 15% de ocurrencia, para potencias de 15 kW/m hasta 30 kW/m. Abril, presenta un máximo de probabilidad, cercano al 20 % entre los periodos de 9 -10 s y por lo tanto su máximo de ocurrencia se encuentra entre los 15 y 30 kW/m.

Mayo, Junio, Julio, Septiembre y Octubre, presentan una distribución muy similar donde la mayor parte del oleaje se encuentra en potencias de entre los 15 y 20 kW/m en periodos predominantes de 8 y 9 s y probabilidades de ocurrencias cercanas al 30 %. Agosto y Noviembre, presentan dos máximos de distribución, los dos máximos, se encuentran en alturas predominantes de 2 m, el primero con un período predominante de 8 s y una potencia de 15 kW/m, el segundo en un período de 10 s y una potencia de 20 kW/m. ambos máximos con probabilidades de ocurrencia cercanas al 20%. Diciembre muestra una disminución del período predominante con un periodo de entre 7 y 8 s, a una potencia de 15 KW/m y una ocurrencia ligeramente mayor al 15 %, también se observa en este mes, una porción considerable del oleaje entre los 10 y 13 s de período y 2.5 a 3 m de altura.

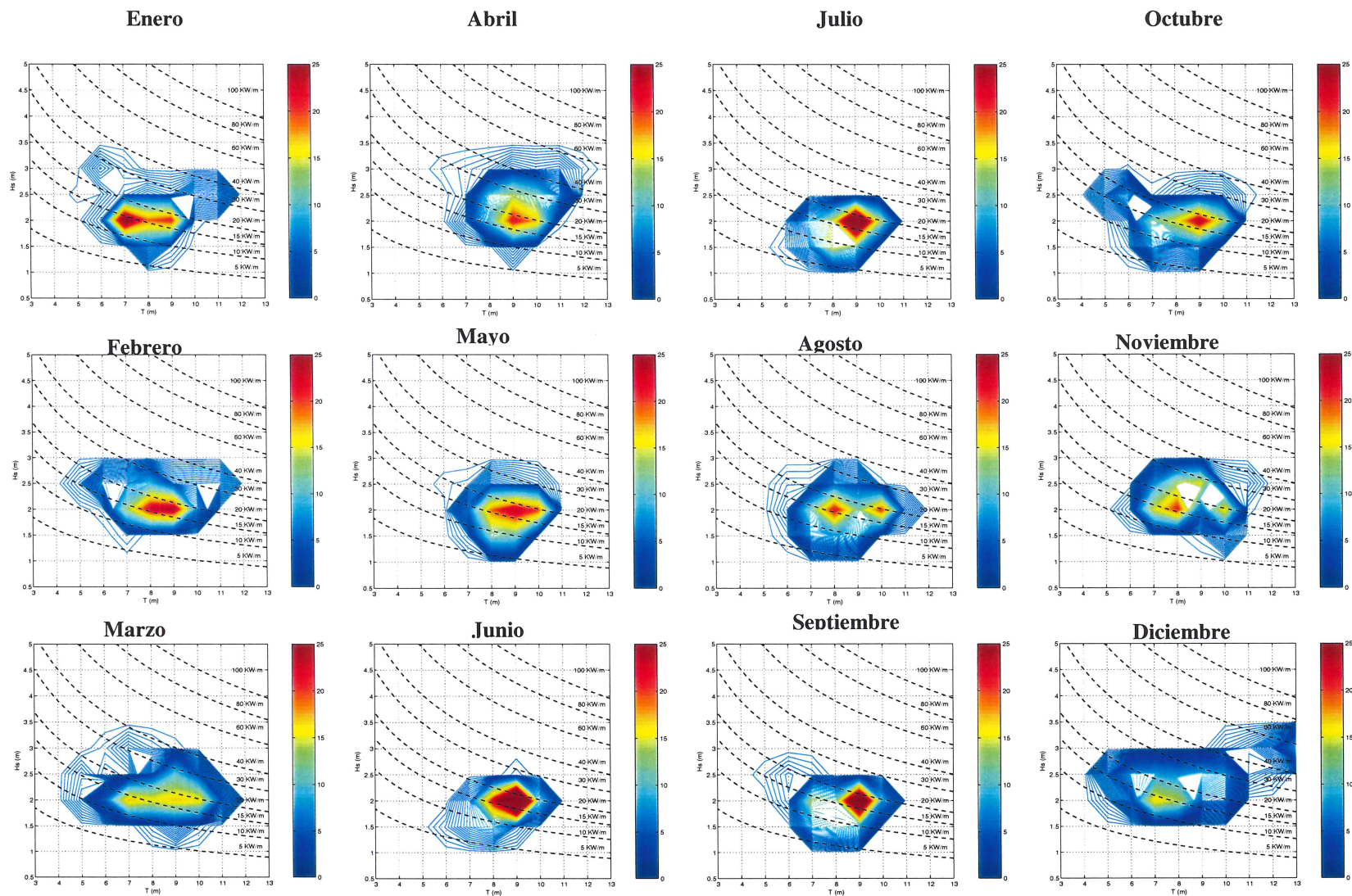


Figura 37.- Distribución de la Potencia Teórica Total mensual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Socorro, para 1994

b) Densidad de Potencia Teórica, en base a los primeros 10 estados de mar :

La tabla XIII, muestra la probabilidad de ocurrencia, de la potencia y densidad de la potencia para los 10 estados de mar mas representativos en Isla Socorro, los cuales comprenden para el registro histórico, el 82.3 % del oleaje incidente. La suma de las potencias por unidad de ancho, para los primeros 10 estados de mar fluctúa entre los 90.51 y 176 kW/m.

Tabla XIII. Probabilidad de ocurrencia y potencia por unidad de ancho, para los 10 estados de mar más representativos, del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en Isla Socorro.

#	Hs	Ts	Probabilidad (%)	Potencia (kW/m)	
				Mínimo	Máximo
1	1.5-2.0	7-8	15.35	7.72-15.69	
2	1.5-2.0	6-7	14.63	6.62-13.73	
3	1.5-2.0	8-9	13.64	8.83-17.66	
4	1.5-2.0	9-10	8.12	9.93-19.62	
5	1.0-1.5	7-8	7.14	3.43-8.83	
6	2.0-2.5	7-8	6.16	13.73-24.53	
7	1.0-1.5	8-9	5.37	3.92-9.93	
8	1.0-1.5	6-7	4.72	2.94-7.72	
9	2.0-2.5	8-9	4.26	15.69-27.59	
10	2.0-2.5	9-10	2.96	17.66-30.66	
TOTAL			82.34	90.51-176.00	

Potencia anual y estacional:

El porcentaje promedio de ocurrencia anual de los primeros 10 estados de mar, en Isla Socorro, es mayor al 80 % del tiempo similar al comportamiento estacional. La suma de los primeros 10 estados de mar tiene una potencia por unidad de ancho menor a los 80 kW/m hasta mas de los 220 kW/m. El comportamiento estacional muestra que la menor probabilidad de ocurrencia se da en Invierno con un 84% sin embargo, este no difiere mucho de las demás estaciones, primavera muestra el máximo de potencia llegando a máximos mayores a los 2450 kW/m. Verano tiene la mayor probabilidad de ocurrencia para los primeros estados de mar, sin embargo también presenta el mínimo de potencia, donde su máximo solo llega hasta un poco mas de 160 kW/m. Los mínimos de la potencia

anual y estacional, muestran un comportamiento mas homogéneo, donde a lo largo del año la suma de potencias se encuentra entre los 70 y 90 kW/m (*Fig.38*).

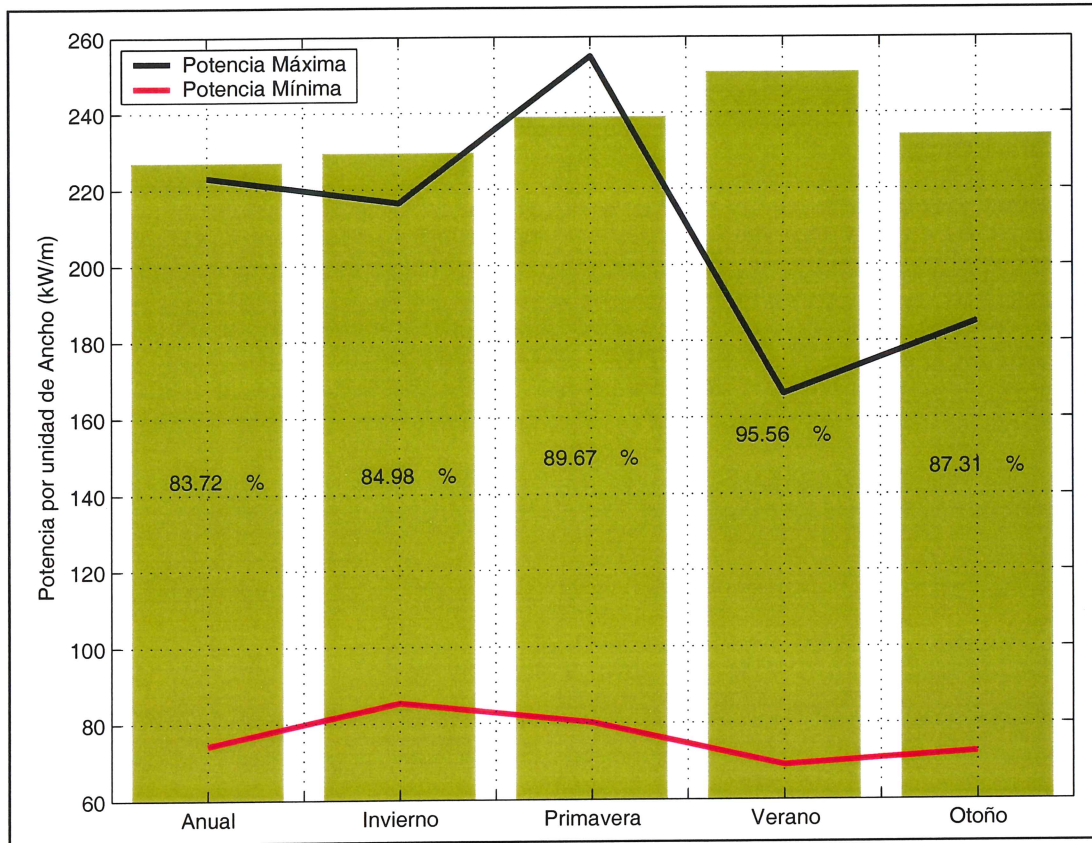


Figura 38.- Porcentaje de ocurrencia promedio anual y estacional de los primeros 10 estados de mar y la suma de potencias por unidad de ancho, mínima y máxima de los mismos, en Isla Socorro.

II.3.4 Interacción Ola-Dispositivo Tipo Rebase de Ola

En la tabla XIV y XV se muestran los resultados del dispositivo de rebase de ola, obteniéndose su probabilidad de rebase de ola (Pov), flujo (q), probabilidad de volumen de agua si sucede el rebase (Pv) y el volumen que entra por ola (Vw) para dos alturas de rampa 0.3 m y 0.9 m., se observa que la probabilidad de que un rebase ocurra, depende exclusivamente de la altura de ola, el volumen que entra por ola. al contrario depende mas del período que de la altura de ola.

Para el caso de una rampa de 0.3 m (*Tabla XIV*), la probabilidad promedio de que un rebase ocurra es del 97.4 %, con un flujo promedio de 0.701 m³/s por ola, la probabilidad del volumen de agua, es significativamente menor que la probabilidad de rebase con un promedio de 63.15 %. Existe un volumen de agua promedio por ola, para los 10 estados de mar de 5.10 m³ disponible para una turbina hidráulica.

Tabla XIV. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $Rc = 0.3$ m. en Isla Socorro

#	Hs	Tm ₂	Pov (%)	q (m ³ /s)	Pv (%)	V _w (m ³)
1	1.0	7	94.038	0.2903	63.1669	1.8123
2	1.5	6	97.3049	0.3851	63.1654	1.9912
3	1.5	7	97.3049	0.4913	63.1593	2.9629
4	1.5	8	97.3049	0.6004	63.1541	4.1375
5	1.5	9	97.3049	0.7116	63.1496	5.5159
6	1.5	10	97.3049	0.8243	63.1456	7.0987
7	2.0	7	98.475	0.7038	63.1538	4.1936
8	2.0	8	98.475	0.8524	63.1488	5.8037
9	2.0	9	98.475	1.0033	63.1444	7.6833
10	2.0	10	98.475	1.1557	63.1406	9.8331
Promedio			97.4463	0.7018	63.1528	5.1032

Para una rampa de una altura de 0.6 m (*Tabla XV*), la probabilidad promedio de que ocurra un rebase es del 90.25%, con un flujo promedio de 0.919 m³/s por ola, la probabilidad

del volumen de agua es de un 63.1 %, con un volumen de agua promedio por ola para los 10 estados de mar de 7.21 m^3 , disponibles.

Tabla XV. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $Rc = 0.6 \text{ m}$. en Isla Socorro

#	Hs	Tm ₂	Pov (%)	q (m ³ /s)	Pv (%)	V _w (m ³)
1	1.0	7	78.2012	0.3011	63.1756	2.2608
2	1.5	6	89.6477	0.412	63.1754	2.313
3	1.5	7	89.6477	0.5747	63.1697	3.7637
4	1.5	8	89.6477	0.751	63.165	5.6201
5	1.5	9	89.6477	0.9378	63.161	7.8936
6	1.5	10	89.6477	1.1326	63.1576	10.5917
7	2.0	7	94.038	0.8847	63.1652	5.5223
8	2.0	8	94.038	1.1355	63.1607	8.0995
9	2.0	9	94.038	1.3982	63.1569	11.2182
10	2.0	10	94.038	1.67	63.1536	14.8854
Promedio			90.2592	0.9198	63.1641	7.2168

Se probaron 5 alturas de rampa (0.3, 0.6, 0.9 1.2 y 1.5 m), para conocer la altura óptima y observar su respuesta a los estados de mar dados (*Fig. 39*). Los valores graficados son los promedios de los 10 estados de mar para 5 alturas de rampa. La probabilidad de rebase (*Fig.39-a*) disminuye junto con el aumento de la altura de la rampa (Rc), de un 97% hasta un 59% de su probabilidad, en cambio la probabilidad de volumen de agua (*Fig.39-b*), no experimenta cambios significativos con respecto a la altura de la rampa, manteniéndose casi constante en un 63 % de probabilidad. El flujo experimenta un aumento al aumentar la altura de ola (*Fig. 39-c*), hasta los 0.6 m de altura, donde alcanza su máximo ($0.91 \text{ m}^3/\text{s}$), y este comienza a disminuir, siendo mas evidente después de los 0.9 m, llegando hasta los $0.67 \text{ m}^3/\text{s}$ en una altura de 1.5 m. El volumen de agua por ola también tiende una tendencia a un aumento logarítmico (*Fig. 39-d*), de manera que, después de los 0.9 m donde el volumen de agua por ola es de 8.02 m^3 , el aumento se hace pequeño (sin embargo este decaerá de nuevo con alturas de rampa mas grandes, ya que existe un límite para un estado de mar dado, donde el rebase será mínimo o imposible).

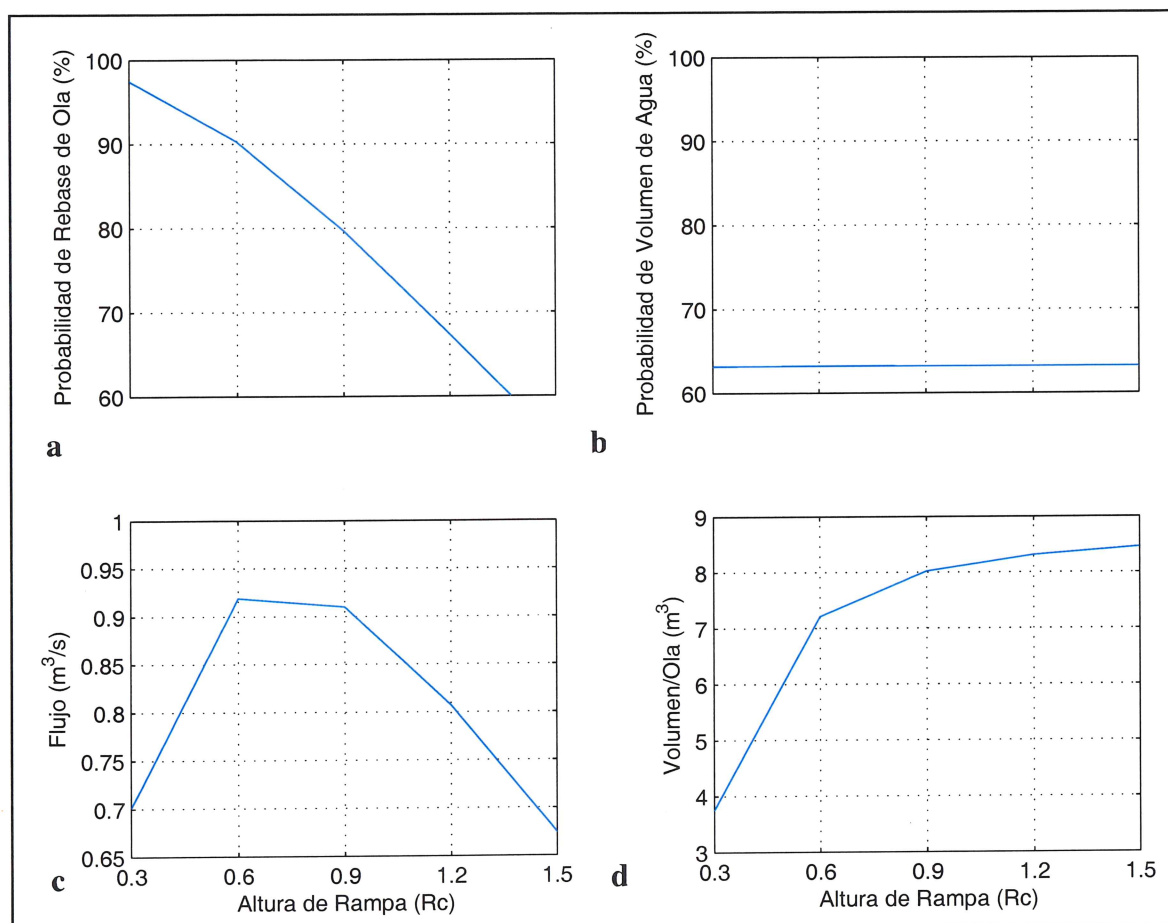


Figura 39. Interacción oleaje-dispositivo para 5 alturas de rampa en Isla Socorro
a) Probabilidad de Rebase de ola (P_{ov}), **b)** Probabilidad de Volumen de agua (P_v), **c)** flujo (q)
 y **d)** volumen por ola promedio (V_w)

II.3.5 Interacción Ola Dispositivo Oscilante

La tabla XVI y XVII muestra dos de las combinaciones de diámetro hechas, donde a partir de ellas y los estado de mar se obtiene la altura dentro del dispositivo (η_1), la velocidad en la entrada (v_1), la velocidad de la salida (v_2), el flujo (Q), la diferencia de presión ($p_2 - p_0$), la potencia neumática, disponible para la turbina (P_n), y la eficiencia (η_{ef})

Tabla XVI. Potencia Neumática, disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más, representativos para un diámetro de entrada $D_1 = 3.0 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 0.3 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 1.2 \text{ m}$, en Isla Socorro

#	Hs	Tm ₂	η_1 (m)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	Q (m ³ /s)	$p_2 - p_0$ (kW/m ²)	P_n (kW)	η_{ef} (%)
1	1.0	7	0.496	0.1586	15.8631	1.1213	297.9	0.3341	3.2427
2	1.5	6	0.746	0.2041	20.4066	1.4425	493.1	0.7112	3.5794
3	1.5	7	0.745	0.2379	23.7946	1.6819	670.4	1.1275	4.864
4	1.5	8	0.744	0.2718	27.1767	1.921	874.5	1.6799	6.3409
5	1.5	9	0.742	0.3055	30.5519	2.1596	1105.2	2.3867	8.008
6	1.5	10	0.740	0.3392	33.9194	2.3976	1362.2	3.2661	9.8628
7	2.0	7	0.993	0.3173	31.7262	2.2426	1191.8	2.6726	6.4853
8	2.0	8	0.991	0.3624	36.2356	2.5613	1554.6	3.9819	8.4546
9	2.0	9	0.989	0.4074	40.7359	2.8795	1964.7	5.6574	10.6774
10	2.0	10	0.987	0.4523	45.2259	3.1968	2421.7	7.7419	13.1504
Promedio						2.1604	1193.6	2.9559	7.4665

En la tabla XVI, el porcentaje de eficiencia promedio para un dispositivo con un diámetro de entrada de 3.0 m y de salida de 0.3 m, tiene una potencia promedio disponible para la turbina de 2.95 kW por ola, con una eficiencia promedio de 7.46 %. En la tabla XVII se muestra lo mismo pero para un dispositivo de un diámetro de entrada de 15.0 m y de salida de 1.2 m, con una potencia neumática promedio disponible de 11.61 kW por ola y con una eficiencia del 5.86 %.

Tabla XVII. Potencia Neumática disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más representativos, para un diámetro de entrada $D_1 = 15 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 1.2 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 3.0 \text{ m}$, en Isla Socorro

#	Hs	Tm ₂	η_1 (m)	v ₁ (m/s)	v ₂ (m/s)	Q (m ³ /s)	p ₂ - p ₀ (kW/m ²)	Pn (kW)	η_{ef} (%)
1	1.0	7	0.498	0.0635	9.9267	11.226	116.6708	1.3098	2.5427
2	1.5	6	0.748	0.0817	12.7657	14.437	192.9484	2.7857	2.8041
3	1.5	7	0.748	0.0953	14.8901	16.840	262.5094	4.4207	3.8141
4	1.5	8	0.747	0.1089	17.0129	19.241	342.6963	6.5939	4.9779
5	1.5	9	0.746	0.1225	19.1341	21.640	433.477	9.3805	6.2948
6	1.5	10	0.746	0.136	21.2533	24.036	534.8146	12.855	7.7639
7	2.0	7	0.997	0.1271	19.8534	22.453	466.6833	10.478	5.0855
8	2.0	8	0.996	0.1452	22.6839	25.654	609.238	15.629	6.6372
9	2.0	9	0.995	0.1633	25.5121	28.853	770.6257	22.235	8.3931
10	2.0	10	0.995	0.1814	28.3377	32.049	950.7815	30.471	10.3519
Promedio						21.643	468.0445	11.616	5.8665

La tabla XVIII muestra 5 combinaciones de diámetro y longitud sumergida. La potencia promedio, disponible para la turbina va de un 0.07 kW hasta 11.61 kW, con eficiencias que van de 1.06% hasta un 7.46%. Existe una tendencia al aumento de la potencia neumática promedio con el aumento del área de entrada, sin embargo como se ve en la figura 42, esto también depende de la combinación de los diámetros de entrada y salida y la profundidad sumergida

Tabla XVIII. Potencia disponible para una turbina, y la eficiencia del dispositivo, a diferentes diámetros de entrada, salida y longitud sumergida en Isla Socorro.

#	D ₁ (m)	D ₂ (m)	L (m)	Pn (kW)	η_{ef}
1	0.5	0.1	0.5	0.070	1.061
2	1.0	0.2	0.6	0.162	1.232
3	3.0	0.3	1.2	2.955	7.466
4	6.0	0.6	2.0	2.564	3.237
5	15	1.2	3.0	11.616	5.866

A partir de un aumento del área de acción del dispositivo, mayor será la cantidad de energía del oleaje que puede captar y la potencia disponible para la turbina. Con respecto a la eficiencia del dispositivo este obedece más a las dimensiones del mismo y los diámetros de entrada y salida del dispositivo (*Fig. 40*).

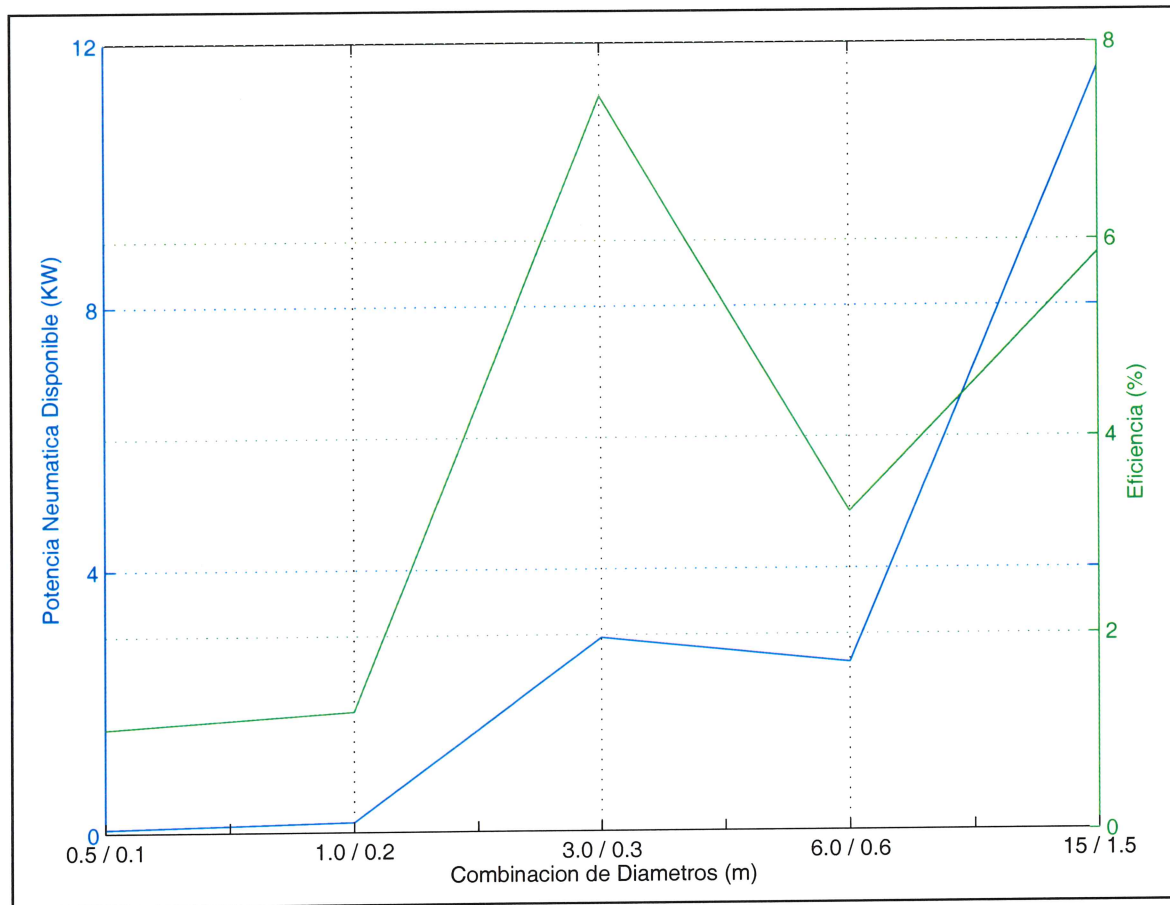


Figura 40. Potencia disponible para la turbina contra el porcentaje de eficiencia para 5 combinaciones de diámetro de entrada y salida del dispositivo oscilante en Isla Socorro

II.4 CASO II: ISLA MADRE MARÍA

II.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

II.4.1.1 Localización

La Isla Madre María es la mayor, del archipiélago de las Islas Marías, con una extensión de 227 km², localizada en el océano Pacífico a 120 kilómetros al oeste del puerto de San Blas, Nayarit, entre los 21° 36' 57" latitud norte y los 106° 34' 42" longitud oeste (INEGI, 1993) (*Fig. 41*).

II.4.1.2 Estadística Poblacional

Población:

La colonia penal de la Isla Madre María se compone de 10 campamentos, donde vive un total de 1340 personas (INEGI, 2000).

Actividad Productiva:

Se realizan varias actividades en la isla, donde las mas importantes son la agricultura con cultivos de riego y temporal, una salina con cultivo de camarón, artesanías, fabricación de ladrillos y trabajos en madera (INEGI, 1993).

Infraestructura:

Los campamentos están ubicados en la periferia de ésta y uno en el centro de la isla. Todos los campamentos se comunican por medio de una carretera de terracería que da la vuelta a toda la isla y tiene una extensión de 50 Km. Una planta de luz, una central telefónica para el control de llamadas, telégrafo, correo, televisión, radio, antenas de recepción de telecomunicaciones y fax (INEGI, 1994).

II.4.1.3 Consumo de Energía

El suministro de energía para toda la isla es alto, en comparación con las otras islas, debido a la cantidad de gente que ahí vive, para tener una buena aproximación del consumo de energía en la isla, es necesario un estudio mas detallado, debido a la cantidad de gente que ahí vive y las condiciones especiales en las que se encuentran.

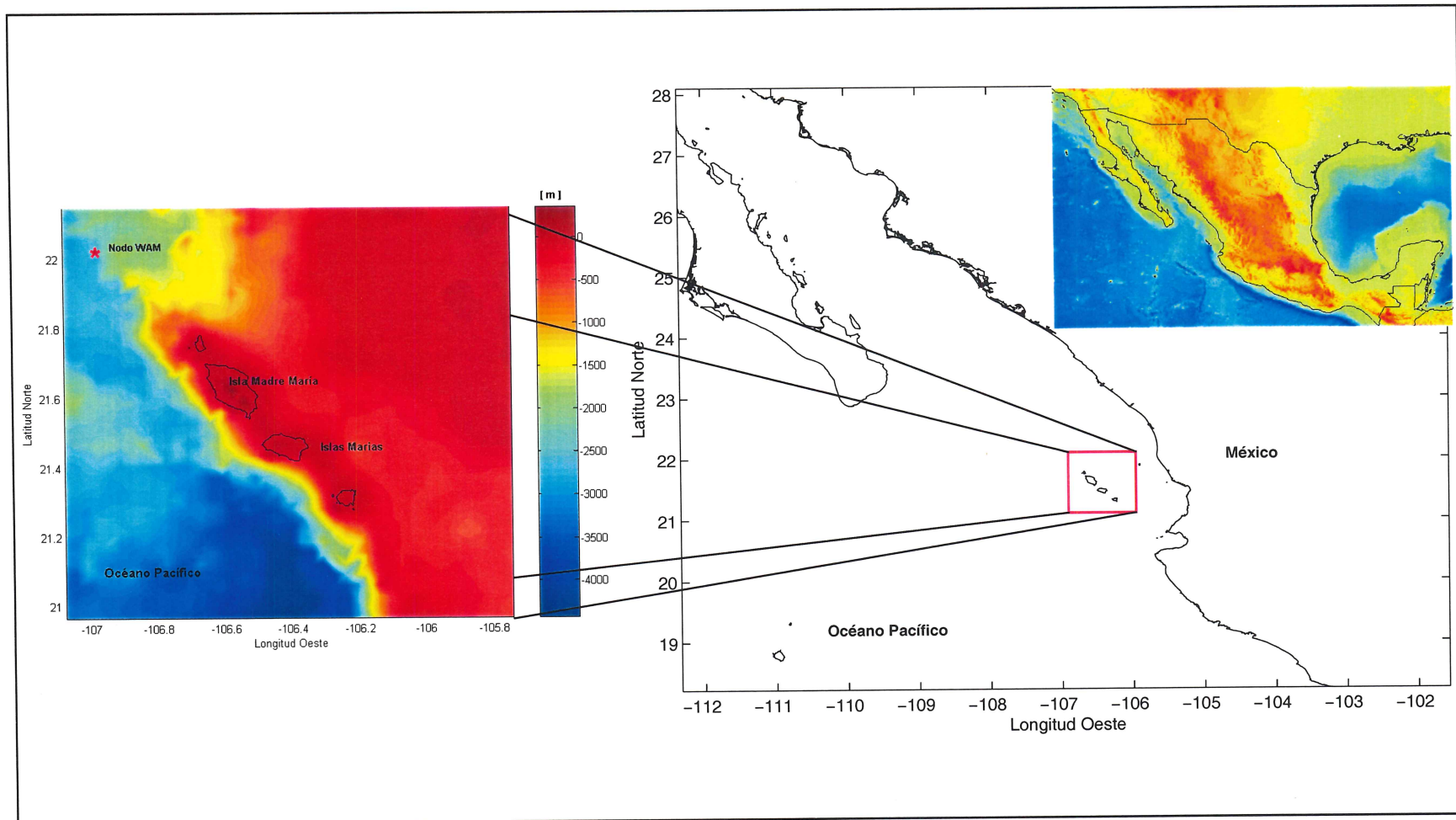


Figura 41.- Localización de Isla Madre Maria, México y el nodo generado por el modelo WAM (*)

II.4.2 CARACTERIZACION DEL OLEAJE LOCAL

En base al registro histórico de 1948-2002, el oleaje en Isla Madre Maria, tiene una dirección predominantemente SW entre los 210° y 220° . La altura significativa tiene un promedio de 1.35 m y las alturas mas recurrentes se encuentran entre 1.0 m y 1.5 m, el máximo del registro es ligeramente mayor a los 4 m. El promedio del período medio del momento dos es de 6.77 s, con períodos predominantes de 6 a 7 s., El máximo es de mas de 12 segundos. La frecuencia asociada al pico espectral es de 0.074 Hz con una densidad de energía en el pico espectral de $2.39 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$. Estas características se resumen en la tabla XIX

Tabla XIX.- Resumen de las Características del Oleaje del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en Isla Madre Maria.

	Hs (m)	Tm ₂ (s)
Promedio	1.32	6.77
Desviación Estándar	0.38	1.39
Mínimo	0.20	2.77
Máximo	4.11	12.36
Valor Predominante	1.0-1.5	6-7
Dirección Predominante (θ)	210° - 220° SW	
Frecuencia Asociada al Pico Espectral (Hz)	0.074	
Pico Espectral ($\text{m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$)	2.39	

II.4.2.1 Variabilidad y Comportamiento Anual

El espectro direccional anual, en Isla Madre María (*Fig. 42*), tiene una clara dirección predominante SW a los 210° en todos los años donde la diferencia de los espectros anuales es pequeña, la aportación de oleaje del oeste y el noroeste es mínima. La frecuencia asociada al pico espectral, típicamente es de 0.074 Hz. excepto en años anómalos (1998) donde la frecuencia disminuye a 0.0673 Hz, y densidades máximas de energía que van de 1.8 a $3.2 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$.

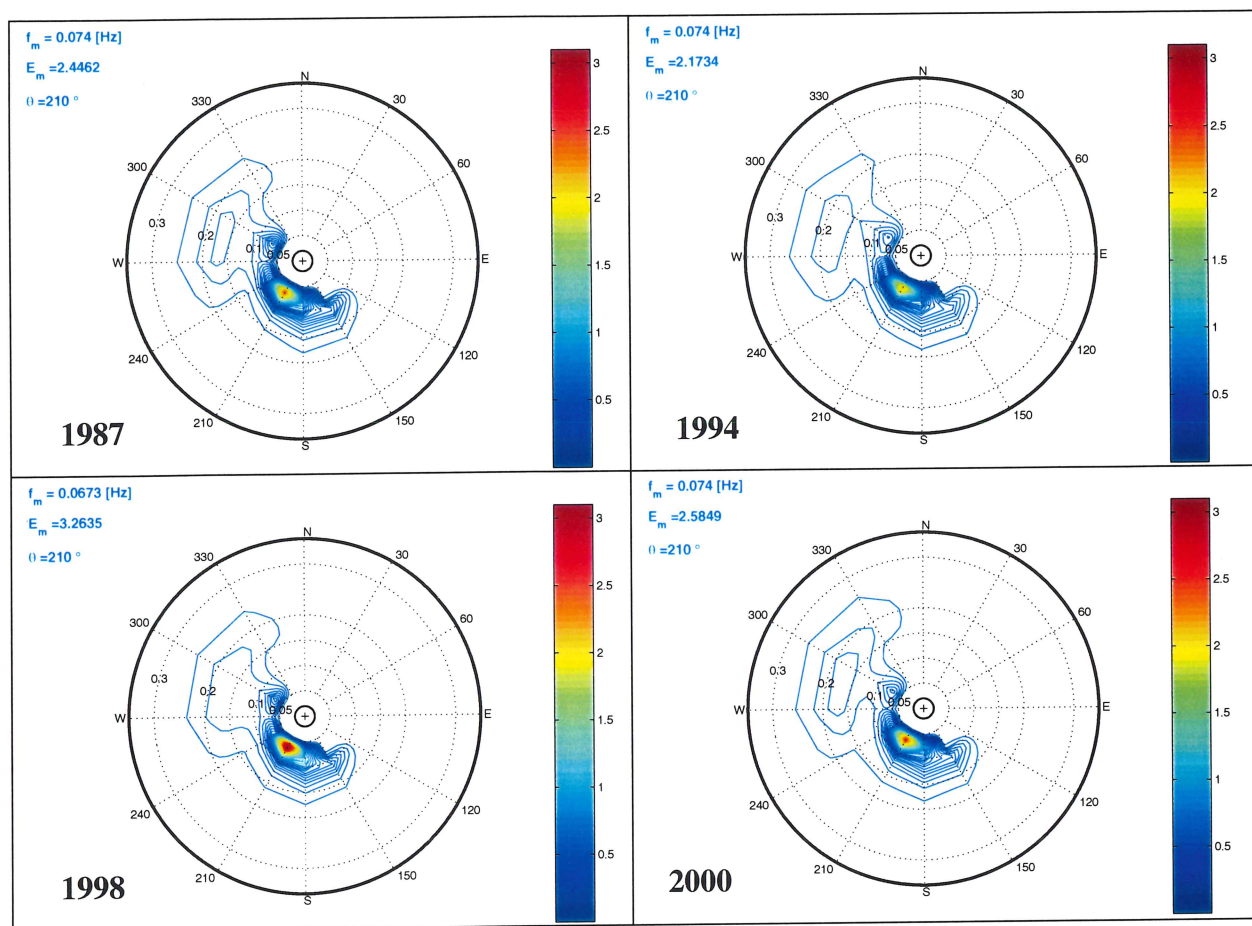


Figura 42.- Comportamiento Anual del Espectro Direccional del Oleaje en Isla Madre María

Las distribuciones conjuntas de H_s y T_{m2} anuales en Isla Madre Maria, muestran que la mayor parte del oleaje se encuentra distribuido entre alturas de 1 y 1.5 m y períodos de 5 a 8 s (**Fig. 43a y 44a**), en años anómalos (1987, 1998), la distribución es mas variable y la probabilidad de ocurrencia mas alta se encuentran entre 1.5 y 2.0 m, y períodos de 6 a 8 s. La mayor probabilidad de ocurrencia direccional de la altura de ola, proviene del suroeste, entre los 210° y 220° con alturas de 1.5 m, alcanzando hasta un 24% de incidencia (**Fig. 43b y 44b**), en eventos niño (1987, 1998), la variabilidad, aumenta, teniendo probabilidades no mayores al 10 %, junto con la altura predominante, siendo en algunos casos (1998), de hasta 2.0 m. La probabilidad de ocurrencia, máxima del período, proviene del suroeste entre, los 210° y 230°, donde presenta diferencias anuales, teniendo períodos predominantes de 6 a 9 s (**Fig. 43b y 44c**).

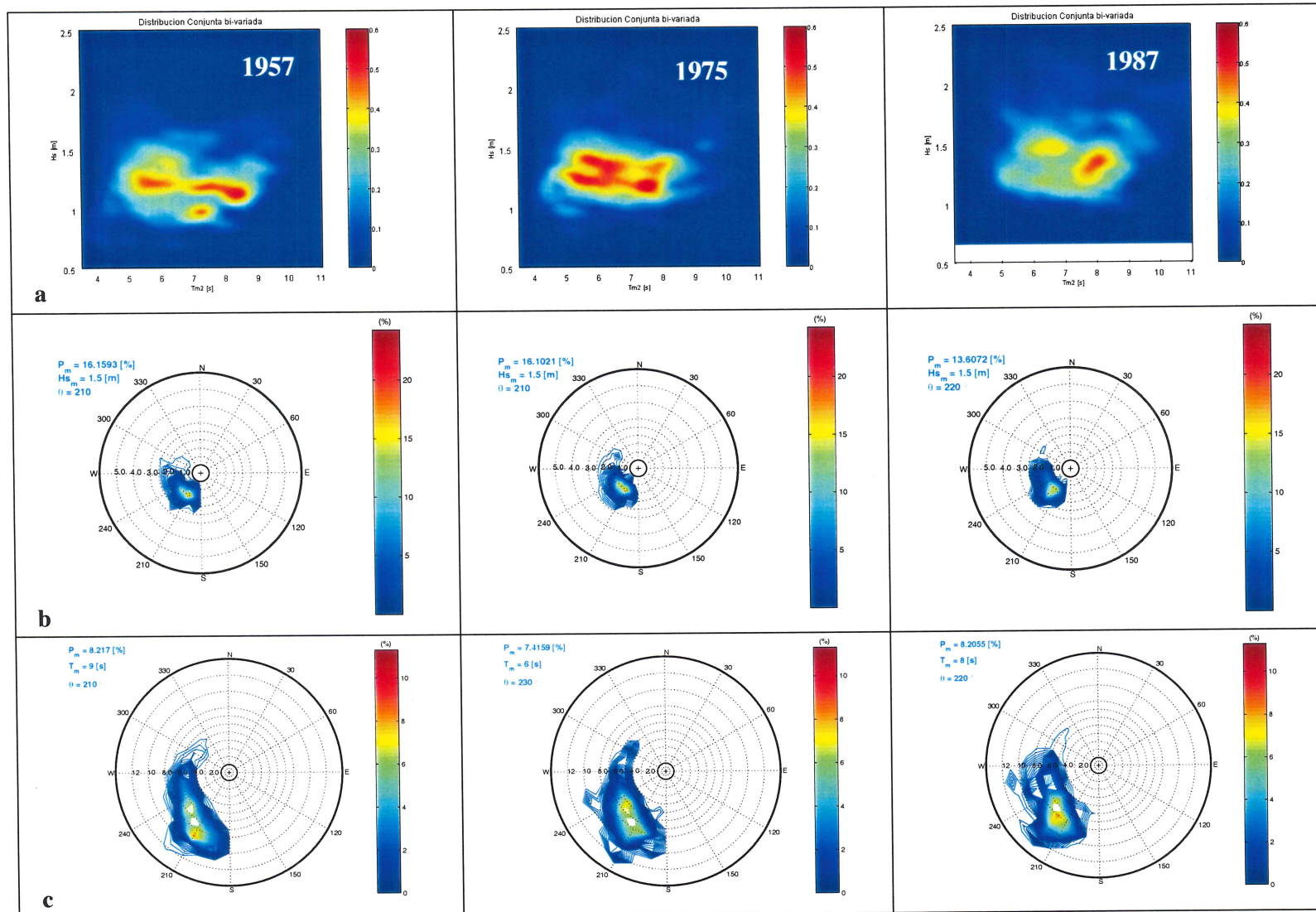


Figura 43.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1957, 1975 y 1987 en Isla Madre María: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

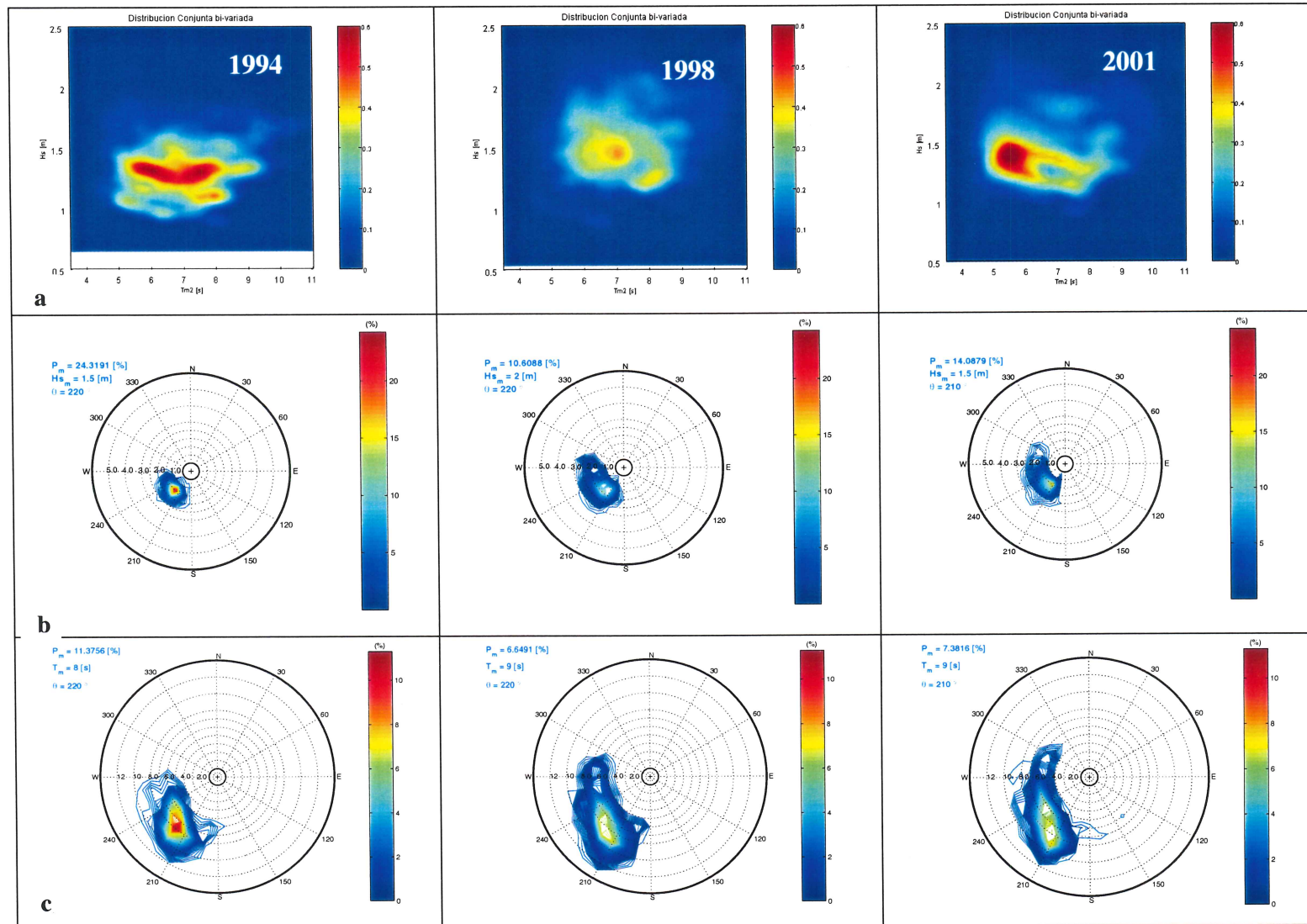


Figura 44.- Distribuciones Bi-variadas para los años 1994, 1998 y 2001 en Isla Madre María: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2}).

II.4.2.2 Variabilidad y Comportamiento Estacional

La energía espectral en Isla Madre María (**Fig.45**), mantiene su predominancia suroeste todo el año a los 210°, incluso en invierno, donde si bien, existe una aportación de energía del noroeste, esta disminuye drásticamente en primavera y es prácticamente inexistente en verano y vuelve a reaparecer en otoño, la frecuencia asociada al pico espectral se mantiene en 0.074 Hz. y la densidad de energía máxima es mayor en primavera y en verano, con 2.3 m²/Hz/grado, siendo en invierno, donde se encuentra la mínima densidad de energía espectral con 1.93 m²/Hz/grado.

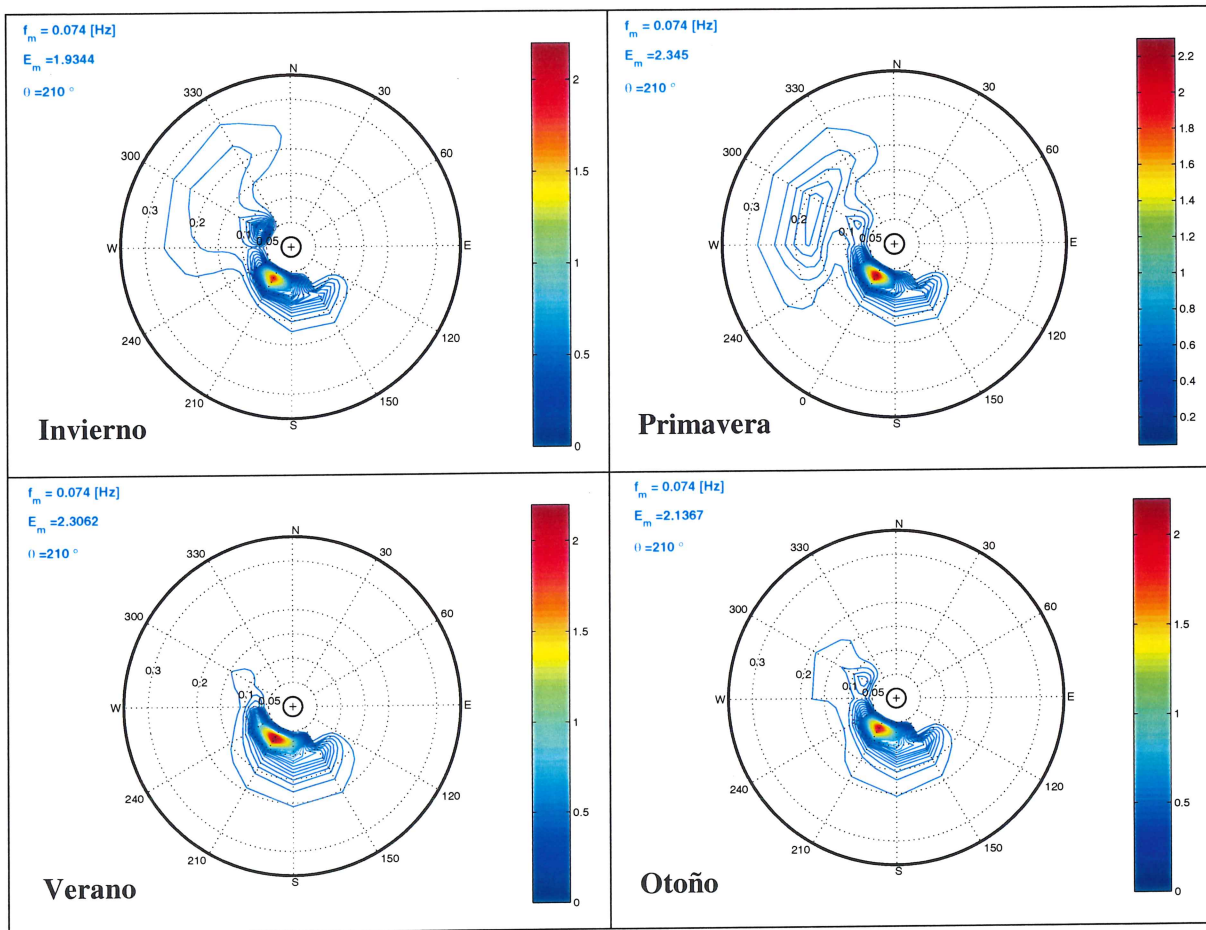


Figura 45.- Variabilidad Estacional del Espectro Direccional del Oleaje para 1990 en Isla Madre Maria

Invierno:

La distribución conjunta de H_s y T_{m2} , en invierno para la Isla Madre María, muestra que la mayor parte del oleaje en años típicos (1975, 1994, 2001) y anómalos (1998) se encuentra entre 1 y 1.5 m de altura y periodos de entre 5 y 8 s (**Fig.46a**), el máximo de ocurrencia del oleaje en eventos niño es similar a los años típicos, sin embargo si hay una disminución en la probabilidad de incidencia conjunta de H_s y T_{m2} . La mayor probabilidad de ocurrencia direccional de la altura significativa en invierno proviene del suroeste entre los 220° y 240° donde la probabilidad de incidencia máximo, se encuentra en las alturas de 1.5 m con probabilidades de hasta 21.8% (**Fig.46b**), en años niño la distribución y la dirección y altura predominante son similares a años normales, con una disminución en su probabilidad de incidencia. La mayor probabilidad direccional del período se encuentra entre las direcciones de 220° a 250° y los períodos de entre 6 y 8 s con probabilidades de hasta 9% (**Fig.46c**).

Primavera:

La distribución bi-variada de H_s y T_{m2} , en primavera, muestra que la mayor parte del oleaje se encuentra entre las alturas significantes de 1 a 1.8 m y períodos de 5 a 7 s (**Fig.47a**), en 1998 se observa que la máxima probabilidad, de ocurrencia se encuentra entre alturas de ola de 1.5 a 2.0 m y períodos de 6 a 8 s. La mayor probabilidad de ocurrencia direccional de la altura significativa, se encuentra en direcciones que van de 220° a los 230° donde la probabilidad máxima de ocurrencia se encuentra en alturas de ola de 1.5 a 2.0 m con probabilidades de hasta un 20 % (**Fig.47b**), en la primavera de 1998, la probabilidad de ocurrencia máxima, se encuentra en alturas de ola de 2.0 m a una dirección de 230° . La probabilidad máxima direccional del período se encuentra entre los 220° a 230° de dirección y en períodos de 7 s (**Fig.47c**), la distribución direccional del período en la primavera de 1998, no es muy diferente a los demás años.

Verano:

El oleaje en el verano muestra que la mayor parte de el, se encuentra entre las alturas de ola de 1 a 1.6 m y en períodos de 6 a 9 s (**Fig.48a**), en el verano de 1998, la mayor parte del oleaje se encuentra entre las alturas de ola de 1.5 a 2.0 m y períodos de 6 a

9 s. La mayor incidencia direccional de la altura de ola se encuentra entre los 210° y 220° , con máximos de probabilidad mayores a un 30 %, correspondiente a alturas de ola de 1.5 m. (*Fig.48b*), en eventos niño (1998), esta probabilidad disminuye hasta un 20% correspondiente a una altura de ola de 2.0 m. La incidencia máxima del período se encuentra entre las direcciones de 200° a 220° , con probabilidades de hasta un 20% para períodos de 8 a 9 s (*Fig.48c*).

Otoño:

En el otoño, la mayor parte del oleaje se encuentra entre las alturas de ola de 1 a 1.5 m, y períodos de 6 a 8 s (*Fig.49a*), el otoño de 1998, no dista mucho de las distribuciones conjuntas de años típicos. La distribución direccional de la altura, muestra que la mayor parte de las alturas de ola se encuentran, entre los 220° y 230° , donde la probabilidad de ocurrencia, puede ser mayor a un 30% para alturas de 1.5 m, encontrándose la mínima probabilidad de ocurrencia en el otoño de 1998 (*Fig.49b*). La mayor ocurrencia de períodos se da entre las direcciones de 220° a 230° con incidencias de hasta un 15 %, para períodos de entre 6 a 8 s., sin encontrarse grandes diferencias para el otoño de 1998 (*Fig.49c*).

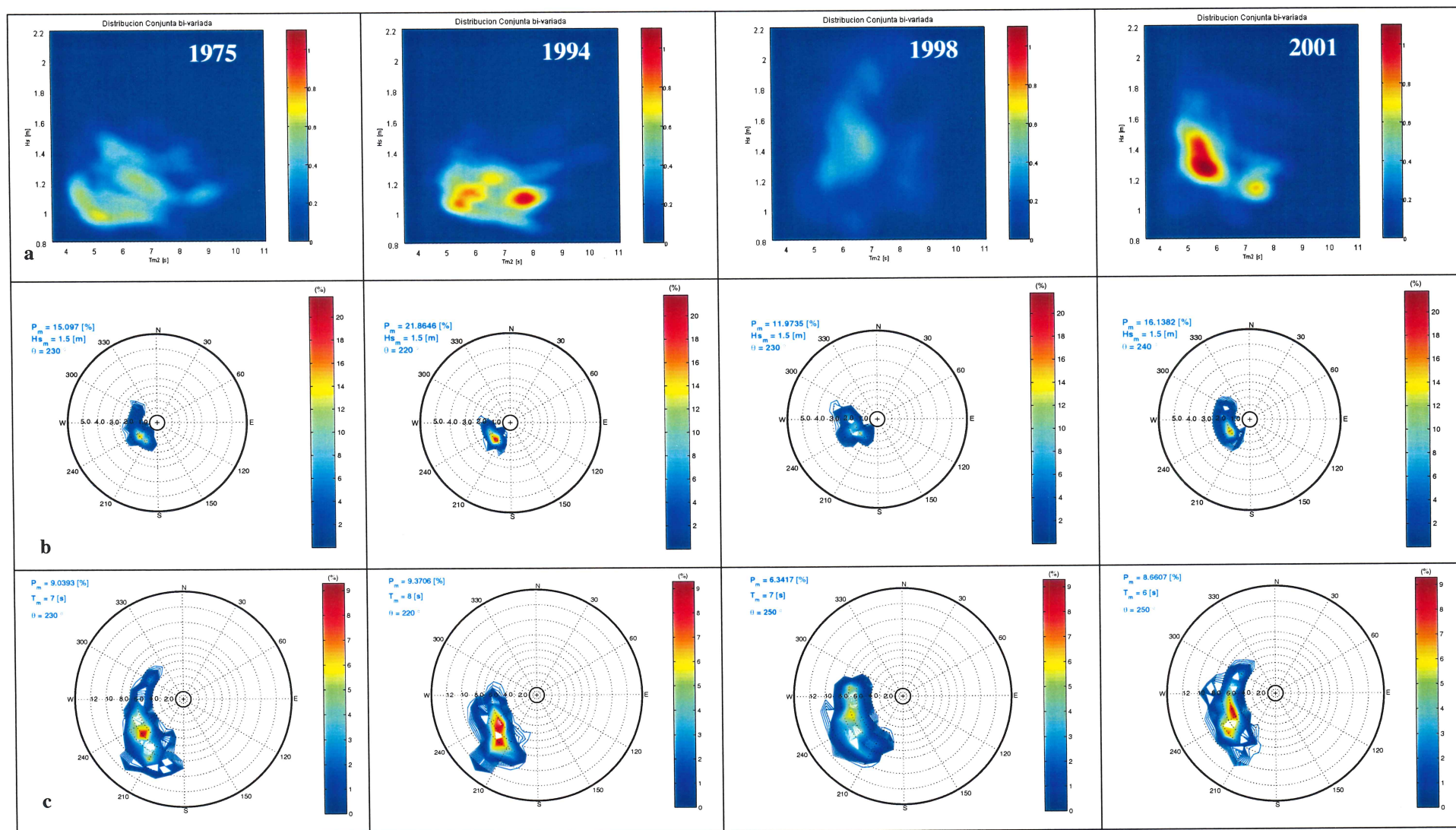


Figura 46.- Distribuciones Bi-variadas para el invierno de 1975, 1994, 1998 y 2001, en Isla Madre María: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

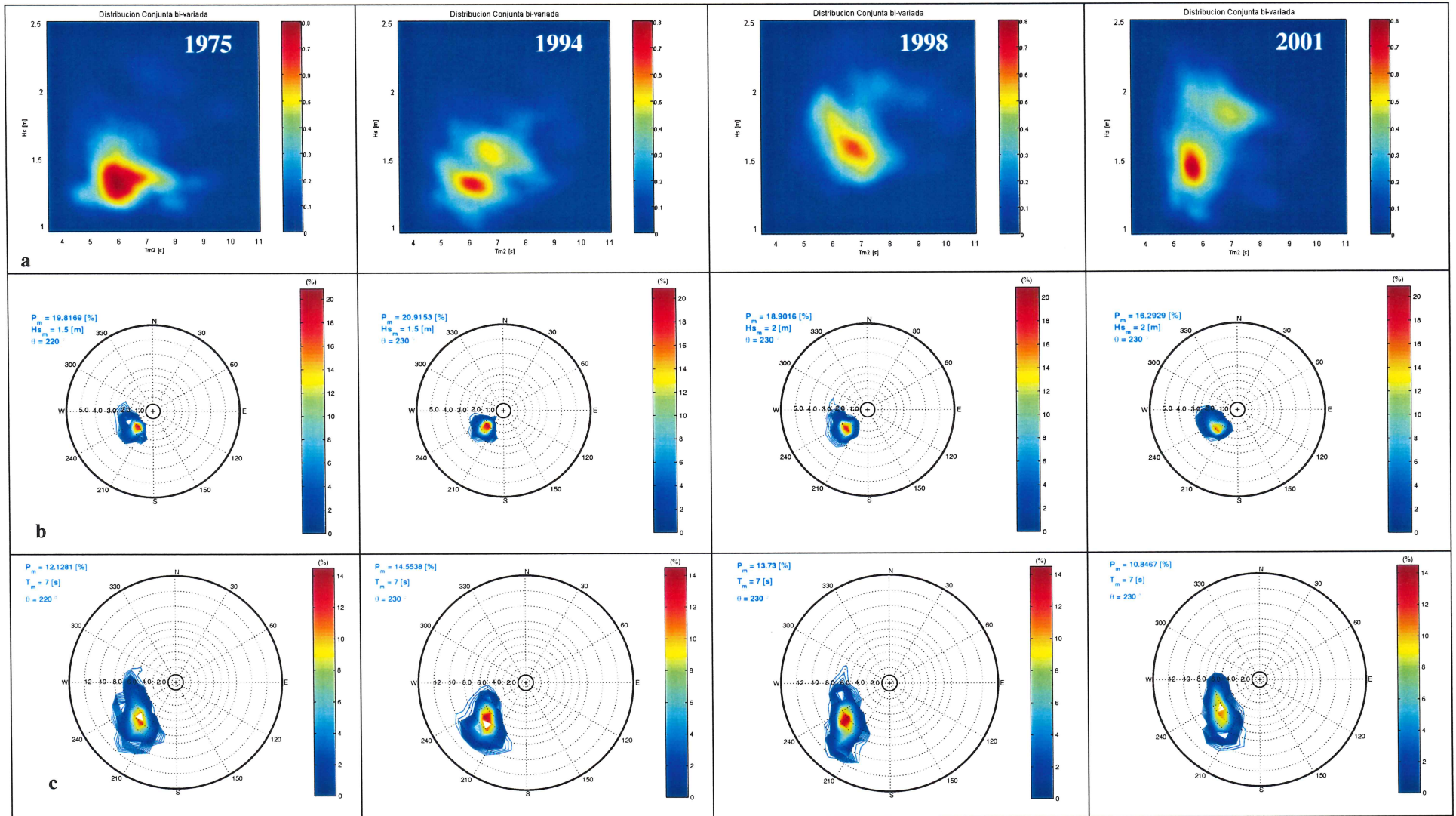


Figura 47.- Distribuciones Bi-variadas para primavera de 1975, 1994, 1998 y 2001, en Isla Madre María: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

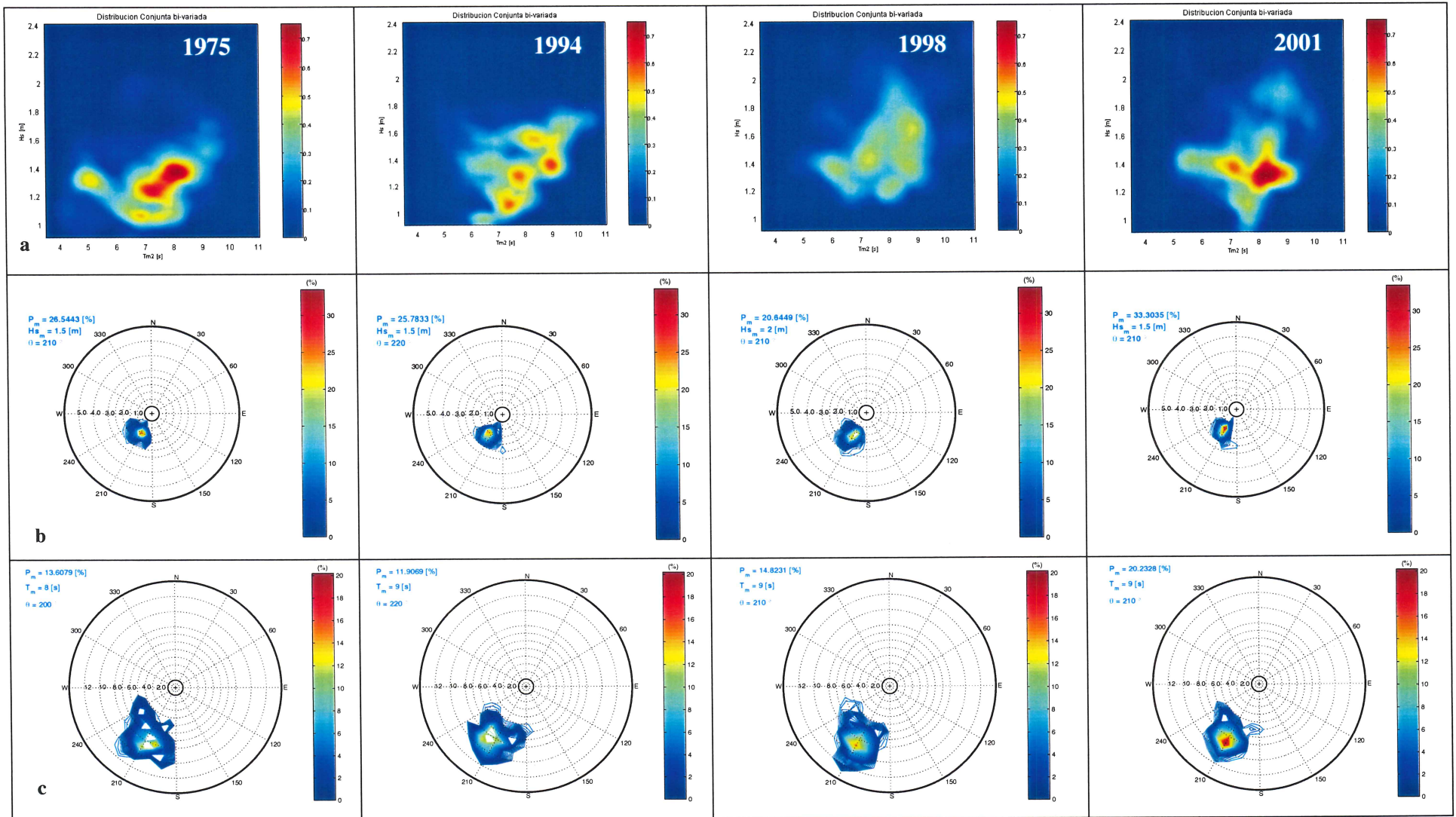


Figura 48.- Distribuciones Bi-variadas para verano de 1975, 1994, 1998 y 2001, en Isla Madre María: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

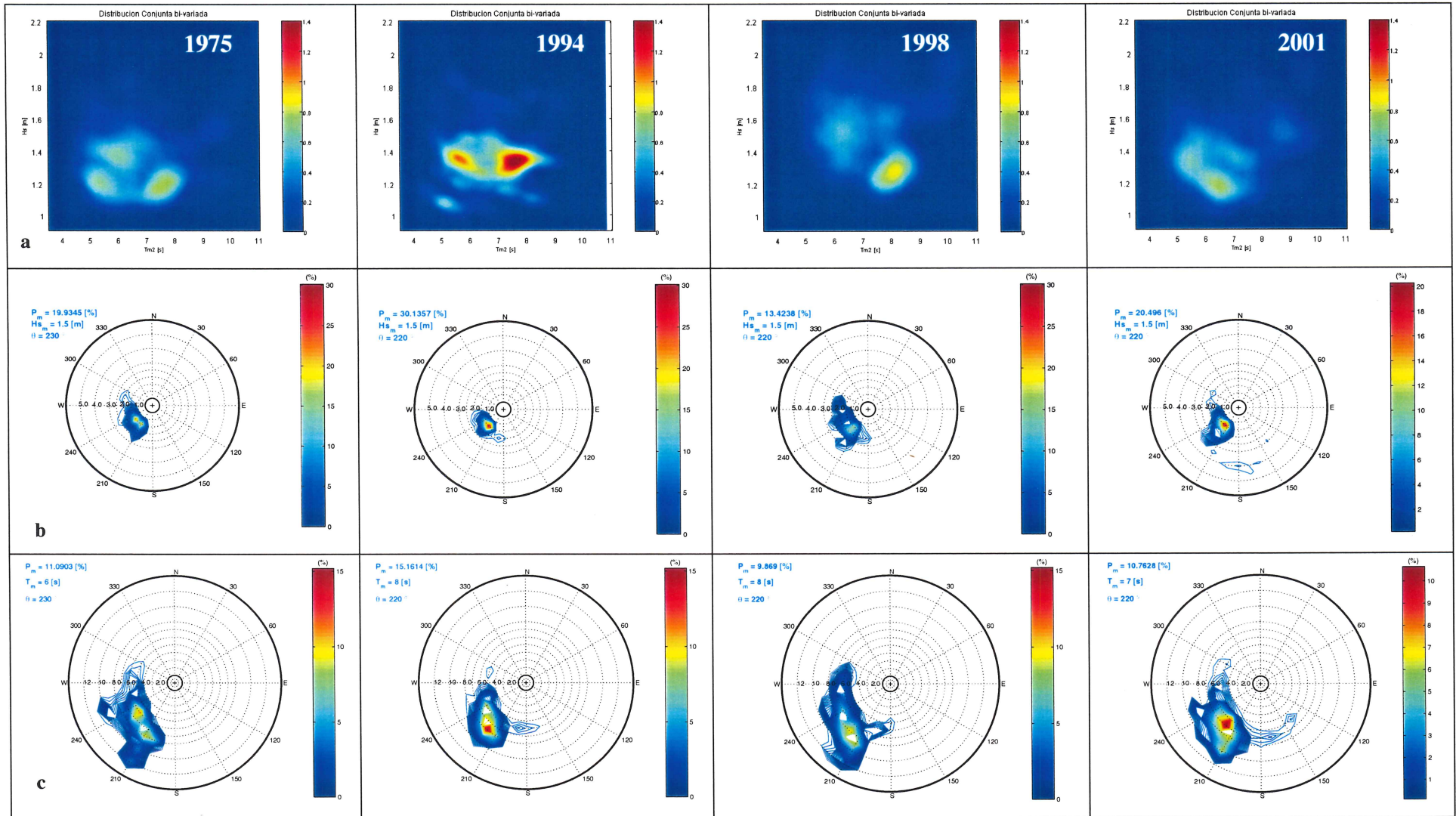


Figura 49.- Distribuciones Bi-variadas para otoño de 1975, 1994, 1998 y 2001 en Isla Madre María: **a)** Distribuciones Bi-variadas de H_s vs T_{m2} , **b)** Distribución Direccional de la altura significativa (H_s), **c)** Distribución Direccional del periodo medio (T_{m2})

II.4.2.3 Análisis de Oleaje Extremo

Distribución del Oleaje Extremo:

Las probabilidades de que existan alturas de ola menores a los 4 m es menor al 90 %, y el oleaje entre 1 y 3 m, comprende, un poco mas del 25 % (*Fig. 50*).

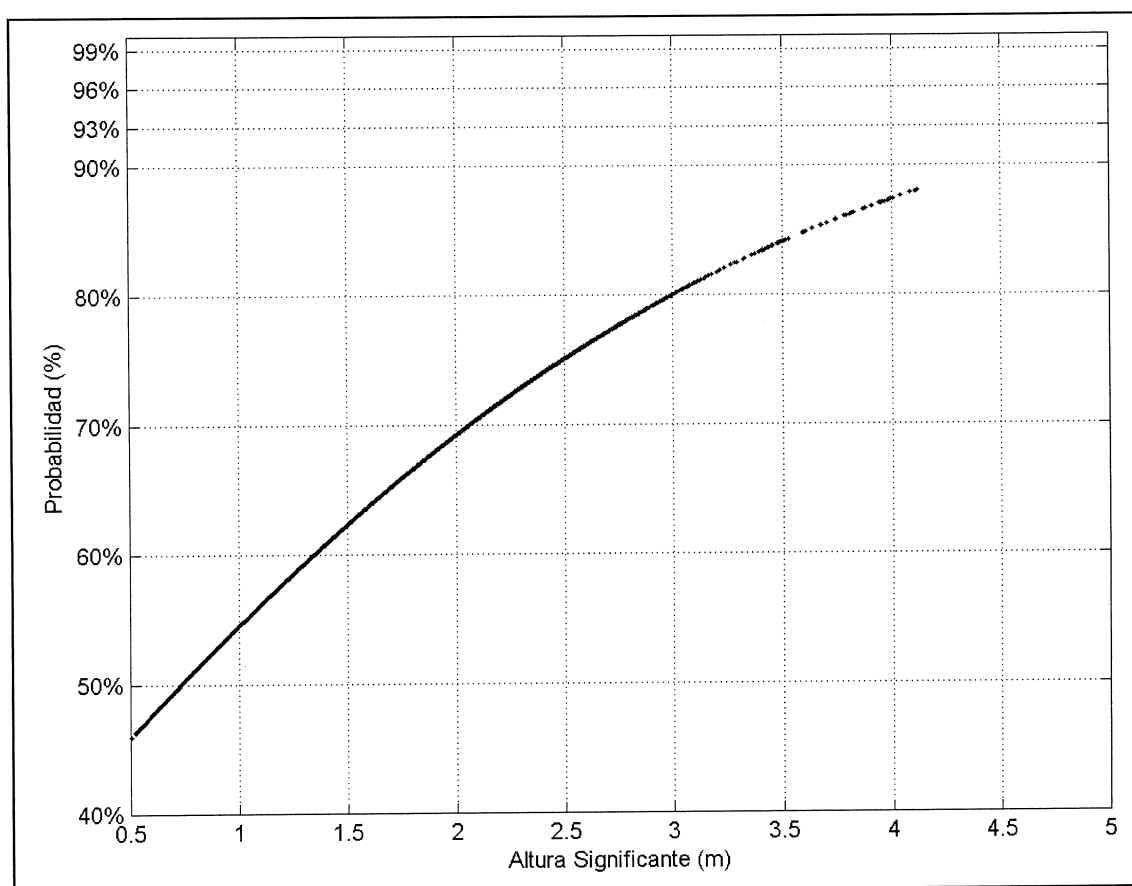


Figura 50.- Distribución Gumbel de Máximos para el registro histórico de 1948 al 2002 en Isla Madre María

Análisis de Excedencias:

La tabla XX, muestra los máximos anuales para el registro histórico de 1948 al 2002, con máximos que van desde los 2.01 m hasta los 4.11 m, los cuales se encuentran ordenados de mayor a menor, para el análisis de excedencias. Los resultados de este análisis para obtener la altura de diseño, se presentan en la tabla XXI, para periodos de vida de estructura de 10, 25, 50 y 100 años y excedencias promedio ($\bar{r}$) de 2, 4 y 8. *e.j* para una estructura con un período de vida de 25 años y con una excedencia de oleaje promedio no mayor a 4 en los próximos 25 años, la altura de diseño es de 2.94 m.

Tabla XX. Máximos anuales para el registro histórico, ordenados de menor a mayor para la Isla Madre María.

Máximos Anuales				
2.01	2.33	2.43	2.6	2.88
2.22	2.34	2.47	2.64	2.89
2.22	2.37	2.48	2.64	2.94
2.23	2.37	2.5	2.64	2.95
2.23	2.38	2.5	2.64	2.97
2.27	2.39	2.51	2.76	2.98
2.27	2.4	2.55	2.77	3.04
2.28	2.42	2.55	2.8	3.07
2.3	2.42	2.56	2.82	3.14
2.31	2.42	2.56	2.86	3.51
2.31	2.43	2.59	2.87	4.11

Tabla XXI.- Altura de Diseño para diferentes excedencias promedio ($\bar{r}$) y diferentes periodos, a partir de los máximos anuales en Isla Madre María

Periodo (años)	H_d $\bar{r}=2$	H_d $\bar{r}=4$	H_d $\bar{r}=8$
10	2.88	2.6	2.33
25	3.07	2.94	2.76
50	3.51	3.07	2.94
100	4.11	3.51	3.07

Probabilidad de Reincidencia:

La probabilidad de que ocurra una reincidencia de una determinada altura de ola, depende del oleaje local existente y del tiempo que transcurre (10, 25, 50 o 100 años). En Isla Madre María, la probabilidad de que olas mayores o iguales ocurran para una altura de diseño de 4 metros es menor a un 75% en 10 años, de un 96.5 % en 25 años, prácticamente 100% en 50 años, y en 100 años la probabilidad es de un 100 % de que alturas de 4 m o mayores ocurran. (Fig.51)

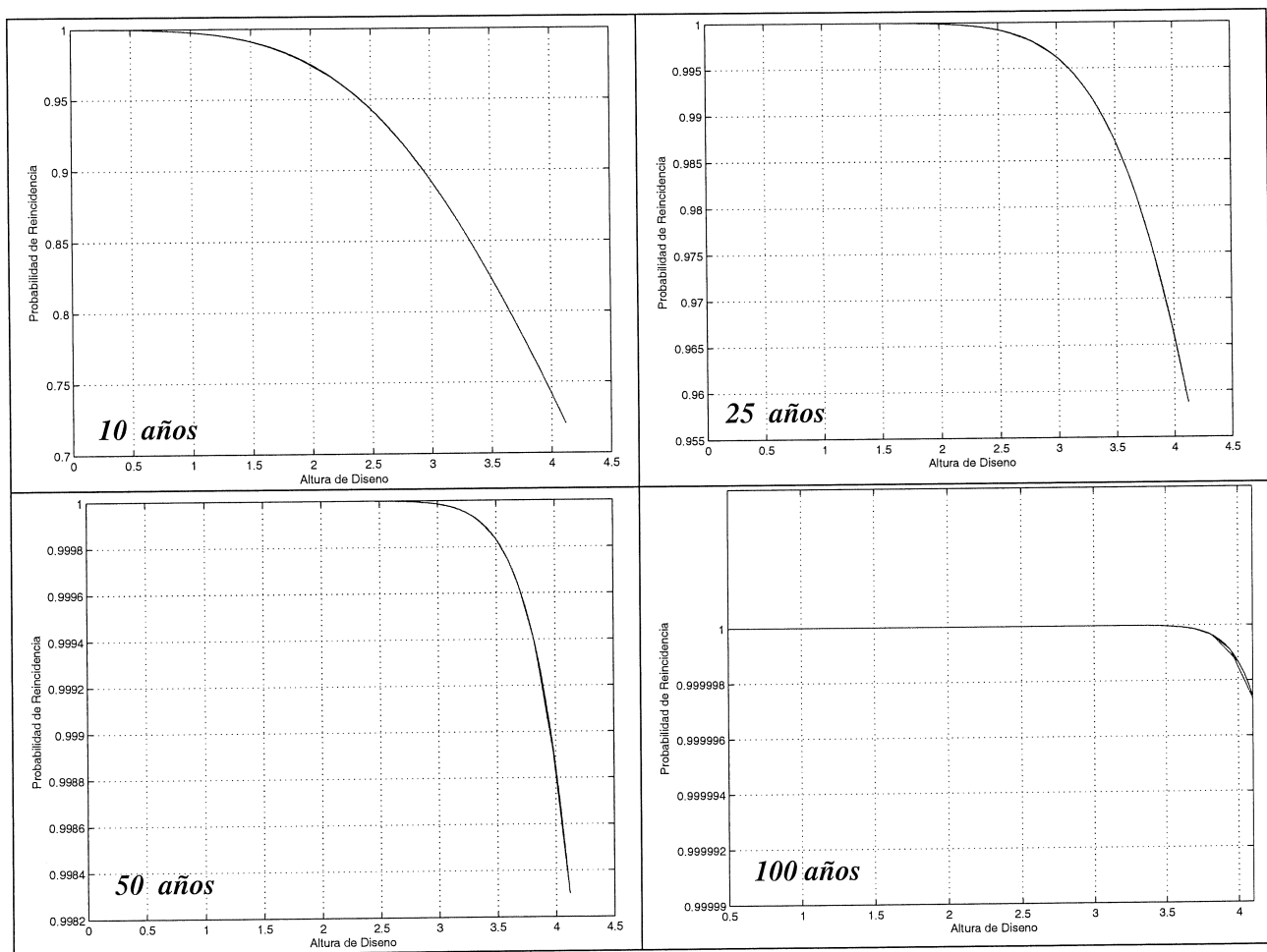


Figura 51.- Probabilidad de que la ola de diseño sea igual o sea excedida para diferentes tiempos de vida de la estructura, en Isla Madre Maria

II.4.3 ESTIMACION DE LA ENERGÍA

a) *Potencia Teórica total por unidad de ancho:*

La potencia teórica por unidad de ancho en Isla Madre María, tiene una ocurrencia máxima entre los 5 y 10 kW/m, donde el máximo de ocurrencia se encuentra a una altura de ola de 1.5 m y períodos de 6 a 9 s. con probabilidades mayores al 16 % (*Fig.52*).

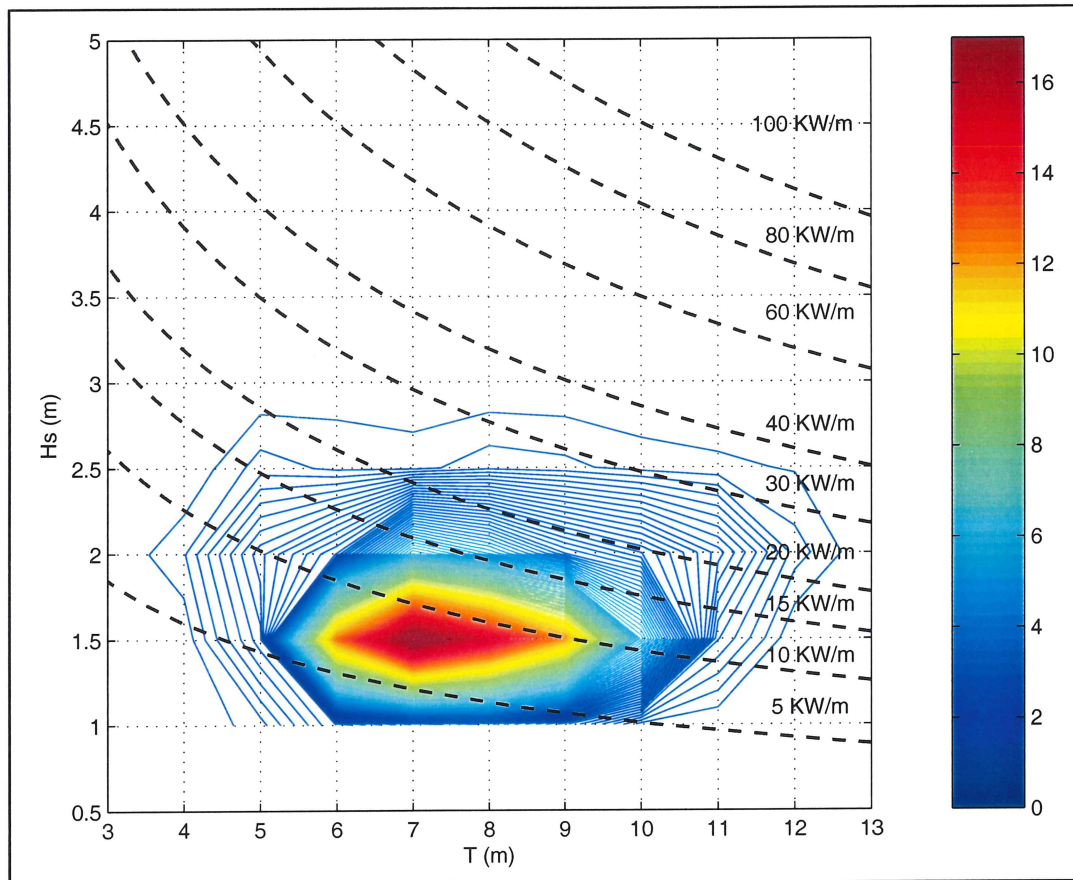


Figura 52.- Distribución de la Potencia Teórica Total por unidad de ancho (kW/m), del registro histórico (1948-2002), en Isla Madre María

Potencia Anual:

La potencia teórica anual en isla Madre María se observa uniforme, teniendo la máxima probabilidad de ocurrencia en potencias de entre 5 y 10 kW/m, excepto en eventos niño, donde el máximo de probabilidad se encuentra entre potencias de 10 a 20 kW/m (*Fig.53*), la altura predominante en todos los años, excepto en eventos niño como el de

1998, es de 1.5 m. y el máximo de ocurrencia de período fluctúa entre 7 y 8 s, el máximo de esta probabilidad conjunta llega a ser mayor a un 18 %. En años niño como el de 1998, la probabilidad conjunta disminuye, y los máximos de probabilidad se encuentran en un período de 8 s y una altura de entre 1.5 a 2.0 m con potencias de entre 15 y 30 kW/m.

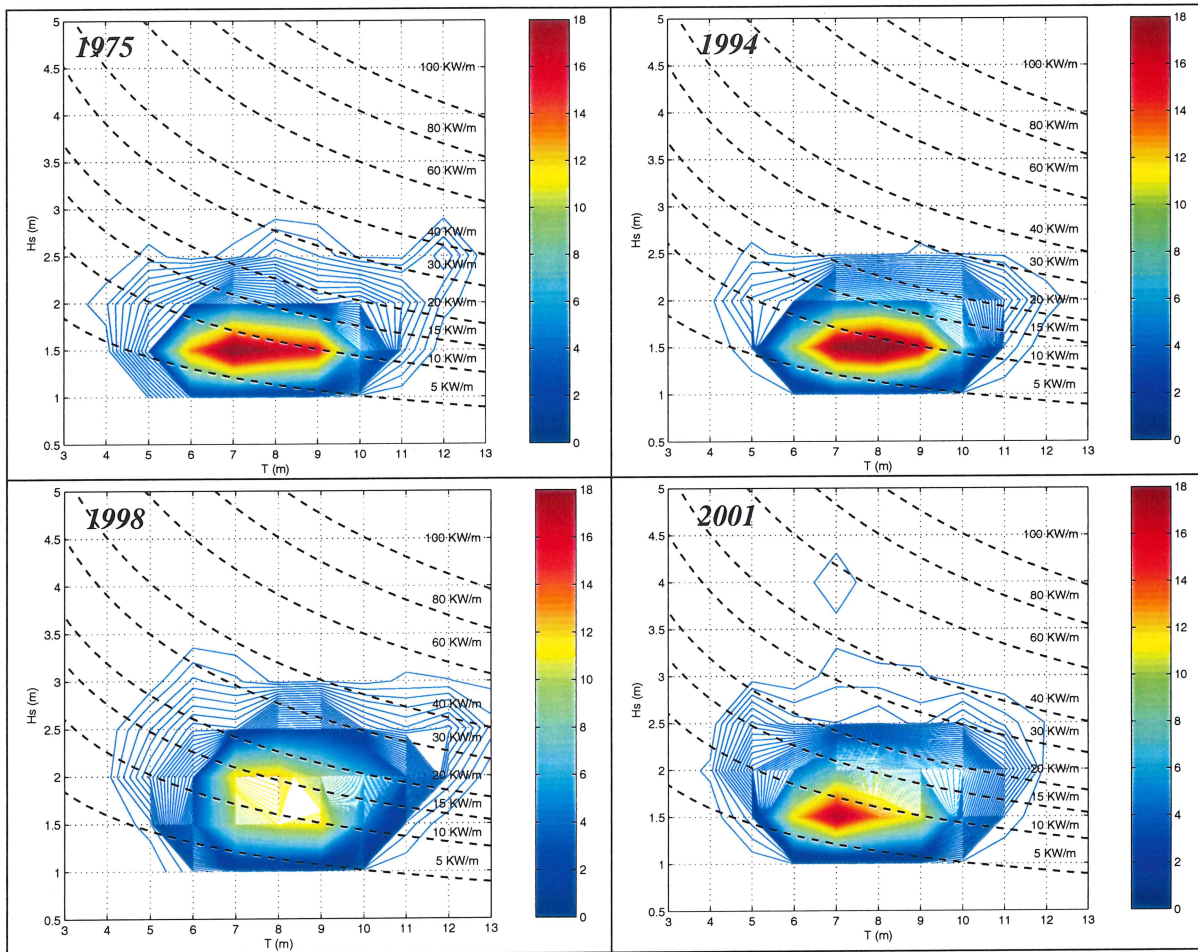


Figura 53.- Distribución de la Potencia Teórica Total anual, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Madre María

Potencia Estacional:

La variabilidad estacional de la potencia teórica total, para Isla Madre María, se ejemplifica para dos años típicos (1975 y 1994) y un año atípico (1998) (*Fig.54*).

Invierno:

La máxima probabilidad de ocurrencia en invierno se encuentra en potencias de 5 a 10 kW/m para alturas de ola de 1.5 m y periodos que van desde 6 a 9 s con probabilidades conjuntas de mas de un 20% de ocurrencia (*Fig.54, 1975 y 1994*). En 1998, se observa un ligero incremento del oleaje, teniendo el máximo de ocurrencia, entre las potencias de 5 a 15 kW/m para alturas de ola de entre 1.5 a 2.0 m y períodos de 7 a 9 s.

Primavera:

La mayor parte del oleaje en primavera se encuentra en alturas de 1.5 m y períodos de 7 a 8 s, observándose un aumento de probabilidad de ocurrencia de hasta un 25% y una tendencia histórica a períodos y alturas mas altas (*Fig.54, 1975 y 1994*). Las potencias de entre 5 y 10 kW/m son las más probables en períodos típicos y de 10 y 20 kW/m en eventos anómalos, como la primavera de 1998, donde la mayor parte del oleaje se encuentra entre 7 y 8 s de período y alturas de ola de 2 m.

Verano:

Verano, muestra una distribución y probabilidad de ocurrencia, similar al de primavera, pero a diferencia de primavera, la mayor parte del oleaje se encuentra entre los 8 y 10 s y los máximos de ocurrencia se encuentran entre las potencias de probabilidad de 5 a 15 kW/m (*Fig.54, 1975 y 1994*). En el verano de 1998, la probabilidad de ocurrencia del oleaje, disminuye y los máximos se encuentran entre 1.5 m y 2.0 de altura y de 8 a 10 s de período, donde las potencias de entre 10 y 20 KW/m, son las mas probables.

Otoño:

En otoño, la mayor parte del oleaje, se encuentra a los 1.5 m de altura y entre 6 y 9 s, donde las potencias de entre 5 y 15 kW/m son los mas probables (*Fig.54, 1975 y 1994*). El otoño de 1998, muestra un máximo de probabilidad, muy puntual entre los 9 s de período y 1.5 m de altura, la cual coincide con la línea de potencia de 10 kW/m.

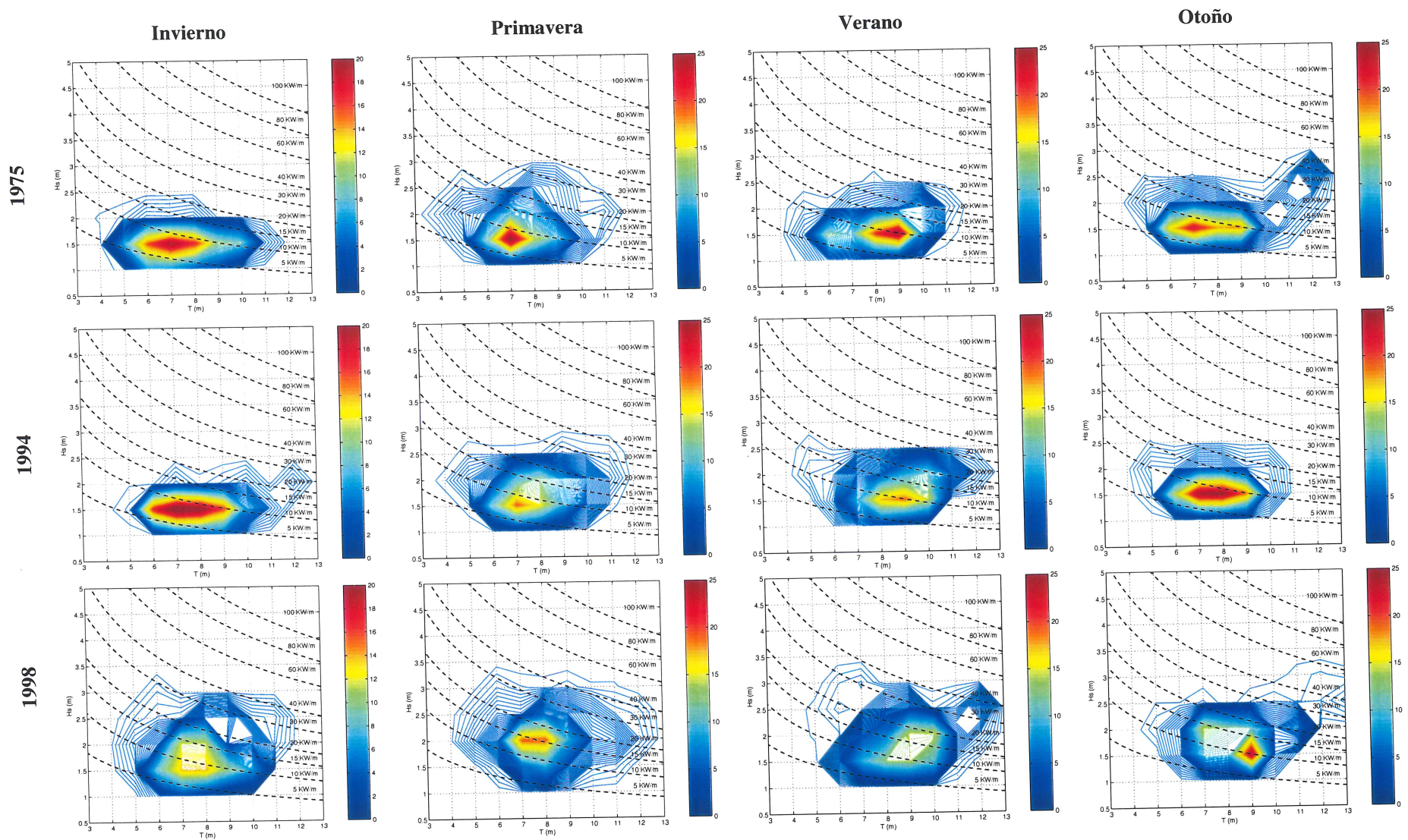


Figura 54. Distribución de la Potencia Teórica Total estacional, por unidad de ancho (kW/m), en Isla Madre Maria

Potencia Mensual:

La distribución y probabilidad de la potencia mensual en Isla Madre María, muestra cambios importantes (**Fig.55**). La potencia mensual para enero, tiene una mayor incidencia entre las potencias de 5 a 10 kW/m, donde la mayor parte del oleaje esta entre 6 y 7 s de período y 1.4 a 1.8 m de altura con probabilidades de ocurrencia de hasta un 25%. En febrero, la mayor parte de la potencia se encuentra entre los 5 y 15 kW/m, para alturas de 1.4 a 1.8 m y períodos de 7 a 8 s con probabilidades de hasta el 30%. Marzo muestra que la mayor parte del oleaje se encuentra entre los 7 y 9 s y entre 1.4 a 1.8 m de altura, donde la máxima probabilidad de ocurrencia se encuentra entre 5 y 15 kW/m con probabilidades menores a un 30%. La probabilidad conjunta en abril tiene su máximo, en 8 s de período y 1.4 m de altura con una probabilidad mayor al 15 % y potencias de oleaje de entre 10 y 15 kW/m.

Los máximos de probabilidad en mayo, se encuentran a los 2.0 m de altura y a los 8 s de período con una probabilidad mayor al 15% y en la línea de potencia de 30 kW/m. La mayor parte del oleaje en junio esta entre los 7 y 8 s de período y los 1.5 y 2 m de altura, con probabilidades mayores al 20 % y potencias de entre 5 y 15 KW/m. Julio muestra dos máximos de ocurrencia, el primero ubicado a los 8 s de período y 1.5 m de altura con una potencia de entre 5 y 10 kW/m y una probabilidad mayor al 20% y el segundo se encuentra entre los 10 s. de período y 1.5 m de altura correspondiente a potencias de entre 10 y 15 kW/m con probabilidades, mayores al 25%. Agosto, muestra de igual manera dos máximos de probabilidad, el primero a los 9 s y 1.5 m con una potencia de 10 kW/m y una probabilidad cercana al 20 % y el segundo se encuentran a los 10 s y 2.0 m con una potencia de 20 kW/m y una probabilidad cercana al 15 %. Septiembre y octubre tienen un máximo de probabilidad entre los 8 s y 1.5 m de altura, correspondiente a potencias de entre 5 y 10 kW/m y una probabilidad de ocurrencia de hasta un 30 %. Noviembre al igual que julio y agosto, muestra, dos máximos de ocurrencia, el primero ubicado a los 7 s de período y 1.2 a 1.8 m de altura y con potencias correspondientes a 5 y 10 kW/m, a una probabilidad de ocurrencia del 30 % y el segundo máximo a los 9 s con una altura de 1.5 m y una potencia de 10 kW/m con una probabilidad mayor al 20% de ocurrencia. Diciembre, tiene su máximo de probabilidad de potencia entre los 5 y 10 kW/m, entre 7 y 9 s de período y 1.5 m. de altura con una probabilidad cercana al 25 % de ocurrencia.

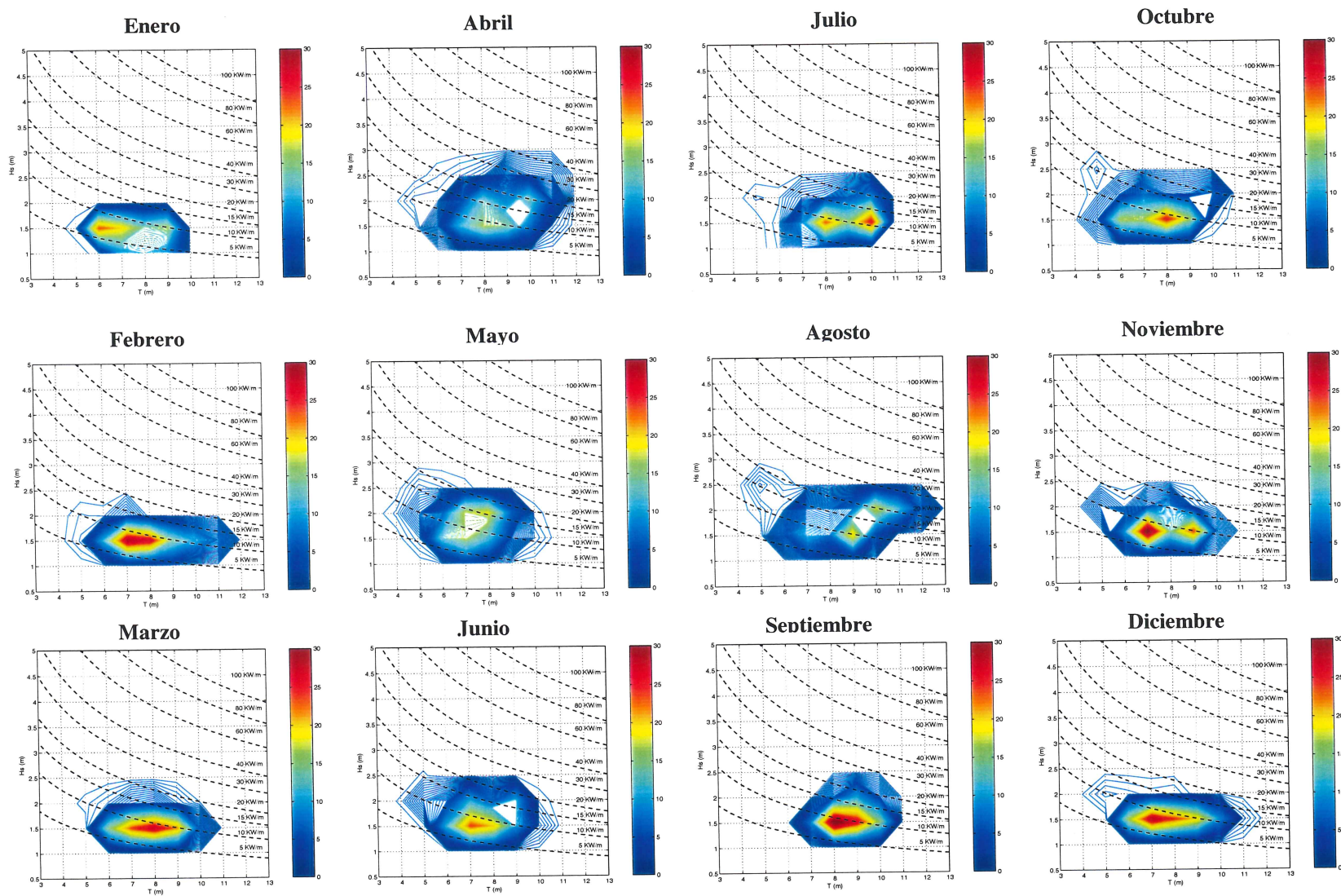


Figura 55.- Distribución de la Potencia Teórica Total mensual, por unidad de ancho (KW/m), en Isla Madre María, para 1994

b) Densidad de Potencia Teórica, en base a los primeros 10 estados de mar :

La tabla XXII, muestra la probabilidad de ocurrencia, de la potencia y densidad de la potencia para los 10 estados de mar mas representativos de Isla Madre María, los cuales comprenden para el registro histórico el 83.7 % del oleaje incidente. La suma de la potencia por unidad de ancho fluctúa entre los 51.14 kW/m y 114.8 kW/m de potencia

Tabla XXII. Probabilidad de ocurrencia y potencia por unidad de ancho, para los 10 estados de mar más representativos, del 2 de Enero de 1948 al 8 de Diciembre del 2002, en Isla Madre María.

#	Hs	Ts	Probabilidad (%)	Potencia (kW/m)	
				Mínimo	Máximo
1	1.0-1.5	6-7	18.02		2.94-7.72
2	1.0-1.5	7-8	15.36		3.43-8.83
3	1.0-1.5	5-6	12.62		2.45-6.62
4	1.0-1.5	8-9	12.17		3.92-9.93
5	1.5-2.0	6-7	5.91		6.62-13.73
6	1.0-1.5	9-10	5.83		4.41-11.03
7	1.5-2.0	7-8	4.82		7.72-15.69
8	1.5-2.0	8-9	3.39		8.83-17.66
9	1.5-2.0	9-10	2.69		9.93-19.62
10	0.5-1.0	7-8	2.56		0.85-3.92
	TOTAL		83.37	51.14-114.8	

Potencia anual y estacional:

El porcentaje promedio de ocurrencia anual de los primeros 10 estados de mar, en Isla Madre María, es mayor al 85 % del tiempo, con una suma de potencias mayor a 40 kW/m y menor a 130 kW/m. Las estaciones muestran un porcentaje de ocurrencia muy parecido desde el 89 % hasta el 92 %. La suma de potencias de los 10 estados para las estaciones, muestra que el mínimo se encuentra en invierno, con potencias mayores a 20 kW/m y menores a 120 kW/m. El máximo de potencia se registra en otoño, con un máximo mayor a los 140 kW/m, sin embargo verano muestra también valores altos de potencia, tanto en sus máximos como mínimos (*Fig.56*).

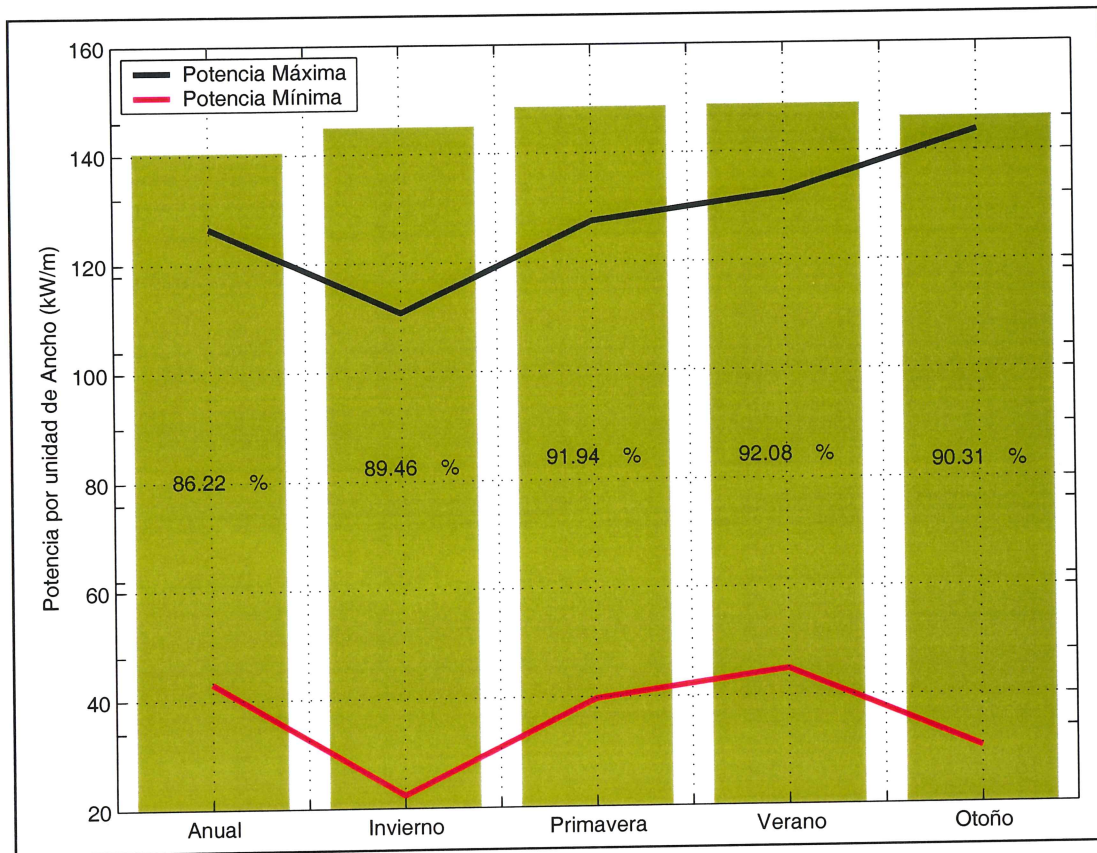


Figura 56.- Porcentaje de ocurrencia promedio anual y estacional de los primeros 10 estados de mar y la suma de potencias por unidad de ancho, mínima y máxima de los mismos, en Isla Madre María.

II.4.4 Interacción Ola-Dispositivo Tipo Rebase de Ola

En la tabla XXIII y XXIV se muestran los resultados del dispositivo de rebase de ola, obteniéndose su probabilidad de rebase de ola (Pov), flujo (q), probabilidad de volumen de agua si sucede el rebase (Pv) y el volumen que entra por ola (Vw) para dos alturas de rampa 0.3 m y 0.9 m., se observa que la probabilidad de que un rebase ocurra, depende exclusivamente de la altura de ola, el volumen que entra por ola. al contrario depende mas del período que de la altura de ola.

Para el caso de una rampa de 0.3 m (*Tabla XXIII*), la probabilidad promedio de que un rebase ocurra es del 95.78 %, con un flujo de 0.435 m³/s por ola, la probabilidad del volumen de agua si sucede el rebase, es significativamente menor que la probabilidad de rebase con un promedio de 63.15%. Existe un volumen de agua promedio por ola, para los 10 estados de mar de 2.84 m³ disponible para una turbina hidráulica.

Tabla XXIII. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $Rc = 0.3$ m. en Isla Madre María.

#	Hs	Tm ₂	Pov (%)	q (m ³ /s)	Pv (%)	V _w (m ³)
1	1.0	5	94.038	0.1595	63.1154	0.7097
2	1.0	6	94.038	0.223	63.0899	1.1901
3	1.0	7	94.038	0.2903	63.0694	1.8059
4	1.0	8	94.038	0.3602	63.0522	2.559
5	1.0	9	94.038	0.4319	63.0375	3.4505
6	1.5	6	97.3049	0.3851	63.0648	1.9839
7	1.5	7	97.3049	0.4913	63.0452	2.9507
8	1.5	8	97.3049	0.6004	63.0287	4.1187
9	1.5	9	97.3049	0.7116	63.0146	5.4889
10	2.0	7	98.475	0.7038	63.0281	4.1745
Promedio			95.7885	0.4357	63.0546	2.8432

Para una rampa de una altura de 0.6 m (*Tabla XXIV*), la probabilidad promedio de que ocurra un rebase es del 84.36%, con un flujo promedio de 0.511 m³/s por ola, la probabilidad del volumen de agua es de un 63.04 %, con un volumen de agua promedio por ola para los 10 estados de mar de 3.76 m³, disponibles.

Tabla XXIV. Volumen de agua que entra por ola promedio y su probabilidad promedio de rebase y de descarga para una altura de rampa de $Rc = 0.6$ m. en Isla Madre María

#	Hs	Tm ₂	Pov (%)	q (m ³ /s)	Pv (%)	V _w (m ³)
1	1.0	5	78.2012	0.1272	63.1175	0.6806
2	1.0	6	78.2012	0.2073	63.0845	1.33
3	1.0	7	78.2012	0.3011	63.0585	2.2512
4	1.0	8	78.2012	0.4055	63.0373	3.4623
5	1.0	9	78.2012	0.5183	63.0194	4.9757
6	1.5	6	89.6477	0.412	63.0574	2.3031
7	1.5	7	89.6477	0.5747	63.0334	3.7451
8	1.5	8	89.6477	0.751	63.0137	5.5894
9	1.5	9	89.6477	0.9378	62.997	7.8468
10	2.0	7	94.038	0.8847	63.0145	5.4922
Promedio			84.3635	0.5119	63.0433	3.7676

Se probaron 5 alturas de rampa (0.3, 0.6, 0.9 1.2 y 1.5 m), para conocer la altura óptima y observar su respuesta a los estados de mar dados (*Fig. 57*). Los valores graficados son los promedios de los 10 estados de mar para 5 alturas de rampa. La probabilidad de rebase (*Fig.57-a*) disminuye junto con el aumento de la altura de la rampa (Rc), de un 95%, bajando drásticamente hasta menos del 40% de su probabilidad, en cambio la probabilidad de volumen de agua (*Fig.57-b*), no experimenta cambios significativos con respecto a la altura de la rampa, manteniéndose casi constante en un 60% de probabilidad. El flujo experimenta un aumento al aumentar la altura de ola (*Fig. 57-c*), hasta los 0.6 m de altura, donde alcanza su máximo (0.51 m³/s) este empieza a disminuir siendo mas evidente después de los 0.9 m, llegando hasta 0.27 m³/s en una altura de 1.5 m. El volumen de agua por ola también tiende una tendencia a un aumento logarítmico (*Fig. 57-d*), después de los 0.9 m donde el volumen de agua por ola es de 4.05 m³, el aumento se hace pequeño (sin embargo este decaerá de nuevo con alturas de rampa mas grandes, ya que existe un límite para un estado de mar dado, donde el rebase será mínimo o imposible).

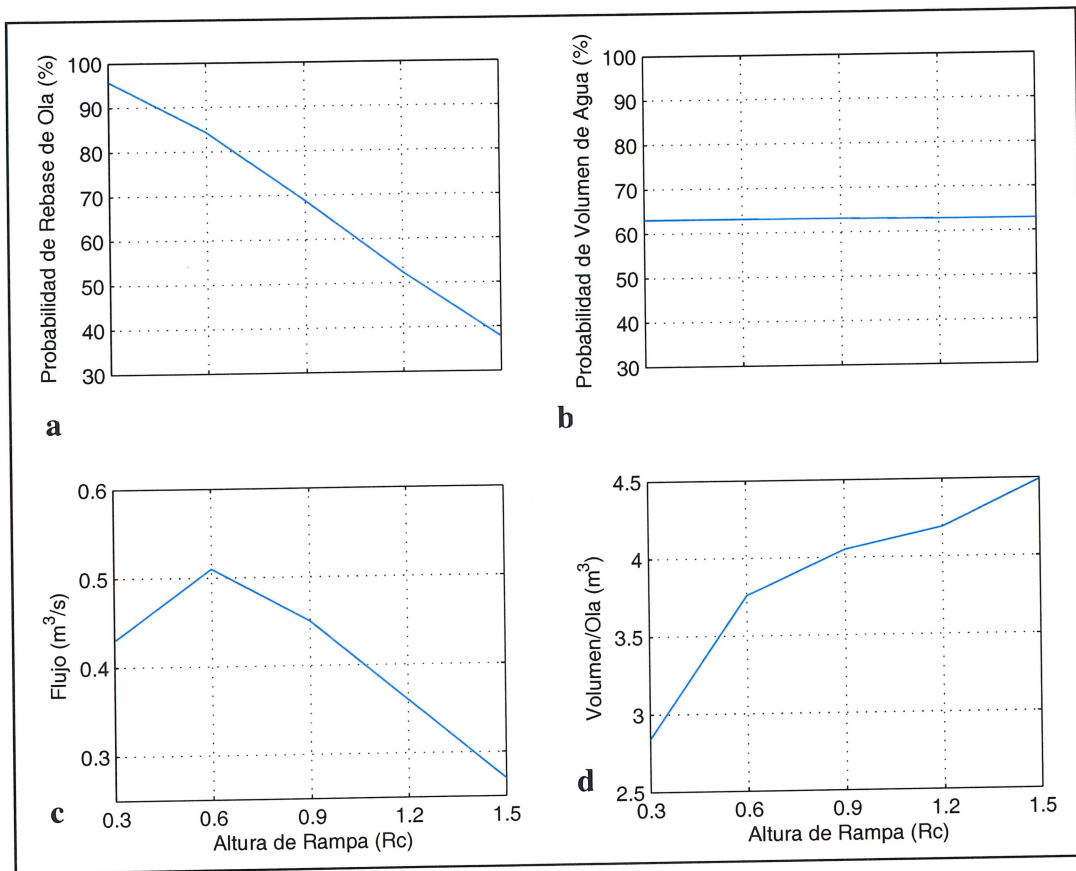


Figura 57. Interacción oleaje-dispositivo para 5 alturas de rampa en Isla Madre María
a) Probabilidad de Rebase de ola (P_{ov}), **b)** Probabilidad de Volumen de agua (P_v), **c)** flujo (q) y **d)** volumen por ola promedio (V_w)

II.3.5 Interacción Ola Dispositivo Oscilante

La tabla XXV y XXVI muestra dos de las combinaciones de diámetro hechas, donde a partir de ellas y los estado de mar se obtiene la altura dentro del dispositivo (η_1), la velocidad en la entrada (v_1), la velocidad de la salida (v_2), el flujo (Q), la diferencia de presión ($p_2 - p_0$), la potencia neumática, disponible para la turbina (P_n), y la eficiencia (η_{ef})

Tabla XXV. Potencia Neumática disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más representativos, para un diámetro de entrada $D_1 = 3.0 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 0.3 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 1.2 \text{ m}$, en Isla Madre María

#	Hs	Tm ₂	η_1 (m)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	Q (m ³ /s)	$p_2 - p_0$ (kW/m ²)	P_n (kW)	η_{ef} (%)
1	1.0	5	0.498	0.1134	11.3422	0.8017	152.3	0.1221	1.6594
2	1.0	6	0.497	0.136	13.6044	0.9616	219.1	0.2107	2.3863
3	1.0	7	0.496	0.1586	15.8631	1.1213	297.9	0.3341	3.2427
4	1.0	8	0.496	0.1812	18.1178	1.2807	388.7	0.4977	4.2273
5	1.0	9	0.494	0.2037	20.368	1.4397	491.2	0.7072	5.3387
6	1.5	6	0.746	0.2041	20.4066	1.4425	493.1	0.7112	3.5794
7	1.5	7	0.745	0.2379	23.7946	1.6819	670.4	1.1275	4.864
8	1.5	8	0.744	0.2718	27.1767	1.921	874.5	1.6799	6.3409
9	1.5	9	0.742	0.3055	30.5519	2.1596	1105.2	2.3867	8.008
10	2.0	7	0.993	0.3173	31.7262	2.2426	1191.8	2.6726	6.4853
Promedio						1.5053	588.4	1.045	4.6132

En la tabla XXV, el porcentaje de eficiencia promedio para un dispositivo con un diámetro de entrada de 3.0 m y de salida de 0.3 m, tiene una potencia promedio disponible para la turbina de 1.045 kW por ola, con una eficiencia promedio de 4.61 %. En la tabla XXVI se muestra lo mismo pero para un dispositivo de un diámetro de entrada de 6.0 m y de salida de 0.6 m, con una potencia neumática promedio disponible de 0.90 kW por ola y con una eficiencia del 1.99 %.

Tabla XXVI. Potencia Neumática disponible para una turbina en base a los 10 estados de mar anuales más representativos, para un diámetro de entrada $D_1 = 6 \text{ m}$ y de salida de $D_2 = 0.6 \text{ m}$, con una longitud sumergida de $L = 2.0 \text{ m}$, en Isla Madre María

#	Hs	Tm ₂	η_1 (m)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	Q (m ³ /s)	$p_2 - p_0$ (kW/m ²)	Pn (kW)	η_{ef} (%)
1	1.0	5	0.499	0.0681	6.8082	1.925	54.8803	0.1056	0.7178
2	1.0	6	0.498	0.0817	8.1676	2.3093	78.9838	0.1824	1.0327
3	1.0	7	0.498	0.0953	9.5257	2.6933	107.4352	0.2894	1.4043
4	1.0	8	0.497	0.1088	10.8824	3.0769	140.2173	0.4314	1.8321
5	1.0	9	0.496	0.1224	12.2375	3.4601	177.3102	0.6135	2.3158
6	1.5	6	0.748	0.1225	12.2514	3.464	177.7136	0.6156	1.5491
7	1.5	7	0.747	0.1429	14.2886	4.04	241.7292	0.9766	2.1064
8	1.5	8	0.746	0.1632	16.3236	4.6154	315.489	1.4561	2.7482
9	1.5	9	0.745	0.1836	18.3562	5.1901	398.9481	2.0706	3.4737
10	2.0	7	0.996	0.1905	19.0514	5.3867	429.7409	2.3149	2.8086
Promedio						3.6161	212.2448	0.9056	1.9989

La tabla XXVII muestra las 5 combinaciones de diámetro y longitud sumergida utilizadas. La potencia promedio, disponible para la turbina va de un 0.024 kW hasta 4.1 kW, con eficiencias que van de un 0.65% hasta un 4.6%. La eficiencia y potencia disponible de un dispositivo oscilante, depende en gran medida al área de acción de este y las características del oleaje, sin embargo como se observa en la figura 61, esto también depende del diámetro de salida y la profundidad a la que es puesto el dispositivo.

Tabla XXVII. Potencia para una turbina, y la eficiencia del dispositivo, a diferentes diámetros de entrada, salida y longitud sumergida en Isla Madre Maria.

#	D ₁ (m)	D ₂ (m)	L (m)	Pn (kW)	η_{ef}
1	0.5	0.1	0.5	0.024	0.657
2	1.0	0.2	0.6	0.057	0.763
3	3.0	0.3	1.2	1.045	4.613
4	6.0	0.6	2.0	0.905	1.99
5	15	1.2	3.0	4.10	3.62

A partir de un aumento del área de acción del dispositivo, mayor será la cantidad de energía del oleaje que puede captar y la potencia disponible para la turbina. Con respecto a la eficiencia del dispositivo, este obedece más a las dimensiones del mismo y los diámetros de entrada y salida del dispositivo. Como se observa en las combinaciones de 3.0-0.3 a la de 6.0-0.6, donde a pesar de que el segundo tiene, una mayor área de acción, la potencia disponible para una turbina que genera, es ligeramente menor al juego de diámetros anterior y su eficiencia se ve drásticamente reducida (*Fig. 58*).

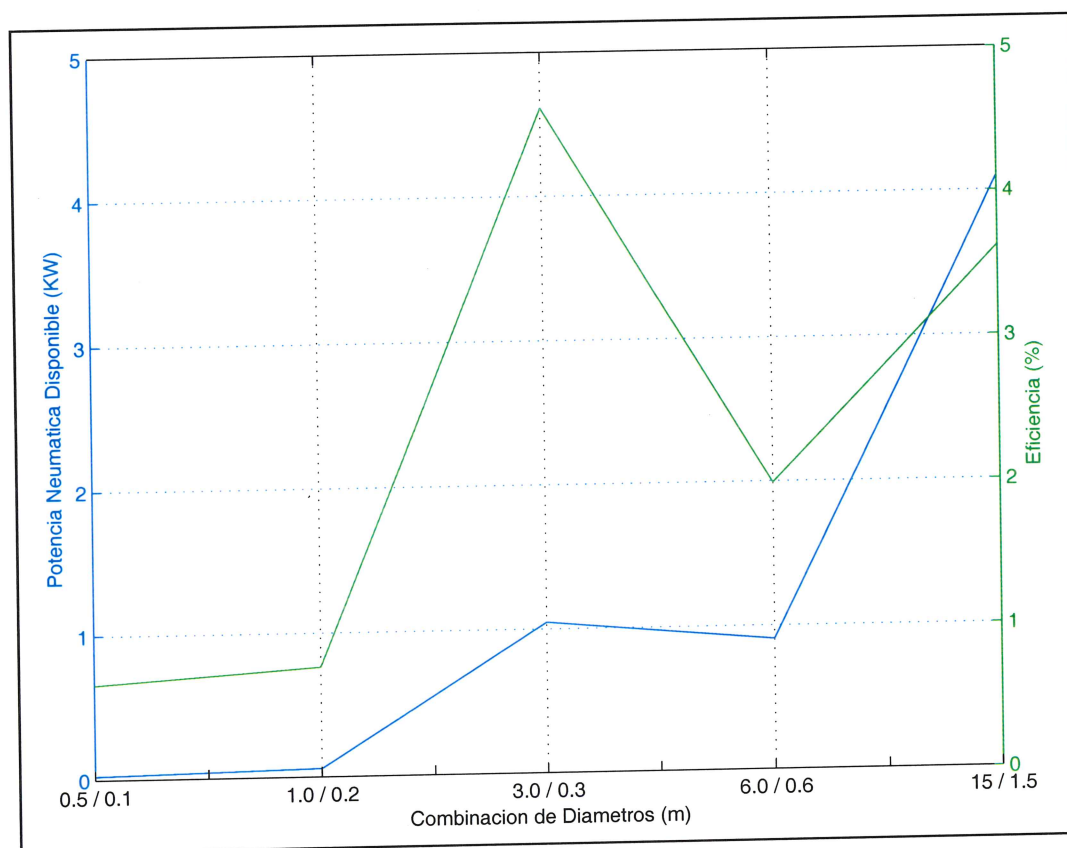


Figura 58.- Potencia disponible para la turbina contra el porcentaje de eficiencia para 5 combinaciones de diámetro de entrada y salida del dispositivo oscilante en Isla Madre María

III.1 DISCUSIONES

ISLA GUADALUPE:

Características del Oleaje:

El espectro direccional anual, en Isla Guadalupe se muestra uniforme a través de los años. La mayor parte de la energía del oleaje, proviene del noroeste a los 300° con una fracción importante del suroeste, existen excepciones, donde el máximo proviene del suroeste (1990), sin embargo en estos casos el oleaje del noroeste es muy significativo. La frecuencia asociada al pico espectral es de 0.074 Hz, típicamente y de 0.0673 Hz en años niño o atípicos. La densidad de energía espectral va de 1.5 a más de $4 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$ (**Fig.6**). Las distribuciones conjuntas, muestran un oleaje, donde sus máximos de ocurrencia se encuentran entre alturas significantes de 1.5 a 2.5 m y períodos de 5 a 8 s (**Fig.7a y 8a**), con direcciones predominantemente noroeste entre 300° y 310° (**Fig.7b, c 8 b,c**).

La variabilidad estacional en Isla Guadalupe, es marcada y evidente, la mayor parte de la energía del oleaje en invierno proviene del noroeste y oeste, siendo este período, el de mayor energía en el año ($3.39 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$, 1993). En primavera la dirección predominante sigue siendo noroeste, con una disminución de la energía respecto a invierno y una mayor influencia de la energía del oleaje proveniente del suroeste. La energía del oleaje en verano es opuesto al de invierno, donde su máximo de energía proviene del suroeste con direcciones entre 200° y 210° , y una presencia mínima, proveniente del noroeste, en este período se presenta el mínimo de densidad de energía anual ($2.52 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$, 1993) y una disminución de la frecuencia asociada al pico espectral de 0.074 a 0.0673. Otoño presenta nuevamente un oleaje predominantemente noroeste, con una aportación del suroeste considerable, registrándose un aumento de la energía, similar a la observada en invierno ($3.31 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$, 1993) (**Fig.9**).

La distribución conjunta estacional de H_s y Tm_2 , muestra que las estaciones con menor variabilidad del oleaje, son verano y otoño y los de mayor son invierno y primavera (**Fig. 10-13**). El mayor porcentaje de ocurrencia del oleaje en invierno, se encuentra entre las alturas significantes de 1.5 a 2.5 m y periodos medios de 5 a 8 s, con direcciones predominantes de los 290° a los 310° (**Fig.10 a,b,c**), en primavera la distribución es similar,

sin embargo la aleatoriedad del oleaje se ve reducida, con máximos de ocurrencia, de alturas significantes iguales a las de invierno y períodos de entre 5 a 7 s con direcciones de 290° a 300° (**Fig. 11 a,b,c**). Para verano las alturas predominantes se encuentran, entre los 1 y 2 m de altura significativa y períodos medios de 5 a 7s, en este período la dirección predominante se vuelve suroeste, entre los 240° y 280° , los máximos de probabilidad de ocurrencia de H_s vs T_{m2} , se presentan en este período (**Fig. 12 a,b,c**). Otoño puede verse, como una etapa de transición entre el verano y el invierno, donde la predominancia del oleaje vuelve a ser noroeste con alturas de ola de entre 1.5 y 2.0 m y períodos de 5 a 7 s (**Fig.13 a,b,c**).

La distribución del oleaje extremo en Isla Guadalupe, muestra que la probabilidad de que una ola menor a 8 m ocurra es del 99% (**Fig.14**). Las alturas de diseño para un período de tiempo dado y un número permitido de excedencias (**Tabla III**), mostraron la necesidad de alturas de diseño mayores a los 3.89 m para un promedio de 8 excedencias en 10 años y alturas de hasta 8.12 m para solo permitir 2 excedencias en 100 años. Las probabilidades de reincidencia del oleaje para una altura de diseño y un tiempo dado, mostraron altas probabilidades de que una altura de diseño de 6 m. ocurra después de los 10 años (40 %), siendo de un 70% en 25 años, del 90 % en 50 años y prácticamente del 100 % en 100 años. (**Fig.15**).

Energía del Oleaje:

La potencia teórica por unidad de ancho anual en Isla Guadalupe, se concentra entre en los 10 y 15 kW/m, (**Fig.16 y 17**), en años anómalos el máximo de ocurrencia puede encontrarse entre los 20 y 30 kW/m como el año de 1998, sin embargo su variabilidad es mucho mayor que en años típicos. Los máximos de ocurrencia se observan, mas o menos invariables entre las estaciones, con potencias de entre 10 y 15 kW/m, mas no así su variabilidad, siendo la estación de invierno la más variable y la de verano la de mayor probabilidad de ocurrencia, con probabilidades de ocurrencia de hasta un 30% (**Fig.18**). En los meses de enero, mayo y de julio a octubre, se encuentran los mínimos de potencia, donde sus máximos de ocurrencia se encuentran entre los 10 y 15 kW/m, seguidos por junio y noviembre, con máximos de ocurrencia en potencias de entre 15 y 20 kW/m, febrero, marzo, abril y diciembre, presentan los máximos de potencia, donde la mayor parte del oleaje se encuentra entre las potencias de 20 a 30 kW/m. Los meses de julio a septiembre

presentan la menor variabilidad y los de noviembre a marzo, presentan la mayor aleatoriedad anual (*Fig.19*).

La densidad de potencia, para los primeros 10 estados de mar en Isla Guadalupe, muestran una probabilidad de ocurrencia de un 68.5 % con una suma de potencias que va de un 84.75 a 164.1 kW/m (*Tabla IV*). La probabilidad anual promedio de que el oleaje se presente en los primeros 10 estados de mar, es de un 70.78 %, con una suma de potencias mayor a 60 kW/m a menos de 200 kW/m (*Fig.20*). La probabilidad de los primeros 10 estados de mar en las estaciones se observa variable, siendo invierno la que presenta la menor variabilidad con un promedio de 62 % y la de verano con la mayor probabilidad con un promedio del 95 % de los casos. Primavera y otoño, presentan probabilidades similares. Los máximos de potencia se dan en las estaciones de Invierno y Primavera con potencias que van de mas de 80 kW/m hasta mas de 220 kW/m. Verano presenta los mínimos de potencia observados con valores que van de mas de 50 kW/m hasta menos de 140 kW/m (*Fig.20*).

Interacción del Dispositivo:

El volumen de agua disponible por ola promedio, en un dispositivo de rebase por ola en Isla Guadalupe va de 3.75 m³ hasta 5.027 m³, con probabilidades de rebase de ola que van de un 98% hasta un 66% del tiempo, para las 5 alturas de rampa propuestas (*Tabla V, VI, Fig. 21*). La altura de rampa óptima fue la de 0.9 m, con un volumen de agua promedio de 5.02 m³, un flujo de 0.75 m³/s y una probabilidad de rebase de 85.7 %

La potencia neumática disponible en un dispositivo oscilante, para las 5 combinaciones de diámetro propuesto, fue de 0.06 a 10.92 kW, con eficiencias de entre 0.6 y 4.6 %, considerando una estructura cilíndrica (*Tabla IX*). La combinación de $D_1 = 3.0$ m y $D_2 = 0.3$ m y $L = 1.2$ m, mostró ser la mas eficiente (5.86%), con una potencia neumática disponible de 2.78 kW, la cual es pequeña comparada con la obtenida por un $D_1 = 15$ m, $D_2 = 1.2$ m y una profundidad de 3 m, donde la eficiencia es la segunda mas alta con 4.59 % y la potencia neumática disponible es de 10.9 kW (*Tabla IX, Fig. 22*).

ISLA SOCORRO:

Características del Oleaje:

El espectro direccional anual del oleaje en Isla Socorro, muestran dos direcciones predominantes, una noroeste y otra suroeste, siendo esta última la mas importante, en la mayoría de los casos, donde el máximo de densidad de energía, se encuentra a los 210° , sin embargo en otros años (1991) y eventos anómalos (1987, 1998), el máximo se encuentra en una dirección noroeste a los 300° . La frecuencia asociada al pico espectral típica es de 0.074 Hz, usualmente asociada a direcciones suroeste y de 0.0673 Hz en años anómalos o asociados a direcciones predominantes noroeste. La densidad de energía máxima para los espectros anuales va de 2 a $3.5 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$ (*Fig. 24*). Las distribuciones conjuntas, muestran un oleaje mayormente agrupado entre alturas significantes de 1.5 a 2.0 m y períodos de 6 a 8 s (*Fig. 25a y 26a*), donde las direcciones predominantes son muy variables encontrándose entre los 200° y 300° (*Fig. 25b,c y 26b,c*).

La variabilidad estacional en Isla Socorro, muestra que la mayor parte del oleaje en años típicos proviene del suroeste, excepto en invierno, donde el máximo de energía del oleaje se encuentra en el noroeste, la frecuencia asociada al pico espectral se mantiene constante siendo de 0.074 Hz, y los máximos de densidad de energía se registran en invierno ($3.01 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$, 1994), y los mínimos en otoño ($1.91 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$, 1994). La aportación de energía del oleaje proveniente del noroeste es considerable todo el año, excepto en verano, donde esta se puede considerar mínima (*Fig. 27*).

La distribución conjunta estacional de H_s y T_{m2} , muestra que la mayor probabilidad de ocurrencia se presenta en las estaciones de primavera y verano, presentándose las mínimas en invierno y otoño (*Fig. 28-31*). La mayor parte del oleaje en invierno, se encuentra entre las alturas de ola de 1.5 a 2.0 m y períodos de 5 a 8 s con direcciones noroeste predominantes entre 290° y 310° (*Fig. 28a,b,c*). En primavera la altura de ola predominante se sigue encontrando entre los 1.5 y 2.0 m, pero se registra un aumento del periodo, (encontrándose el período dominante entre 6 y 8 s) y una disminución de su variabilidad, donde la mayor parte del oleaje proviene de las direcciones de 220° a 280° (*Fig. 29a,b,c*). En verano las alturas predominantes se encuentran entre 1 y 1.5 m, en períodos de 6 a 8 s, con una dirección predominantemente sur, que va de los 190° a los 220° ,

en este período se registra el mínimo de aleatoriedad del oleaje (*Fig. 30a,b,c*). Otoño muestra un aumento en su variabilidad y la mayor parte del oleaje se encuentra agrupado entre alturas de ola de 1.5 a 2.0 m y períodos de 6 a 8 s, con direcciones que van de los 290° a los 330° (*Fig. 31a,b,c*).

La distribución del oleaje extremo en Isla Socorro, muestra que alturas mayores a 4.5 m, tienen una probabilidad de ocurrencia menor al 10% (*Fig. 32*). La altura de diseño para un período de tiempo dado y un número permitido de excedencias (*Tabla XII*), muestra que se necesitan alturas de diseño de 2.81 m. para un promedio de 8 excedencias en 10 años y alturas de 4.52 m, solo permitirían un promedio de dos excedencias en 100 años. Las probabilidades de reincidencia del oleaje para un altura de diseño y un tiempo dado en Isla Socorro, muestran una alta probabilidad que olas mayores a 4 m ocurran, siendo de un 75% de probabilidad en 10 años y prácticamente del 100 % después de los 25 años (*Fig. 33*), esto debido a la alta frecuencia de olas mayores a los 4 m.

Energía del Oleaje:

La potencia teórica por unidad de ancho en Isla Socorro, muestra que la mayor parte de la potencia anual se encuentra entre los 10 y 20 kW/m (*Fig. 35*), en años anómalos (1998) el máximo de ocurrencia, puede encontrarse entre los 15 y 30 kW/m, sin embargo su probabilidad de ocurrencia se ve disminuida. En invierno, el máximo de ocurrencia se encuentra entre los 10 y 15 kW/m, con probabilidades de hasta un 22%, en primavera y verano, este máximo se encuentra entre los 15 y 20 kW/m, con probabilidades de hasta un 25%, en otoño, las probabilidades de ocurrencia pueden llegar hasta un 30%, aunque usualmente son menores, y su máximo de ocurrencia se encuentra entre los 10 y 15 kW/m (*Fig. 36*). La potencia mensual en los meses de abril a noviembre y febrero, tienen sus máximos de ocurrencia entre los 15 y 20 kW/m, diciembre y enero, mantienen sus máximos de ocurrencia entre los 10 y 15 kW/m y marzo entre 10 y 20 kW/m. Los meses de enero, junio, julio y septiembre, tienen el mayor porcentaje de ocurrencia, a diferencia de los meses de marzo y diciembre con las probabilidades más bajas del año (*Fig. 37*).

La densidad de potencia, para los primeros 10 estados de mar en Isla Socorro, muestran una probabilidad de ocurrencia del 82.34 % con una suma de potencias que va de 90.51 a 176 kW/m (*Tabla XIII*). La probabilidad anual promedio de que el oleaje se presente en los primeros 10 estados de mar, es de un 83.7 %, con una suma de potencias mayor a 70 kW/m a a 220 kW/m (*Fig. 38*). La probabilidad de los primeros 10 estados de mar en las estaciones es muy similar, todos mayores al 80%, siendo verano el de mayor probabilidad con un promedio de 95%. La mayor potencia se presenta en primavera con valores que van de 80 a más de 240 kW/m, seguido muy de cerca por invierno. La estación de verano, presenta la menor suma de potencias con valores que van de menos de 80 kW/m hasta los 160 kW/m (*Fig. 38*)

Interacción del Dispositivo:

El volumen de agua disponible, por ola promedio, obtenido por un dispositivo de rebase de ola en Isla Socorro va de 5.10 m³, hasta 8.02 m³, con probabilidades de rebase de ola de un 59% hasta un 97 % del tiempo para las 5 alturas de rampa propuestas (*Tabla XIV, XV, Fig. 39*), La altura de rampa optima fue la de 0.9 m, con un volumen de agua de 8.02 m³, sin embargo su probabilidad de rebase de ola es baja (80%), por lo que la altura de 0.6 m., con una probabilidad de rebase del 90 % , un flujo de 0.91 m³/s y un volumen de agua por ola de 7.21 m³, puede ser considerada la altura óptima.

La potencia neumática disponible en un dispositivo oscilante, para las 5 combinaciones de diámetro propuestos, fue de 0.07 kW hasta 5.86 kW, con eficiencias de entre 1.06 y 7.46 % considerando una estructura cilíndrica (*Tabla XVIII*). La combinación de $D_1 = 3.0$ m y $D_2 = 0.3$ m y $L = 1.2$ m, mostró ser la mas eficiente de los casos propuestos, aunque la potencia neumática disponible es baja 2.95 kW, comparada con la obtenida por un $D_1 = 15$ m, $D_2 = 1.2$ m y una profundidad de 3 m, donde la eficiencia es la segunda mas alta con 5.88 % y la potencia neumática disponible es de 11.61 kW (*Tabla XVIII, Fig. 40*).

ISLA MADRE MARÍA:

Características del Oleaje:

El espectro direccional anual en Isla Madre María, muestra que la mayor parte del oleaje proviene del suroeste, donde el máximo de energía se mantiene invariable en todos los años a una dirección de 210° y una frecuencia asociada al pico espectral de 0.07 Hz, a excepción del año niño de 1998, donde la frecuencia fue de 0.0673 Hz. La densidad de energía máxima para estos espectros fue de 1.8 a $3.2 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$ (**Fig. 42**). La distribución conjunta, muestra un oleaje agrupado principalmente entre alturas significantes de 1 a 1.5 m. y períodos de 5 a 8 s (**Fig. 43a y 44a**), con direcciones suroeste entre los 210° y 230° (**Fig. 43b,c y 44b,c**).

La energía del oleaje en Isla Madre María, conserva su predominancia suroeste a los 210° , en todas las estaciones, con una frecuencia asociada al pico espectral de 0.074 Hz. El oleaje más energético es el de primavera y verano con densidades de energía de $2.3 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$ seguidos por otoño, presentándose el mínimo de energía en invierno con $1.9 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$. Una parte significativa de energía proveniente del noroeste en el período de invierno, la cual disminuye en primavera y prácticamente no existe en verano, en otoño se presenta de nuevo (**Fig. 45**).

La distribución conjunta estacional muestra que la mayor probabilidad de ocurrencia se presenta en las estaciones de invierno y otoño, presentándose los mínimos en primavera y verano. La distribución conjunta en invierno, muestra que el oleaje se encuentra en su mayoría entre alturas significantes de 1 a 1.5 m. y períodos de 5 a 8 s. de manera similar a la distribución anual, con direcciones predominantes de 220° a 250° (**Fig. 46a,b,c**). Primavera muestra el mismo patrón de invierno, pero con una mayor variabilidad con un oleaje que se concentra entre alturas significantes de 1 a 1.8 m. y períodos de 5 a 7 s, con direcciones predominantes de 220° a 230° (**Fig. 47a,b,c**), en verano se observa un aumento del período, donde la mayor parte del oleaje se concentra en períodos de 6 a 9 s y alturas de 1 a 1.6 m, con las direcciones predominantes mas al sur del registro, de 200° a 220° (**Fig. 48a,b,c**). En Otoño se registra la menor variabilidad, para máximos de distribuciones conjuntas de 1 a 1.5 m de altura y períodos de 6 a 8 s, donde la dirección predominante se encuentra entre los 220° y 230° (**Fig. 49a,b,c**).

La distribución del oleaje extremo en Isla Madre María, muestra poca presencia de alturas mayores a 4.0 m donde alturas mayores a esta, tienen una probabilidad mayor al 10% (*Fig. 50*). Las alturas de diseño para un período de tiempo dado y un número permitido de excedencias (*Tabla XXI*), muestra que se necesitan alturas mayores de 2.33 m para solo permitir 8 excedencias promedio en 10 años y alturas de 4.11 m, para solo permitir un máximo de 2 excedencias promedio en 100 años. La probabilidad de reincidencia del oleaje para una altura de diseño y un tiempo dado en Isla Madre María, muestra una alta probabilidad de que olas de 4 m. se presenten, siendo menor al 75 % en 10 años, del 96% en 25 años y prácticamente de 100 % en 50 y 100 años (*Fig. 51*).

Energía del Oleaje:

La potencia teórica por unidad de ancho en Isla Madre María, se concentra en su mayoría en el registro histórico y anual, entre las potencias de 5 a 10 kW/m. (*Fig. 52, 53*), en eventos anómalos como el del 1998, el máximo de ocurrencia se presenta entre los 10 y 15 kW/m de potencia, aunque su porcentaje de ocurrencia es menor que en años típicos. La potencia estacional, se mantiene más o menos uniforme con sus máximos de ocurrencia igual a la de anual, aun en su probabilidad de ocurrencia que se encuentra entre 20 y 30 % , donde las estaciones de primavera y verano, presentan su máximo de ocurrencia de 5 a 10 kW/m, pero con una ocurrencia importante en 15 kW/m, a diferencia de verano y otoño, donde la mayor parte de su oleaje se concentra marcadamente entre las líneas de potencia de 5 a 10 kW/m. (*Fig. 54*). La distribución mensual de la potencia muestra una mayor diferencia entre ellas que la estacional, donde los meses de enero a marzo, junio, octubre a diciembre, presentan su máximo de ocurrencia entre potencias de 5 a 10 kW/m, los meses de abril y agosto presentan dos máximos de ocurrencia entre las potencias mas altas de todo el año siendo el primero pico a los 10 kW/m y el segundo a los 20 kW/m, mayo y julio, también presentan dos máximos de ocurrencia el primero a los 10 kW/m y el segundo a los 15 kW/m (*Fig. 55*).

La densidad de potencia en Isla Madre María para los primeros 10 estados de mar muestra un porcentaje de ocurrencia de un 83 % en el registro histórico y una suma de potencia de los primeros 10 estados de mar, de entre 51.14 a 114.8 kW/m (*Tabla XXII*). La

probabilidad promedio anual de que el oleaje se encuentre entre los primeros 10 estados de mar es de un 86 % con una suma de potencias que van de 40 kW/m hasta casi los 130 kW/m (*Fig. 56*). La probabilidad de ocurrencia estacional es similar a la anual en todas las estaciones, con probabilidades que van de un 89 % a un 92%. El mínimo de potencia se presenta en invierno con valores cercanos a los 20 kW/m hasta los 110 kW/m, los máximos se registran en verano y otoño con mínimos que van desde los 30 kW/m hasta valores máximos cercanos a los 140 kW/m (*Fig. 56*).

Interacción del Dispositivo:

El volumen de agua disponible por ola, obtenido por un dispositivo de rebase de ola en Isla Madre María, va de 2.8 m^3 a 4.5 m^3 , con probabilidades de rebase de ola que va de un 95% hasta menos del 40 % del tiempo (*Tabla XXIII, XXIV y Fig. 57*). La altura de rampa optima es la de 0.6 m, con un volumen de agua de 3.76 m^3 , un flujo de $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ y una probabilidad de rebase del 84 % del tiempo, la altura de rampa de 0.9 m, presenta un mayor volumen de agua, sin embargo su probabilidad de rebase es menor al 70 % del tiempo.

La potencia neumática disponible para una turbina en un dispositivo oscilante, para los diámetros propuestos en este trabajo, fue de 0.024 kW a 4.1 kW, con eficiencias que van de un 0.6 % hasta un 4.6%, considerando una estructura cilíndrica (*Tabla XXVII*). La combinación de, $D_1 = 3.0 \text{ m}$ y $D_2 = 0.3 \text{ m}$ y una profundidad de 1.2 m, fue la mas eficiente, con una potencia de 1.04 kW, la eficiencia de la combinación $D_1 = 15.0 \text{ m}$ y $D_2 = 1.2 \text{ m}$ y una profundidad de 3 m, es cercana a la máxima con 3.62% y representa la máxima potencia neumática disponible de 4.1 kW, para las combinaciones propuestas (*Tabla XXVII, y Fig. 58*).

III.2 CONCLUSIONES

ISLA GUADALUPE:

El oleaje anual en Isla Guadalupe, proviene de manera típica del noroeste y oeste, con una frecuencia asociada al pico espectral de 0.074 Hz y densidades de energía del orden de 1 a 3 m²/Hz/grado. La mayor parte del oleaje anual, muestra alturas de entre 1.5 a 2.5 m y períodos de 5 a 8 s. La variabilidad estacional en Isla Guadalupe es muy marcada, siendo la estación de invierno el más energético y a la vez más variable con una dirección predominantemente noroeste y verano, el menos energético del año y un oleaje con menor variabilidad, siendo el suroeste la dirección predominante. El análisis de oleaje extremo, mostró altas probabilidades de ocurrencia de oleaje extremo, arriba de los 25 años de vida de una estructura y una altura de diseño grande para evitar un número excesivo de excedencias.

La distribución teórica total por unidad de ancho, anual y estacional, mostró que la mayor parte del oleaje se encuentra entre los 10 y 15 kW/m, con máximos de probabilidad ocasionalmente entre los 15 y 30 kW/m, la única diferencia entre las estaciones con respecto al máximo de potencia, mostró ser la variabilidad del mismo, teniendo otra vez al invierno con una alta variabilidad comparado con el verano. Los primeros 10 estados de mar mostraron una probabilidad de ocurrencia media; entre 60 y 80 % anual y 65 al 100 % estacional, considerándose un porcentaje suficiente para utilizar los 10 primeros estados de mar en cuestiones de diseño.

La modelación numérica del dispositivo de rebase de ola mostró poder captar un volumen de agua promedio por ola para los 10 estados de mar de entre 3.75 m³ y 5.027 m³ considerándose la altura de rampa de 0.9 m como la altura optima.. En el caso del dispositivo oscilante, la potencia neumática disponible para una turbina mostró captar de 0.06 a 10.92 kW promedio, para las 5 combinaciones de diámetro propuestos, considerando un dispositivo cilíndrico, donde la combinación de $D_1 = 15$ m, $D_2 = 1.2$ m y una profundidad de 3 m. obtuvo los mejores resultados.

ISLA SOCORRO:

El oleaje anual en Isla Socorro, proviene normalmente del suroeste con una frecuencia asociada al pico espectral de 0.074 Hz, y densidades de energía de entre 2 a 3.5 m²/Hz/grado, en casos aislados o anómalos la mayor energía proviene del noroeste con una frecuencia asociada al pico espectral de 0.0673 Hz. La mayor parte del oleaje anual se encuentra entre las alturas de 1.5 a 2.0 m y períodos medios de 6 a 8 s. La variabilidad estacional, muestra una dominancia en todo el año del oleaje proveniente del suroeste, excepto en invierno, donde el máximo de energía proviene del noroeste. El máximo de energía se registra en invierno y el mínimo en otoño. La distribución del oleaje extremo, mostró una probabilidad del 100 % en alturas de ola de 4 m. para un tiempo mayor a 25 años. Olas mayores a 4.5 m no se registraron, teniendo una posibilidad de que se presenten del 10 %.

La mayor ocurrencia de oleaje se encuentra entre las líneas de potencia de 10 y 20 kW/m, en años anómalos (1998), el máximo de ocurrencia se encontró entre las líneas de potencia de 15 y 30 kW/m. La mayor ocurrencia en las estaciones, coincide con la anual, con líneas de potencia de entre 15 y 20 kW/m y la diferencia en su variabilidad es pequeña yendo de un 22% en invierno a un 30% en otoño. La ocurrencia mensual se comporta de manera similar, siendo las líneas de potencia de 15 a 20 kW/m las de mayor ocurrencia en la mayoría de los meses, siendo los meses de marzo y diciembre, los de menor probabilidad de ocurrencia. En el caso de la densidad potencial de los primeros 10 estados de mar, muestran una potencia total obtenida de 3.5 a 9.3 kW/m² anual, con probabilidades de ocurrencia de entre el 73 y 92 % anual y de 79 al 98 % estacional, la probabilidad mensual llega hasta un 100%, por lo que los primeros 10 estados de mar son una buena representación del oleaje incidente y útil para consideraciones de diseño.

La modelación numérica del dispositivo de rebase de ola, mostró poder captar un volumen de agua disponible para los 10 estados de mar, de entre 5.10 m³ y 8.02 m³, considerándose la altura de rampa de 0.6 m como la óptima para el oleaje incidente en esta localidad. Para el dispositivo oscilante, la potencia neumática disponible para las 5 combinaciones propuestas, varío de 0.07 kW hasta 5.86 kW, siendo la combinación de D₁ = 15 m, D₂ = 1.2 m, la que mejor resultados obtuvo, en términos de eficiencia y potencia neumática.

ISLA MADRE MARÍA:

El oleaje anual en Isla Madre María, proviene en su mayoría del suroeste, principalmente de la dirección de 210° , y una frecuencia asociada al pico espectral de 0.074 Hz con densidades de energía que fluctúan típicamente de entre 1.8 y 2.5 Hz, en casos anómalos como el del 1998, la frecuencia es de 0.0673 Hz a una densidad de energía de 3.2 $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{grado}$. La mayor parte del oleaje anual, se encuentra entre 1 y 1.5 m de altura y de 5 a 8 s de período. La variabilidad estacional del oleaje, en Isla Madre María, no presenta grandes diferencias, con una predominancia del oleaje proveniente del suroeste todo el año y máximos de energía en los meses de primavera y verano, invierno muestra una aportación significativa del oleaje proveniente del noroeste. El análisis del oleaje extremo muestra una ocurrencia pequeña de alturas de ola, mayores a 4.0 m, sin embargo la probabilidad de que se presenten es mayor al 10% y alturas de diseño pequeñas para evitar un número elevado de excedencias

La mayor parte del oleaje se encuentra entre las potencias de 5 a 10 kW/m^2 , en períodos extremos como el de 1998, el máximo del oleaje se encuentra entre 10 y 15 kW/m^2 de potencia. Los máximos de ocurrencia estacionales, siguen siendo de 5 a 10 kW/m^2 , sin observarse grandes diferencias entre las estaciones, con porcentajes de ocurrencia de entre 20 y 30%. En la distribución mensual de la potencia, los meses de enero a marzo, junio, octubre y diciembre, tienen el mismo máximo de ocurrencia que el anual y estacional, a diferencia de los meses de abril, mayo, julio y agosto donde se observan dos máximos de ocurrencia el primero asociado a los 10 kW/m^2 y el segundo entre los 15 y 20 kW/m^2 . La densidad potencial total de los primeros 10 estados de mar, es de 2.5 a 5 kW/m^2 anual, con probabilidades de ocurrencia de 79 al 90 % del tiempo anual, del 81 al 96 % estacional y una ocurrencia de hasta 100 % mensual, la diferencia estacional o mensual en términos de la densidad potencial, es pequeña y con un alta probabilidad, por lo que se puede considera una buena aproximación del oleaje incidente y ser útil en consideraciones de diseño.

La modelación numérica del dispositivo de rebase de ola, en base a los primeros 10 estados de mar, mostró poder, captar un volumen de agua para las 5 alturas de entre 2.8 m^3 y 4.5 m^3 , considerando a la altura de rampa de 0.6 m como la óptima. En el caso del dispositivo oscilante, la potencia neumática disponible capaz de captar un dispositivo

cilíndrico, en las 5 combinaciones, fue de 0.024 kW a 4.1 kW siendo las combinaciones de $D_1 = 3$ y 15 m, $D_2 = 0.3$ y 1.2 m, la que mejor resultados obtuvieron.

III.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Utilización de las condiciones de frontera generados en este trabajo para realizar mallas mas finas, en cualquier área del pacifico para ser aplicado en regiones costeras.
- Creación de una base de datos o un software amigable, capaz de determinar las características del oleaje y su energía en áreas determinadas.
- Una vez determinado un posible lugar con el modelo Wam, estos datos deben ser complementados con mediciones en el lugar exacto donde se planea poner el dispositivo y simulaciones numéricas con una malla más fina.
- Al ser este un registro histórico, considerablemente grande realizar un estudio del cambio del oleaje a través del tiempo y si este tiene una relación con el calentamiento de la Tierra.
- Estudios de la interacción oleaje-dispositivo, esto es fundamental para el diseño y realización de prototipos.
- Trabajos interdisciplinarios para plantear, entender y resolver problemas relacionados con la extracción de energía del oleaje.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Barstow F. Sthephen. 1996.** Ocean Wave Energy in the South Pacific: The Resource and its utilization, ed. South Pacific Aplied Geoscience Commission in Conjunction with the Governmmnt of Norway. 60 pp.

- [2] **Cerca Martínez L.M. 1995.** Evaluación del Potencial de Extracción de Energía Electrica a Partir del Oleaje, como Posible Fuente Alterna en Rosarito, B.C Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC, Ensenada, México. 51 pp.

- [3] **CONAE, 2003.** <http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=2045>

- [4] **Czitron, S., R. Godoy, E. Prado, P. Pérez, R. Peralta. 2000.** Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump, Part I: Theoretical aspects Ocean Engineering, Vol. 27, 1181-1198, Pergamon

- [5] **DECSIACD** (División de Economía y Comercio del Servicio de Investigación y Análisis de la Cámara de Diputados). **2001.** El gasto de los hogares por consumo de electricidad: Análisis por deciles de ingreso

- [6] **Eugenia Kalnay, Robert Kistler, William Collins, Suranjana Saha, GlennWhite, John Wollen, Muthuvel Chelliah, Wesley Ebisuzaki, Masao Kanamitsu, Vernon Kousky, Huug van den Dool, Roy Jenne & Michael Fiorino. 1999.** The NCEP/NCAR 50 Year Reanalysis. Submitted to the bulletin of the American Meteorological Society, June 1999

- [7] **Falnes Johannes 2002.** Ocean Waves and Oscillating Systems, Linear interactions including wave-energy extraction, ed. Cambridge, U.K, pp 269.

- [8] **Gómez-Pompa, A. y R. Dirzo. 1995.** Reservas de la biosfera y otras áreas naturales protegidas de México. INE y CONABIO.

-
- [9] **Goda, Y. 1985.** Random Seas and Design of Maritime Structures, ed. University of Tokyo Press, pp. 323
- [10] **Hiramoto, A. 1978.** The Theoretical analysis of an Air Turbine. Generation systems proceedings, wave and tidal symposium, Canterbury, England, paper B5.
- [11] **Holmes, B. 2003.** Requirements for Floating Wave Energy Devices, _Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy, E.E.S.D, European Community, 175-193 pp
- [12] **Horpe, T.W. 2000.** The Wave Energy Program in the UK and the European Wave Energy Network_Fourth European Wave Energy Conference, Denmark.
- [13] **INE. 1994.** Programa de Manejo de la Reserva Especial de la Biosfera Islas del Golfo de California, SEDESOL, México
- [14] **INEGI. 1994.** Atlas del Territorio Insular Habitado de los Estados Unidos Mexicanos y anexo cartográfico, 1990, México, INEGI
- [15] **INEGI. 2000.** “XII Censo de Población y Vivienda 2000. Principales resultados por localidad. 2000, México, INEGI
- [16] **Lewis Tony. 2003.** Review of Ocean Energy Projects within the European Union, Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy, E.E.S.D, European Community, 130-140 pp
- [17] **Martinelli, L & Frigaard, P. 1999.** The wave dragon : 3d Overtopping tests on a floating model , JOULE-CRAFT project & Danish Wave Energy Program. Aalborg University – Aalborg.

-
- [18] **Massel R. Stanistaw. 1998.** Ocean Surfaces Waves: Their Physics and Prediction. ed. World Scientific, UK, Advanced Series on Ocean Engineering, vol 11., 491 pp.
- [19] **McCormick, Michael. 1981.** Ocean Wave Energy Conversion, ed Wiley-Interscience, England, pp 233.
- [20] **National Center for Environmental Prediction (NCEP/NCAR) . 2003.**
<http://dss.ucar.edu/datasets/ds090.0/> y <http://www.cdc.noaa.gov>
- [21] **Oceanor, 2003.** <http://www.oceanor.no/products/software/wwa/>.
- [22] **Padilla Hernández R. 1989.** Potencia y dirección del oleaje en la costa noroeste de la Península de Baja California y su aprovechamiento. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC, Ensenada, México. 58 pp.
- [23] **Pontes Teresa, Alain Clement, António Falcão, Antonio Florentino, Ponte di Archemedi, Luis Gato, Paulo Justino, António Sarmento. 2003.** Generic Technologies, Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy, E.E.S.D, European Community, 7-98 pp.
- [24] **Rivas Cáceres, H. 1992.** Conversión de energía del oleaje: diseño, usos y aplicaciones, Tesis de Licenciatura, UABC, Facultad de Ciencias Marinas. Ensenada, México, 62 pp.
- [25] **Ruiz F., M. Merino, M. Alatorre, S. Czitron, V. Franco. 1994.** Un dispositivo de bombeo de agua marina activado por oleaje, Ingeniería Hidráulica en México. Vol. IX, Núm. 2, 45-51 pp.
- [26] **Shaw R. 1982.** Wave Energy: A design challenge ed. Ellis Horwood Limited, England, pp 203.

-
- [27] **Silva R, 2001.** Apuntes del Curso: Análisis y predicción del oleaje, División de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [28] **Soerensen, H.C., R. Hansen, E. Friis-Madsen, W. Panhauser, G. Mackie, H.H. Hansen, P. Frigaard, T. Hald, W. Knapp, J. Keller, E. Holmén, B. Holmes, G. Thomas, P. Rasmussen, J. Krogsgaard. 2000.** Wave Dragon - Now Ready for Test in Real Sea. Proceedings of the 4th European Wave Energy Conference, Dec. 2000.
- [29] **van deer Meer, J.W. & Janssen, J.P.F.M 1995.** Wave run-up and wave overtopping at dikes. Task Committee Reports ASCE.
- [30] **Wavegen. 2002.** Islay Limpet Project Monitoring: Final Report. Reporte ejecutivo, consultora Wavegen, serial: ETSU V/06/00180/00/Rep, U.K pp. 37
- [31] **Young Ian R. 1999.** Wind Generated Ocean Waves, Elsevier Ocean Engineering Book Series, vol.2, Ed. Elsevier, U.K, pp 288