

LIBRO: PRY. PROYECTO
TEMA: PUE. Puertos
PARTE: 1. ESTUDIOS
TÍTULO: 04. Estudios de Mareas
CAPÍTULO: 005. Predicción de la Marea Meteorológica

A. CONTENIDO

Este Manual contiene los métodos para efectuar la predicción de la marea meteorológica o de tormenta a que se refiere la Norma N·PRY·PUE·1·04·001, *Ejecución de Estudios de Mareas*, que realice la Secretaría con recursos propios o mediante un Contratista de Servicios.

B. DEFINICIÓN

La marea meteorológica o de tormenta es el aumento o disminución del nivel del agua arriba o abajo del plano horizontal de referencia, debido a la acción de la fuerza del viento ciclónico o huracanado. En el caso del aumento de la marea, el viento sopla contra la costa considerada y en caso de disminución de la marea, el viento sopla en la dirección opuesta, de tierra hacia el mar.

La predicción de la marea meteorológica implica el procedimiento de cálculo que se lleva a cabo para determinar la sobreelevación del nivel del mar por efecto de la marea meteorológica o de tormenta, del sitio de estudio.

C. REFERENCIAS

Son referencias de este Manual, las *Tablas de Predicción de Mareas para los Puertos del Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe* y el *Atlas de Oleaje* del Instituto Mexicano del Transporte.

Además, este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Estudios Topográficos y Batimétricos	N·PRY·PUE·1·01·001
Ejecución de Estudios de Mareas	N·PRY·PUE·1·04·001
Recopilación y Análisis de Información	M·PRY·PUE·1·04·002

D. EJECUCIÓN

D.1. REFERENCIACIÓN A BANCO DE NIVEL

La sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta, así como la información recopilada y las mediciones de campo de los niveles del mar, estarán referenciadas a la elevación del banco de nivel más cercano a la zona de estudio.

Se definirá el sistema coordenado de la zona de estudio conforme a lo establecido en el Inciso D.1.2. del Manual M·PRY·PUE·1·04·002, *Recopilación y Análisis de Información*, apoyándose

en los estudios topográficos a los que se refiere la Norma N-PRY-PUE-1-01-001, *Estudios Topográficos y Batimétricos*, necesarios para referenciar los niveles del mar a planos previamente establecidos.

D.2. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE $H_{1/3}$ Y PERÍODO SIGNIFICANTE $T_{1/3}$, EN AGUAS PROFUNDAS

Para la determinación de las características del oleaje en aguas profundas, como son la altura de ola significativa $H_{1/3}$ y periodo significativo $T_{1/3}$ en aguas profundas, producidas por una perturbación meteorológica como puede ser un ciclón o un huracán, se requiere contar con los datos generales de la perturbación, obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional:

- Trayectorias ciclónicas, y
- La diferencia de presiones atmosféricas Δ_p , dentro y fuera del huracán, la presión central del huracán o ciclón P_0 , la velocidad de avance del huracán V_F y la velocidad máxima del viento $U_{máx}$.

Con la información de las trayectorias ciclónicas y la posición de los ciclones durante los días que duró la perturbación, se seleccionarán los huracanes o ciclones que hayan afectado la zona de estudio y se determinará uno o más puntos entre la zona de generación del oleaje y la línea de costa, como se muestra en la Figura 1, donde se pretenda conocer las características del oleaje.

Las características del oleaje ($H_{1/3}$ y $T_{1/3}$) producido por una perturbación, se calcularán por el método del huracán estándar y las ecuaciones fundamentales son:

$$T_{1/3} = 8,6 e^{\left(\frac{R\Delta_p}{12541}\right)} \left(1 + \frac{0,076 \alpha V_F}{\sqrt{U}}\right)$$

$$H_{1/3} = 5,033 e^{\left(\frac{R\Delta_p}{6270}\right)} \left(1 + \frac{0,153 \alpha V_F}{\sqrt{U}}\right)$$

Donde:

- $H_{1/3}$ = Altura de ola significativa a la salida de la perturbación, (m)
- $T_{1/3}$ = Periodo de ola significativa a la salida de la perturbación, (s)
- R = Radio del máximo viento, (km), $R = 1,853 \text{ antilog}(0,0056P_0 - 3,45)$
- Δ_p = Diferencia de presiones, (mbar), $\Delta_p = P_n - P_0$
- P_n = Presión normal = 1013 mbar
- P_0 = Presión central del huracán o ciclón, (mbar)
- V_F = Velocidad de avance del huracán o ciclón, con la cual se desplaza la perturbación, (km/h)
- U = Velocidad del viento dentro de la perturbación, (km/h), (teóricamente ocurre a 10 m por encima de la superficie libre del mar) $U = 0,865 U_{MÁX} + 0,5 V_F$
- $U_{MÁX}$ = Velocidad máxima del viento, (km/h)
- α = Coeficiente para huracanes = 1

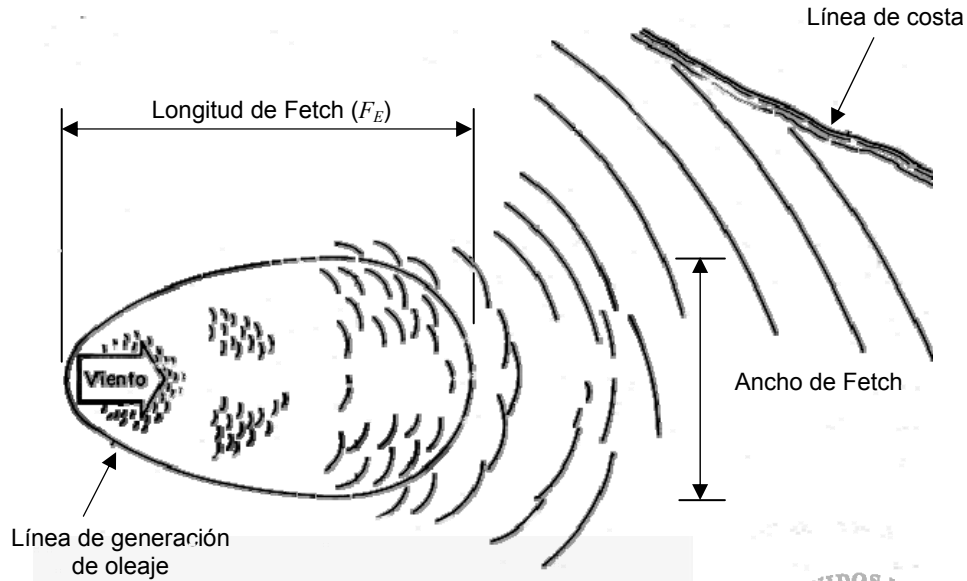


FIGURA 1.- Interpretación gráfica del Fetch cuando el viento es ocasionado por un ciclón o huracán

Adicionalmente,

$$F_E = 22,168 \left(\frac{H_{1/3}}{U} \right)^2$$

Donde F_E es la longitud del Fetch, en kilómetros (ver Figura 1). El Fetch es la distancia donde el viento afecta el oleaje, llamada zona de generación, que es donde se determinan las características del oleaje ($H_{1/3}$ y $T_{1/3}$).

D.3. DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO T_R

El período de retorno T_R (en años) es el número promedio de años en que un evento anual es superado o igualado. Se obtiene con la siguiente expresión:

$$T_R = \frac{1}{P}$$

Donde P es la probabilidad de igualar o exceder el evento en un año.

Para calcular la probabilidad, se procede a ordenar de manera decreciente los valores de las alturas de ola significantes máximas en un año y se les asigna un número según el orden en que se encuentran, siendo 1 la más grande de todas, 2 la inmediata inferior y así sucesivamente. La probabilidad de igualar o exceder a la m -ésima ola más grande, se obtiene a partir de:

$$P = \frac{m}{N + 1}$$

Donde:

- m = Número de orden de alturas de ola significante
- N = Número total de valores de alturas de ola significante

Para calcular el período de retorno asociado a una altura de ola significativa en cualquier punto de las costas del Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe, se requerirá contar con datos de oleaje de 20 años o más, los cuales se podrán obtener mediante métodos de predicción de oleaje, o en el mejor de los casos mediante mediciones sistemáticas. Si bien no se cuenta en el país con mediciones de largo plazo, en el *Atlas de Oleaje* del Instituto Mexicano del Transporte (<http://www.imt.mx>), se dispone de una base de datos de las características del oleaje de 44 años, los cuales se determinaron mediante métodos de predicción de oleaje.

En las Figuras 2 y 3 se muestran, como ejemplo, gráficas típicas que relacionan las alturas y períodos de ola significativa contra períodos de retorno.

Gráfica de alturas de ola

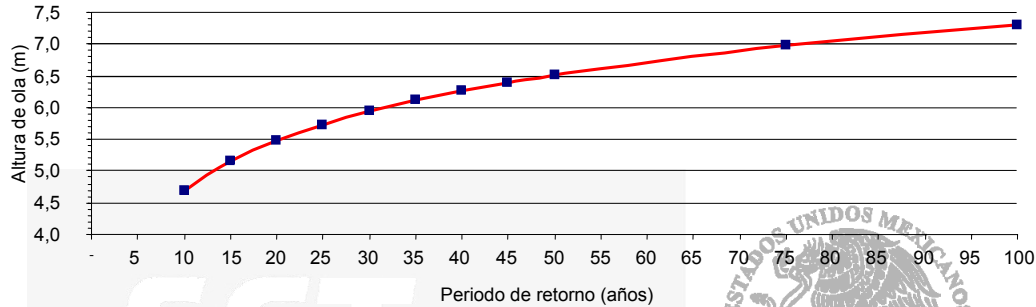


FIGURA 2.- Altura de ola significativa vs periodo de retorno

Gráfica de periodos de ola

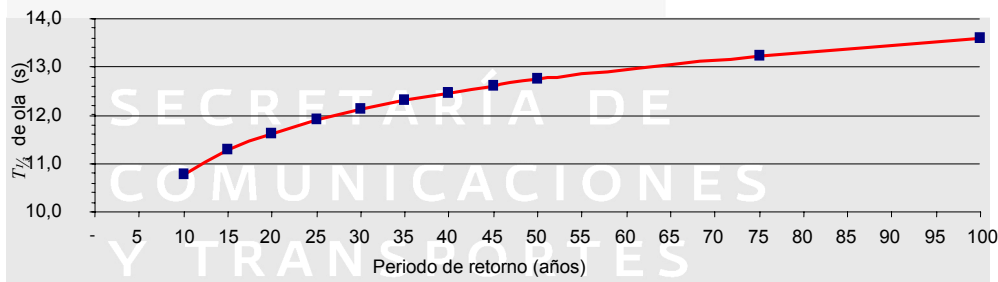


FIGURA 3.- Periodo de ola significativa vs periodo de retorno

D.4. CÁLCULO DE LA SOBREELEVACIÓN DEL NIVEL DE MAR POR MAREA DE TORMENTA

El avance de un ciclón o huracán hacia la costa, trae consigo un aumento significativo en el nivel del mar, lo cual se conoce como sobreelevación por marea de tormenta.

El cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta, se puede llevar a cabo mediante cualquiera de los dos métodos siguientes:

- Método Quasi-Estático
- Método del Nomograma

D.4.1. Método Quasi-Estático

Este método simplificado aplica para el Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe y supone que la marea de tormenta responde instantáneamente a la fuerza del viento que sopla hacia la costa.

Las ecuaciones básicas para calcular la sobreelevación del nivel del mar por este método son las siguientes:

$$gD \frac{\partial S}{\partial x} = fV + \frac{\tau_{SX}}{\rho}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\tau_{SY} - \tau_{bY}}{\rho}$$

Donde:

S = Sobreelevación del nivel del mar en la profundidad d , (m) (ver Figura 4)

S_T = Sobreelevación total en la costa, (m) (ver Figura 4)

g = Aceleración de la gravedad, (m/s²)

S_X = Sobreelevación en el eje "X", (m)

S_Y = Sobreelevación en el eje "Y", (m)

τ_{SX} = Componentes del esfuerzo tangencial por la acción del viento en la superficie del mar, (kg/m²)

τ_{SY}

$$\tau_{SX} = \rho k W^2 \cos \theta$$

$$\tau_{SY} = \rho k W^2 \sin \theta$$

k es el coeficiente adimensional que tiene los siguientes valores, y θ es el ángulo con que se dirige el viento hacia la costa, medido a partir del eje "X":

$$k = K_1 \quad \text{para } W \leq W_c$$

$$k = K_1 + K_2 \left(1 - \frac{W_c}{W} \right) \quad \text{para } W \geq W_c$$

$$K_1 = 1,1 \times 10^{-6}$$

$$K_2 = 2,5 \times 10^{-6}$$

W_c es la velocidad crítica del viento = 26 km/h

W = Velocidad del viento, (km/h)

W_X
 W_Y = Componentes de la velocidad del viento, (km/h)

d = Profundidad abajo del nivel de referencia, (m)

D = Profundidad total, (m)

V = Componente de la velocidad del agua por unidad de ancho, (km²/h)

f = Coeficiente de Coriolis, (h⁻¹)

$$f = 2\omega \sin \phi$$

ω es la velocidad angular de la tierra, 15°/h

ϕ es la latitud (grados)

- ρ = Densidad del agua de mar, ($\text{kg s}^2/\text{m}^4$)
 τ_{bY} = Componentes del esfuerzo cortante en el fondo, (kg/m^2)

$$\tau_{bY} = \frac{\rho K V |V|}{D^2}$$

K es el coeficiente adimensional cuyo valor está en el rango de:
 2×10^{-3} y 5×10^{-3} y puede tomar un valor inicial de $2,5 \times 10^{-3}$

- t = Tiempo de duración de la tormenta, (h)

Las variables anteriores se pueden identificar en la Figura 4.

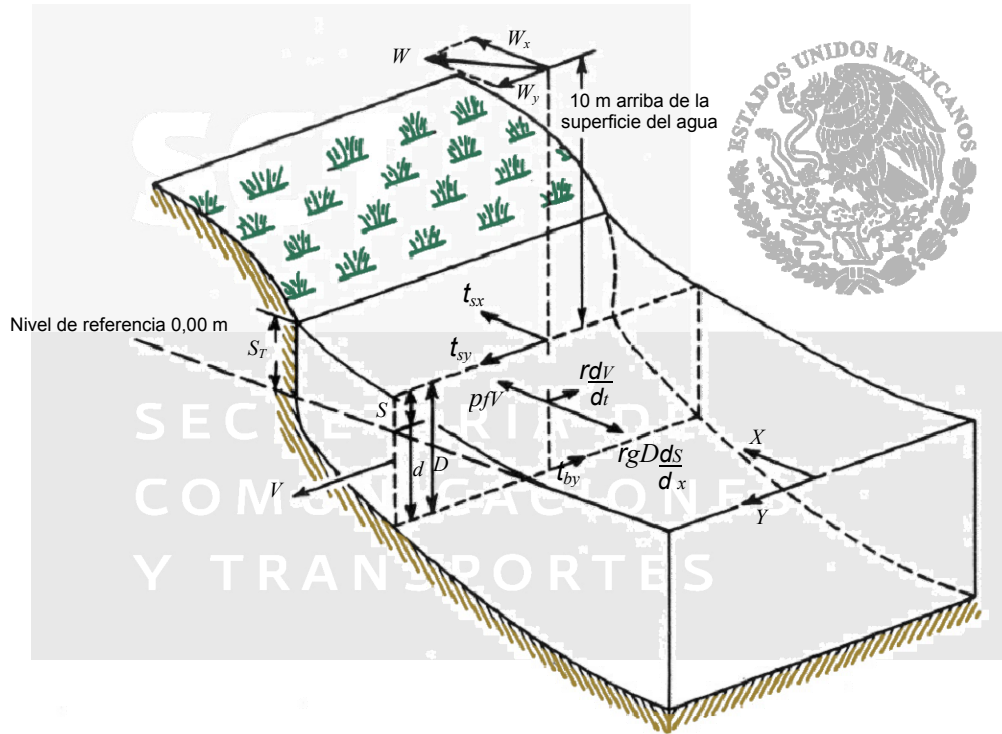


FIGURA 4.- Esquema de fuerzas del método Quasi-Estático

D.4.2. Método del Nomograma

Para el Golfo de México, el cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta, se puede realizar mediante el método del Nomograma que se indica en la Tabla 1, siguiendo el procedimiento establecido.

Para el caso del Océano Pacífico y Mar Caribe, el cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta, se realizará de acuerdo con lo indicado en el Inciso D.4.3. de este Manual.

TABLA 1.- Método del nomograma para el cálculo de la sobreelevación del nivel del mar

DATOS ZONA DE ESTUDIO:			
	Nombre del puerto		
	Latitud (ϕ) zona de estudio, obtenida de la Figura 5:	°Norte	
	Longitud zona de estudio:	°Oeste	
	$H_{1/3}$ altura de ola significativa en aguas profundas, obtenida de acuerdo con lo señalado en la Fracción D.2.	m	
	$T_{1/3}$ periodo de ola significativa en aguas profundas, obtenido de acuerdo con lo señalado en la Fracción D.2.	s	
	Periodo de retorno T_R , obtenido de acuerdo con lo señalado en la Fracción D.3.	años	
#	PROCEDIMIENTO:		
1	Determinación de la subregión:	De acuerdo con la Figura 5	
2	Cálculo de la probabilidad de ocurrencia $P_{(a)}$		
	$P_{(a)} = \left[\frac{-1}{P(Y)} \right] \log_e \left[\frac{T_r - 1}{T_r} \right]$		
	Probabilidad de la subregión $P(Y)$, es el valor numérico que aparece en la Figura 5, asociado a cada subregión (a, e, i, m, n, o)		
	Parámetro α	Con el valor $P_{(a)}$ y con la Tabla 3, se obtiene el parámetro α (adimensional) [estas variables se representan esquemáticamente en la Figura 6]	
3	Cálculo del índice de presión media P_{OM} :		
	$P_{OM} = 1028,14 - 1,695 \phi$	mbar	
	ϕ = Latitud de la subregión, obtenida en la Figura 5		
4	Cálculo de la desviación estándar del índice de presión SP_{OM} :		
	$SP_{OM} = 54,24 - 1,017 \phi$	mbar	
	ϕ = Latitud de la subregión, obtenida en la Figura 5		
5	Cálculo del índice de presión del huracán, P_0 :		
	Intensidad del huracán representado por el índice P_0		
	$P_0 = P_{OM} + \alpha SP_{OM}$	mbar	
6	Radio máximo de viento R :	km	
	Distancia del centro del huracán al lugar donde ocurre la mayor velocidad de viento		
	$R = 0,0006574 e^{0,01155 P_0}$	km	

7	Radio asociado al FETCH, r :			
	Distancia teórica del centro del huracán a la línea de generación			
	$r = (1,4134 - 0,01R)R$	km		
8	Índice de energía asociado al huracán E :			
	$E = 151,2(1014,24 - P_0)^{1,1667} R^{0,6667} (\text{sen } \phi)^{-0,3333}$	adimensional		
9	Longitud del Fetch F :			
	$F = 0,3391 E^{(0,553)}$	km		
10	Altura de ola significativa asociada al evento $H_{1/3}$:			
	$H_{1/3} = 0,024 E^{(0,452)}$	m		
	Se toma la $H_{1/3}$ mayor, comparada con el valor obtenido de acuerdo con la Fracción D.2.			
	La mayor altura de ola significativa es utilizada en los cálculos posteriores			
11	Periodo de ola significativa asociada al evento $T_{1/3}$:			
	$T_{1/3} = 0,644 E^{(0,222)}$			
	Se toma el $T_{1/3}$ mayor, comparado con el valor obtenido de acuerdo con la Fracción D.2.			
	El mayor periodo significativo es utilizado en los cálculos posteriores			
12	Tiempo de duración del huracán o ciclón t_D :			
	$t_D = 0,087 E^{(0,429)}$	h		
13	Velocidad del viento formativo U_{10} :			
	Viento que se produce a 10 m sobre la superficie del mar			
	$U_{10} = 7,26 (H_{1/3})^{0,4}$	m/s		
14	Índice de ascenso por oleaje S_I :			
	$\Delta_p = 1013,25 - P_{OM}$	mbar		
	Δ_p : Diferencia de presiones dentro y fuera del huracán			
	S_I obtenido de la Figura 7	m		

15	Determinación del factor de corrección F_M (para cada una de las direcciones del oleaje consideradas)			
	Con ayuda de la Figura 8 y utilizando el valor de la velocidad del viento del paso número 13, convertido a millas náuticas por hora			
16	Cálculo de la altura de ola en rompiente H_B			
	El cálculo de la altura de ola en rompiente se hará con la ayuda de la Figura 9, donde $L_0 = 1,56 (T_{1/3})^2$ es la longitud de ola en aguas profundas	m		
17	Cálculo del ascenso producido por el viento (S_P y $S_{P\text{ MÁX}}$) para las direcciones del oleaje consideradas en el paso número 15, usando la expresión:			
	$S_P = S_I * F_M$	m		
	S_I definido en el paso número 14 y F_M en el paso número 15			
	$S_{P\text{ MÁX}} = S_I * F_{M\text{ MÁX}}$	m		
	El factor de corrección $F_{M\text{ MÁX}}$ (para $\psi = 80^\circ$) se obtiene con la ayuda de la Figura 8 y del valor de la velocidad del viento formativo del paso número 13, convertido a millas náuticas por hora			
18	Cálculo del ascenso del nivel del mar por oleaje S_W :			
	$S_W = 0,19 \left[1 - \left(\frac{H_B}{g(T_{1/3})^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] H_B$			
	Donde H_B es la altura de ola en rompiente, (m), obtenida en el paso número 16 y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2)			
	Para obtener S_W se utiliza la relación: $\frac{H_B}{g(T_{1/3})^2}$ cuyo valor se busca en el eje "x" de la Figura 10; es decir entre los valores: $0,0006 < \frac{H_B}{g(T_{1/3})^2} < 0,027$; este valor se interseca con el valor "m" que es la pendiente de la playa de la zona de estudio y sobre el eje "y" se obtiene el valor de la relación S_W / H_B , de donde se despeja el valor de S_W ; (H_B es la altura de ola en rompiente obtenida en el paso número 16)			

19	Cálculo de la altura de marea astronómica Z_{MA}				
	De las <i>Tablas de Predicción de Mareas</i> de la Dirección General de Hidrografía y Cartografía de la Secretaría de Marina o alguna otra referencia indicada en la Cláusula C. de este Manual, se determinan los siguientes valores de la marea astronómica:				
	Nivel Representativo del Mar	Elevación con respecto al NBM.* (Nivel de Bajamar Media) m			
	Pleamar Máxima Registrada				
	Nivel de Pleamar Media Superior				
	Nivel de Pleamar Media				
	Nivel Medio del Mar				
	Nivel de Bajamar Media				
	Nivel de Bajamar Media Inferior				
	Bajamar Mínima Registrada				
	<p>Z_{MA} es la altura de marea astronómica para el Golfo de México y se define como: Z_{MA} = la diferencia entre el Nivel de Pleamar Media y el Nivel de Bajamar Media</p> <p>Para el Océano Pacífico y Mar Caribe, la altura de marea astronómica Z_{MA} se define como la diferencia entre el Nivel de Pleamar Media y el Nivel de Bajamar Media Inferior</p>	m			
20	Cálculo del ascenso máximo del nivel del mar				
	<p>Si $S_P + S_W > S_{PMAX}$</p> <p>Se utiliza la expresión: $\Delta Z_T = Z_{MA} + (S_P + S_W)$</p>				
	<p>Si $S_{PMAX} > S_P + S_W$</p> <p>Se utiliza la expresión: $\Delta Z_T = Z_{MA} + S_{PMAX}$</p>				
	Direcciones de oleaje	$(S_P + S_W)$ ΔZ_1 m	Marea astronómica ΔZ_2 m	Sobre-elevación ΔZ_T m	Pro medio ΔZ_T m

	<p>Todas las direcciones consideradas para la zona de estudio como se menciona en el paso número 15, donde el Promedio Δ_{ZT} es la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta, referida al Banco de Nivel y a las Coordenadas de la Zona de Estudio como se indica en la Fracción D.1.</p>				
--	---	--	--	--	--

La Tabla 2 se emplea de base para el ordenamiento de datos del método del Nomograma.

TABLA 2.- Método del nomograma

Dirección de oleaje	$H_{1/3}$ m	$T_{1/3}$ s	L_0 m	Latitud subregión grados	ψ grados	H_B m	P_0 mbar	U_{10} m/s	Δ_P mbar
R km	S_I m	F_M	S_P m	F_{MMAX}	$S_{P MAX}$ m	ΔZ_1 m	ΔZ_2 m	ΔZ_T m	Promedio Δ_{ZT} m

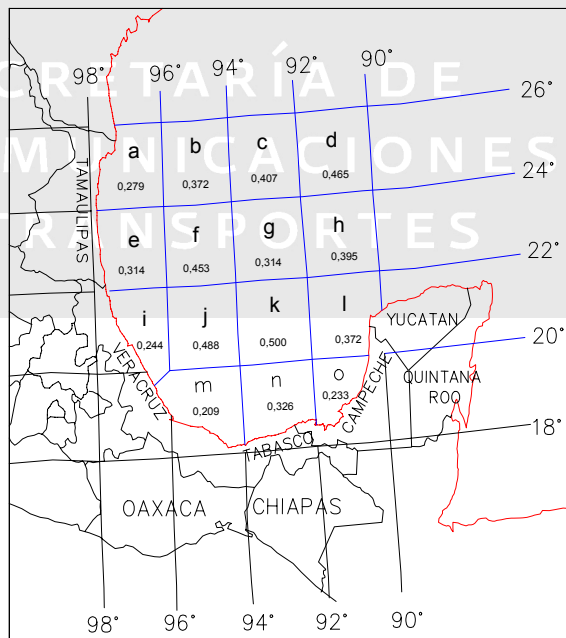
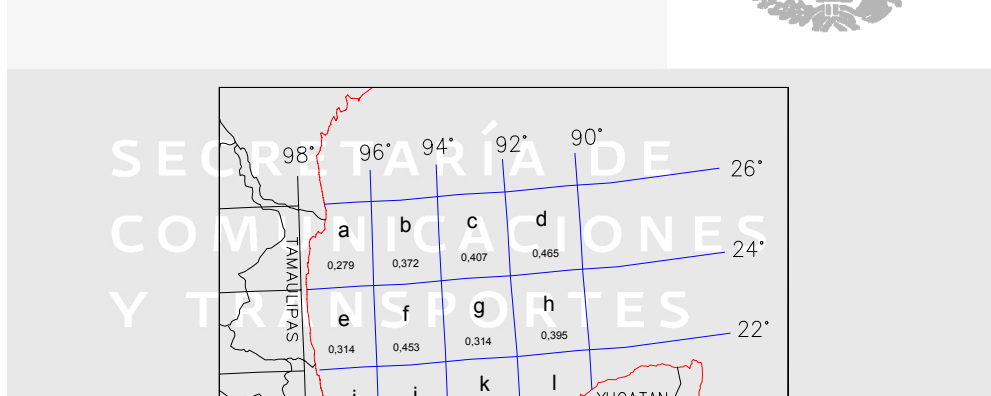


FIGURA 5.- Subregiones del Golfo de México y probabilidad de ocurrencia, donde a, b, c, \dots , representan a las subregiones del Golfo de México y 0,279, 0,372, 0,407, \dots , son las probabilidades de ocurrencia

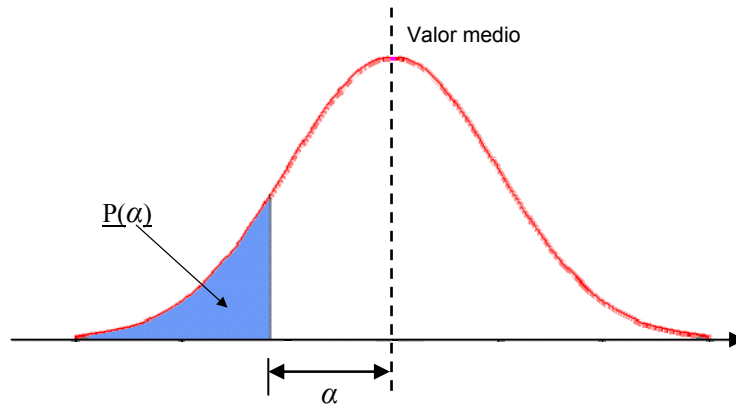


FIGURA 6.- Esquema de la distribución normal para determinar el parámetro α

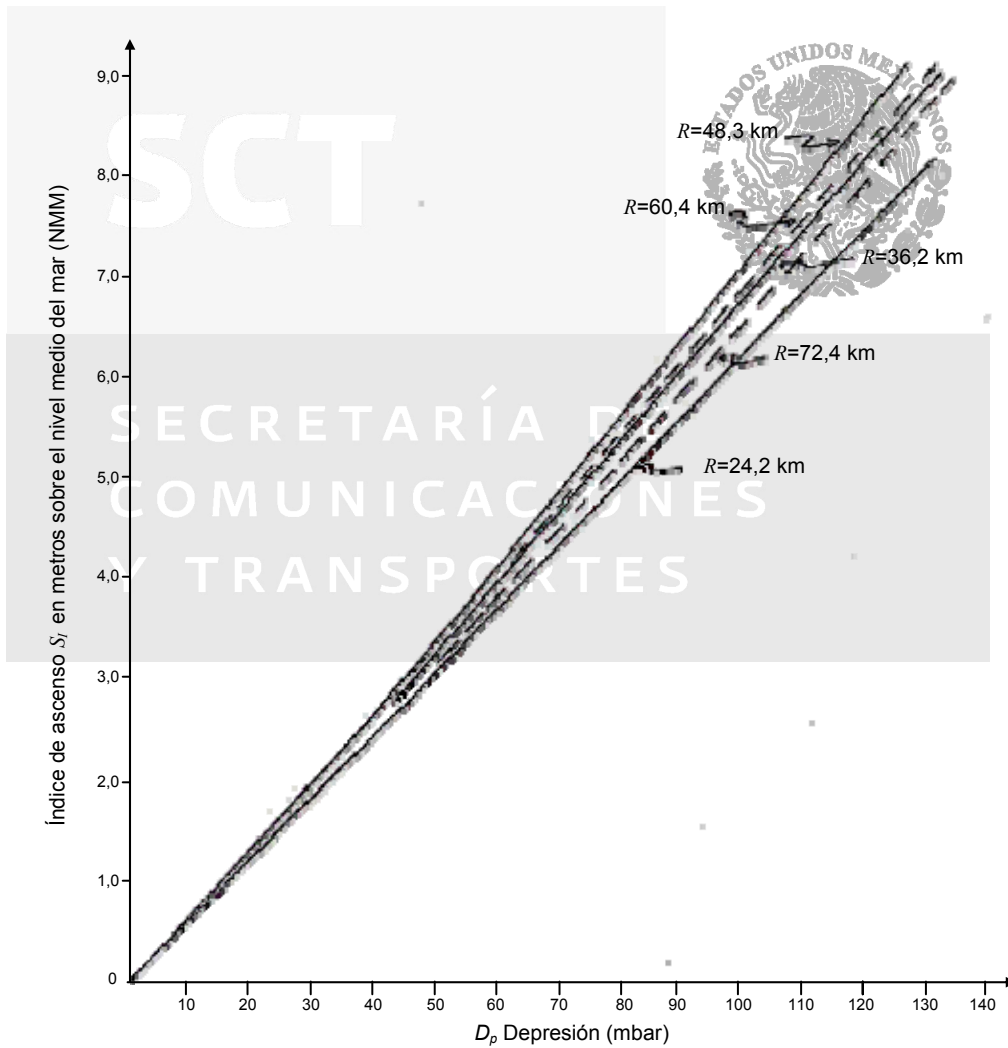


FIGURA 7.- Estimación del índice de ascenso S_I

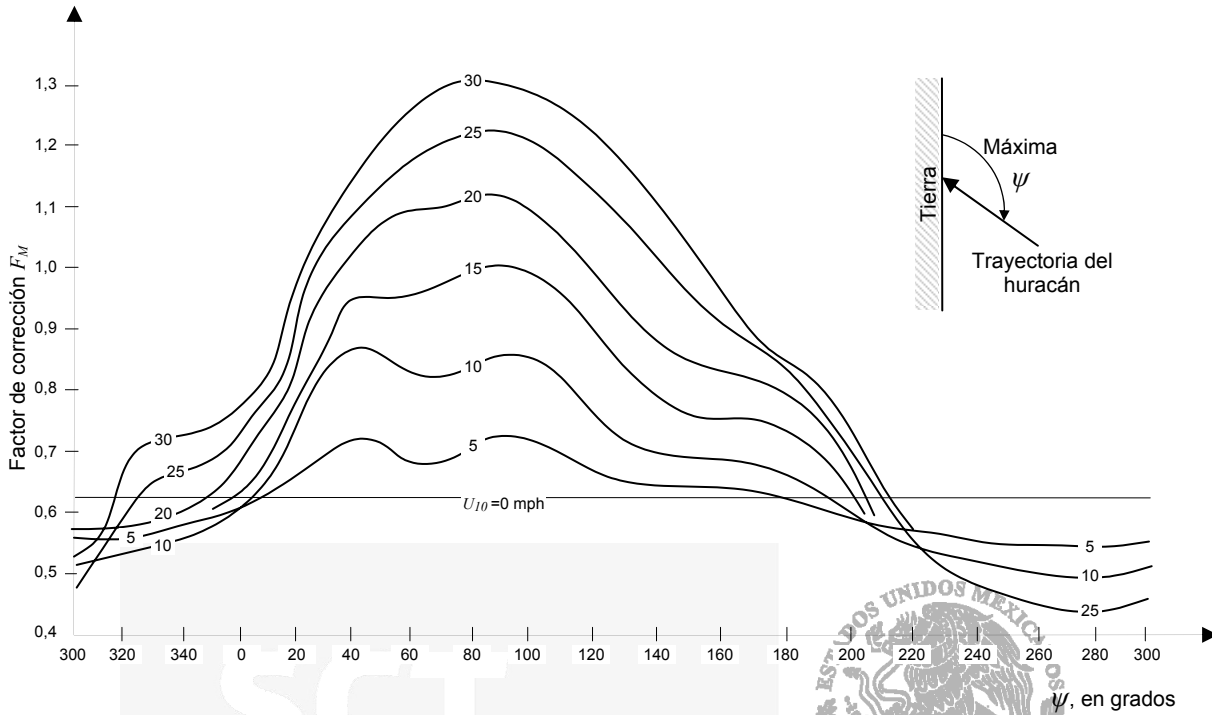


FIGURA 8.- Factor de corrección F_M ; donde U_{10} = velocidad del viento formativo

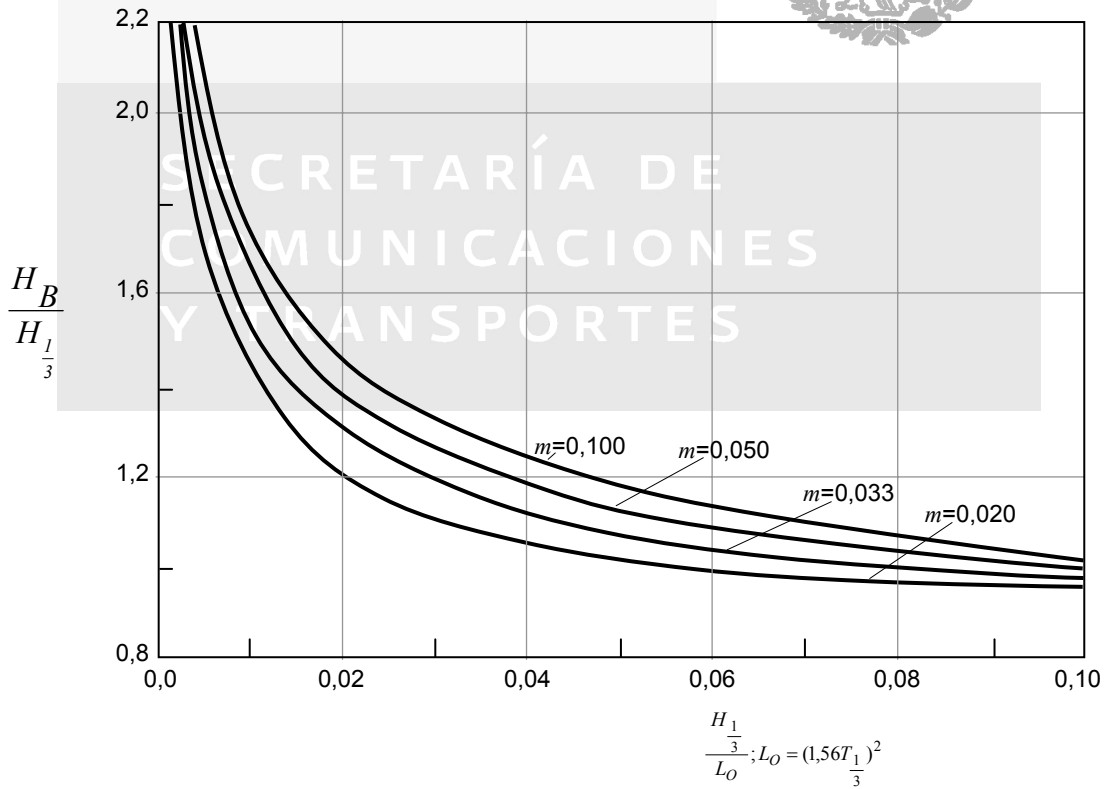


FIGURA 9.- Altura de ola rompiente H_B y su clasificación en función de la pendiente de la playa (m), altura de ola en aguas profundas $H_{1/3}$ y esbeltez de la ola $H_B/H_{1/3}$ según el CERC (Coastal Engineering Research Center)

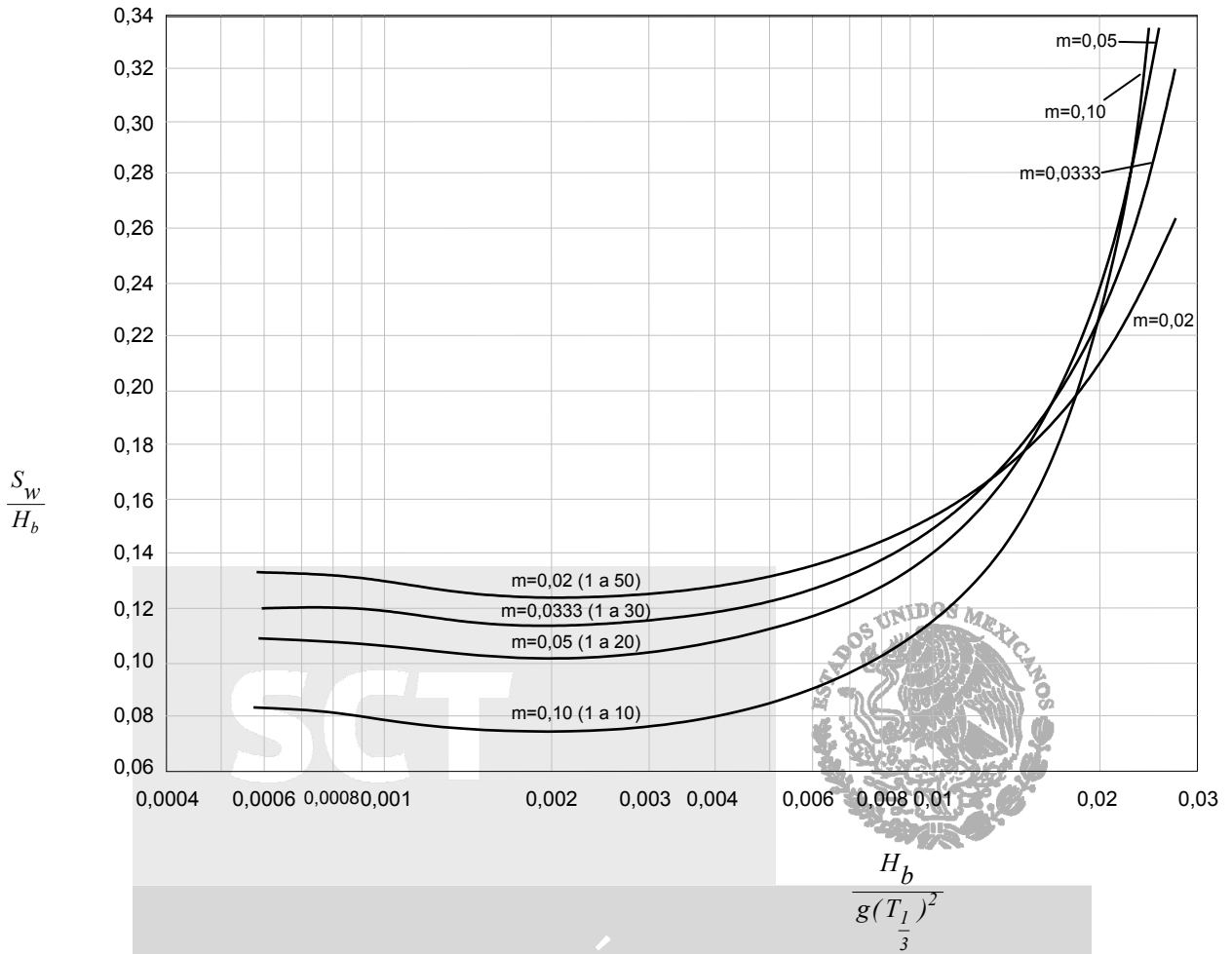


FIGURA 10.- Ascenso del nivel del mar por oleaje S_w

D.4.3. Cálculo de la sobreelevación del nivel de mar por marea de tormenta en el Océano Pacífico y Mar Caribe

La sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta para el Océano Pacífico y Mar Caribe, se estimará de acuerdo con lo señalado en los puntos 6 al 22 de la Tabla 1, ya que no se dispone de estadísticas de ocurrencias de ciclones en ambas zonas, calculando previamente lo siguiente:

1)	Cálculo del índice de presión:	
	$P_0 = 1028,14 - 1,695\phi$	
	donde ϕ es la latitud del sitio de estudio	mbar
2)	Diferencia de presiones Δ_p :	
	$\Delta_p = 1013,25 - P_0$	mbar

E. BIBLIOGRAFÍA

US Army Coastal Engineering Research Center, *Shore Protection Manual*, Vol. 1, Department of the Army Corps of Engineers. EEUU (1977)

US Army Corps of Engineers, *Water Levels and Wave Heights for Coastal Engineering Design*, Engineer Manual, No. 1110-2-1414, EEUU (1989)

Sánchez Bribiesca, J. L., *Manual de Hidráulica Marítima Elemental*, Comisión Federal de Electricidad, México (1987)

Frías V., A. y Moreno C., G., *Ingeniería de Costas*, México (1988)

Shou Liu y Meter Frigaard, *Generation and Analysis of Random Waves*, Aalborg Universitet, Denmark (2001)

Comisión Federal de Electricidad, *Manual de Diseño de Obras Civiles*, Sección Hidrotecnia A.2.13., Hidráulica Marítima, México (1983)

Comisión Federal de Electricidad, *Análisis Espectral del Oleaje*, México (1988)

SCT



SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES